



Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física “Gleb Wataghin” - IFGW
F 809A – Instrumentação para Ensino
2º semestre / 2004

Válvula Diodo Para Estudo do Efeito Termoiônico



Aluno: Ricardo Rogério Gardin – RA 003320

Orientador: Prof. Dr. Yoshikazo Ernesto Nagai

Coordenador: Prof. Dr. José J. Lunazzi

ÍNDICE

RESUMO	III
INTRODUÇÃO	III - IV
TEORIA	IV - VI
CONSTRUÇÃO DA VÁLVULA DIODO	VI- VII
DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	VII - IX
APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	IX - XI
ORIGINALIDADE.....	XI - XII
CONCLUSÃO	XII
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	XII
ANEXOS.....	XIII - XVI

RESUMO

Embora as válvulas diodo tenham sido substituídas pelo transistor e pelo circuito integrado, para muitas aplicações, a emissão termoiônica continua sendo conveniente e popular fonte de elétrons, para a operação de, por exemplo, tubos de raios catódicos, fornos de microondas (magnetrons), televisores e monitores de vídeos (tubo de imagem). Mas este último está sendo substituído pelas telas de cristal líquido e a velocidade desta troca é apenas uma questão de preços. Também são usadas em equipamentos industriais, radares, transmissores de potência.

De qualquer forma, para quem só viveu a era dos semicondutores, pode ser interessante conhecer um pouco deste componente que foi a base para o desenvolvimento da tecnologia eletrônica.

Neste experimento, foi possível estudar a o efeito termoiônico através de uma válvula diodo de fabricação americana da RCA , achada em um rádio antigo. Obtemos e interpretamos os valores de corrente e tensão característicos para diferentes temperaturas do filamento, verificamos as limitações que o espaço da carga impõe na corrente termoiônica predito pela lei de Child's e medimos o valor de e/m para o elétron. Tivemos também a oportunidade de construir uma válvula diodo e realizar alguns testes na mesma. Tal válvula servirá para futuros experimentos das disciplinas da física moderna.

INTRODUÇÃO

O efeito termoiônico é definido como a emissão de elétrons por uma superfície metálica aquecida. Os primeiros sinais do fenômeno foram observados em meados do século XVIII por Charles DuFay, que notou que um gás conduzia eletricidade quando colocado próximo a um sólido aquecido. Após as observações de DuFay, em 1853 o físico francês Edmund Becquerel mostrou que é possível produzir corrente elétrica a partir de um potencial gerado entre dois eletrodos de platina quente com ar aquecido entre estes. Finalmente, em 1883, Thomas A. Edison verificou que elétrons são emitidos quando um metal é aquecido. Podemos compreender o efeito termoiônico de uma maneira simples. Ao fornecer energia térmica a um material, seus elétrons ganham energia cinética. Haverá, portanto a emissão desses elétrons se sua energia for suficiente para superar a barreira de potencial da superfície do material. É possível associar aos elétrons que saem do material uma densidade de corrente a que depende das características do material. Uma dessas características é a função trabalho, que é a energia mínima que se deve fornecer a um elétron para removê-lo do metal, por exemplo, a função trabalho do Tungstênio é cerca de 4,52eV. Em 1928, Owen Willans Richardson ganhou

o prêmio Nobel da Física pelo trabalho do fenômeno Termoiônico e pela descoberta da lei (1916) abaixo e que mais tarde foi corrigida por Dushman em 1930:

$$J_0 = A T^2 \exp(-\Psi / K T) \text{ (amperes / cm}^2\text{)} \quad (1)$$

onde A é uma constante que é igual a 120,4 amperes/cm², k é a constante de Boltzman, T é a temperatura em graus Kelvin, Ψ é a função trabalho do material em elétron-volts.

TEORIA

As experiências envolvendo a observação deste efeito são realizadas comumente em válvulas, que são dispositivos constituídos basicamente de um tubo onde se faz vácuo com dois eletrodos internos. O efeito é verificado através da geração de uma diferença de potencial elétrico entre o filamento e o coletor, sendo o terminal negativo conectado ao filamento (chamado de cátodo) e o positivo conectado ao coletor (chamado de ânodo). Aquecendo-se suficientemente o filamento, observar-se-á uma corrente elétrica no terminal positivo (coletor). Para se obter uma expressão para a corrente coletada pelo coletor, faz-se necessária à análise de toda a dinâmica que vai desde da emissão do elétron pelo filamento até a sua absorção pelo coletor. Portanto, fatores como a geometria do filamento, a forma do potencial elétrico entre o filamento e o coletor, como também a presença de outros elétrons emitidos deve ser levada em consideração. A densidade de corrente é dada pela lei de Child, para simetria cilíndrica (esta equação é uma correção da equação de Richardson - Efeito "Space charge layer"):

$$I_C = (8\pi\epsilon_0/9) l V_0^{3/2} r_a^{-1} \beta^{-2} \sqrt{(2e/m)} \quad (2)$$

onde V_0 é a diferença de potencial entre o filamento e o coletor, e é a carga do elétron, ϵ_0 é a constante dielétrica do vácuo, l é o comprimento do filamento, r_a é o raio do coletor, m é a massa do elétron e β é um coeficiente de correção que é uma função de (r_c / r_a) e pode ser achado na literatura.

Se adotarmos:

$$C_0 = (8\pi\epsilon_0/9) l r_a^{-1} \beta^{-2} \sqrt{(2e/m)}$$

Temos a equação 3:

$$I = C_0 V_0^{3/2} \quad (3)$$

onde C_0 é uma constante que depende da geometria da válvula

Aplicando a função logaritma nos dois lados da equação 3, temos a equação:

$$\mathbf{\text{Log } I = \text{Log } C_0 + 3/2 \text{ Log } V_0} \quad (4)$$

Ao plotarmos o gráfico (figura 04) da corrente no coletor (ordenadas) versus a tensão no coletor (abscissas) em escala logarítmica temos:

$\text{Log } C_0 \rightarrow$ *Coeficiente linear da reta*

$3/2 \rightarrow$ *Coeficiente angular da reta*

Coeficiente angular da reta teórico (valor encontrado no livro [01] das referências bibliográficas):

$$\mathbf{\Delta \text{Log } I / \Delta \text{Log } V_0 = 1,49 \pm 0,02} \quad (5)$$

Método para medir a razão e/m

Se além do campo de aceleração associado com o potencial V_0 , um campo magnético é aplicado paralelamente ao filamento da válvula diodo, a trajetória dos elétrons fazem um caminho circular conforme a figura 01. A medida que o campo B aumenta, aumentam os elétrons em movimento circular, Quando $B = B_0$ crítico, os elétrons não alcançam mais o coletor de raio $r = r_a$ e a corrente vai para zero. Para obter o campo magnético usamos um solenóide.

Se B_0 é medido experimentalmente, então a razão da carga do elétron pela massa (e/m) pode ser deduzida da relação entre B_0, V_0, r_a , como fizemos neste projeto.

A equação que usaremos (eq. 6) foi encontrada no livro [3] das referências bibliográficas,

$$\mathbf{V_0 = (B_0^2 r_a^2 / 8) \cdot (e/m)} \quad (6)$$

Que se transforma na equação 7:

$$\mathbf{e/m = 8 V_0 / (B_0^2 r_a^2)} \quad (7)$$

Melhores valores conhecidos: $e = 1,60217738 \times 10^{-19} \text{ C}$ $m = 9,1093897 \times 10^{-31} \text{ kg}$. Sendo assim a razão teórica da carga do elétrons pela massa é:

$$e/m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ coulomb / Kg}$$

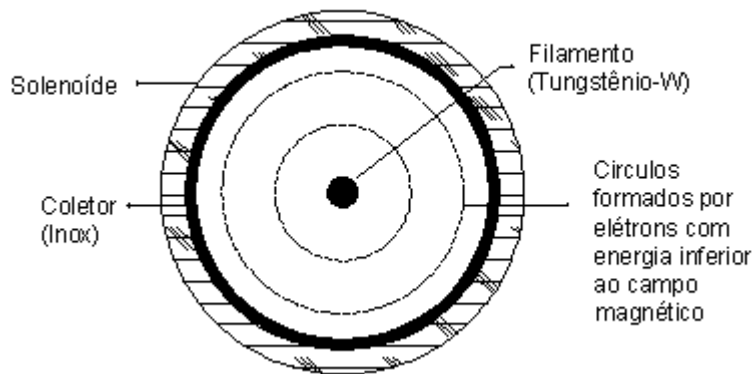


Figura 01: Vista de cima de uma válvula diodo submetida a um campo magnético. Os elétrons que emergem do filamento, com energia inferior ao campo magnético, formam círculos. Elétrons com energia superior ao campo magnético atingem o coletor.

O Solenóide

O campo magnético do solenóide é a soma vetorial dos campos criados por cada uma de suas espiras. Para pontos muito próximos ao fio, o fio se comporta magneticamente (quase) como um fio retilíneo longo e as linhas de B associadas a cada espira são praticamente círculos concêntricos. Os campos tendem a se cancelar entre espiras adjacentes e em pontos no interior do solenóide. Razoavelmente longe do fio, B é aproximadamente paralelo ao eixo (central) do solenóide. No caso limite de um solenóide ideal, infinitamente longo e que consiste em espiras estreitamente espaçadas de fio de seção reta quadrada, o campo no interior do solenóide é uniforme e paralelo ao eixo do solenóide. Entretanto, fora do solenóide, o campo será zero. O sentido do campo magnético ao longo do eixo do solenóide é dado pela regra da mão direita, interpretada do seguinte modo: segure o solenóide com a mão direita de modo que seus dedos sigam o sentido da corrente nos enrolamentos; seu polegar direito estendido apontará, então, no sentido do campo magnético.

A equação para o campo magnético num solenóide é:

$$\mathbf{B} = n i_s \mu_0 \quad (8)$$

onde: n é o número de espiras por unidade de comprimento do solenóide, i_s é a corrente do solenóide, μ_0 é uma constante, denominada *constante de permeabilidade*, cujo valor exato, por definição é:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m/A} \cong 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ T.m/A}$$

CONSTRUÇÃO DA VÁLVULA DIODO

A válvula diodo foi construída segundo o esquema da figura 06 (em anexo). O tubo é de vidro (Borosilicado) e no seu interior foi feito vácuo. O filamento interno e os eletrodos são de Tungstênio e o coletor é de Inox. Usamos também cerâmica para isolar e fixar, na parte superior, o filamento no centro do coletor.

Após a aquisição dos materiais e confecção das peças internas da válvula (vide figura 07 em anexo) nos laboratórios e vidraria da Unicamp, iniciamos a montagem da válvula.

Primeiro soldamos grampos de fixação no suporte da cerâmica e depois soldamos o suporte no coletor. O filamento e o coletor foram fixados nos pinos da base de vidro. Esta fixação foi feita com conectores e parafusos, porque foram feitas várias tentativas de solda e verificou-se que o aquecimento local danificava o selo entre o vidro da base e os pinos. Posteriormente passamos o pino superior pela cerâmica e pela mola e fixamos no cap.

Uma vez montada a parte interna (vide figura 08 em anexo), prosseguimos com a finalização da montagem da válvula, colocando a parte interna no tubo de vidro. O tubo foi fundido primeiramente na base e depois no topo. Nesta etapa atentamos para que a fundição fosse perfeita, ou seja, não poderia haver vazamento nas junções, pois necessitaríamos de vácuo no interior do tubo.

Para a verificação da fundição, conectamos duas fontes de tensão ajustáveis nos terminais da válvula e evacuaremos os gases internos, com uma bomba mecânica. Alcançado o vácuo desejado, selamos o canal de evacuação da válvula, finalizando assim a construção.

Abaixo estão as características da válvula construída:

Modelo:

Comprimento do Filamento:.....6,0 cm

Diâmetro do filamento:..... 0,02 cm

Diâmetro do coletor de Inox:..... 3,0 cm

Comprimento do coletor:.....6,0 cm

Resistência de diâmetro comum:.....desconhecido

Máxima tensão do filamento:.....desconhecido

Máxima corrente do filamento:.....desconhecido

Máxima tensão do anodo:.....desconhecido

Máxima corrente do anodo:.....desconhecido

Máxima dissipação do anodo:.....desconhecido

Obs: Os valores desconhecidos serão encontrados futuramente com os testes na válvula pronta.

DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

No laboratório de ensino de física da Unicamp, fizemos as conexões conforme a figura 06, para medir os valores de corrente e tensão (no coletor) característicos para diferentes temperaturas do filamento (tensão do filamento). Colocamos tensão no filamento da válvula e observamos que este ficou incandescente por alguns segundos e depois apagou e não acendeu mais. Provavelmente a selagem da válvula não estava perfeita e entrou ar na região onde existia vácuo, oxidando, assim o filamento.

Tal acontecimento nos causou preocupação em relação ao tempo que levaria para reparar a válvula, uma vez que o tubo de vidro deveria ser aberto novamente e trocado o filamento de tungstênio. Este serviço dependia do agendamento com a vidraria da Unicamp e certamente não ficaria pronto dentro do prazo para entrega do relatório do projeto.

Certos de que a construção da válvula deveria prosseguir, mas não obteríamos as medidas em tempo hábil, fomos a procura de uma válvula. Encontramos uma válvula diodo para retificação, que era usada nos rádios antigos, de fabricação americana da RCA. Com esta válvula conseguimos realizar as medidas e estudar o efeito Termoiónico.

A figura 02 apresenta o esquema de ligação da válvula diodo da RCA para realização das medidas.

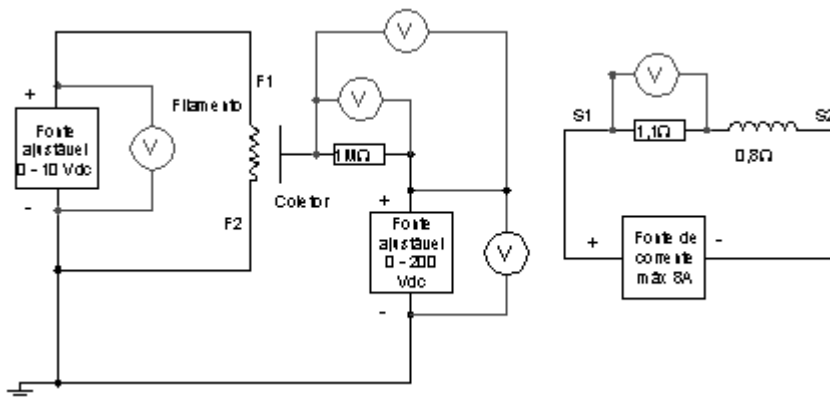


Figura 02: Esquema das conexões para a válvula diodo da RCA.

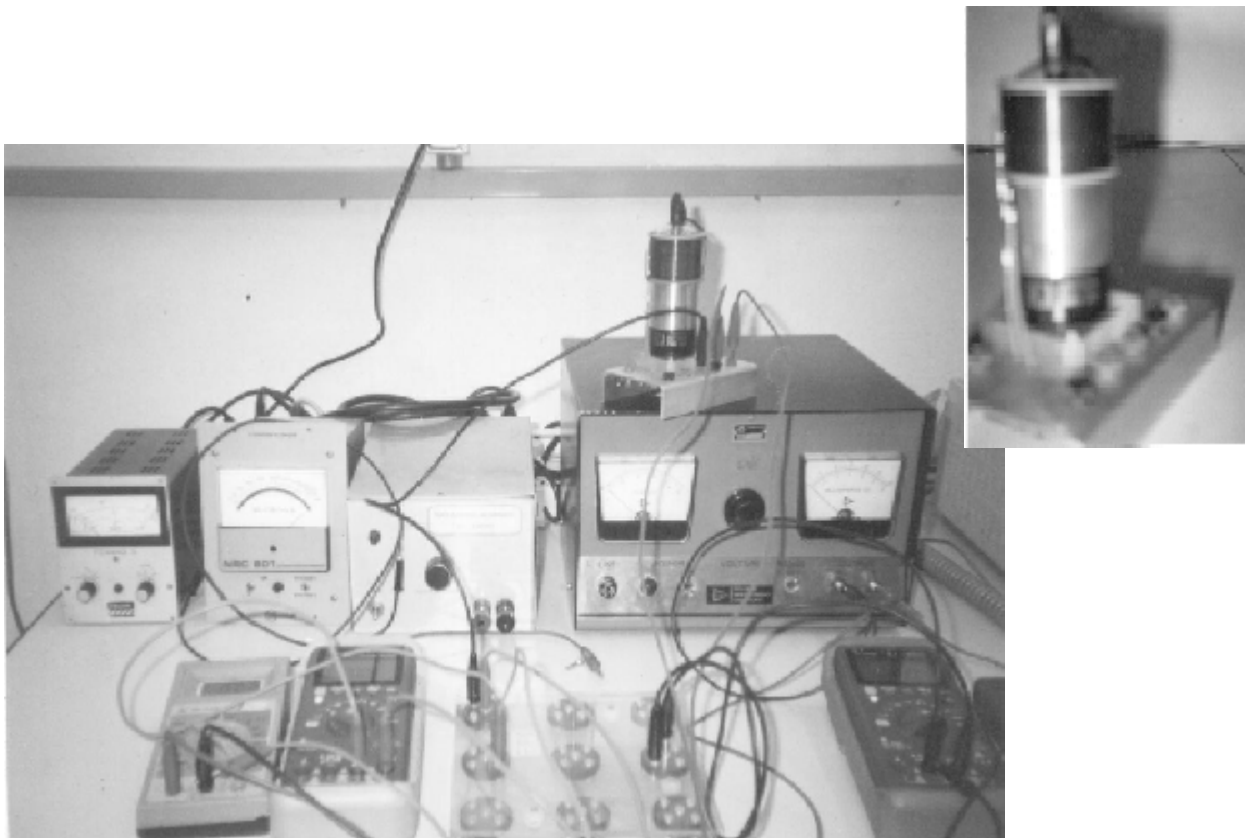


Figura 03: Montagem experimental da válvula diodo no laboratório da Unicamp. No detalhe a válvula da RCA.

Para obter a corrente versus tensão no coletor para diferentes voltagens do filamento, fixamos a voltagem do filamento (fonte de 0 –10Vdc) e variamos a tensão na fonte de 500Vdc e então medimos a tensão no voltímetro que estava conectado nas extremidades de um resistor de $1M\Omega$ e assim obtivemos a corrente do coletor em μA evidenciando o efeito Termoiônico. Repetimos o procedimento para diferentes voltagens na fonte de 10Vdc e obtivemos o gráfico da figura 04. O circuito da solenóide ficou desligado. (figura 02)

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A válvula da RCA tem as seguintes especificações:

Modelo: RCA Radiotron Electron Tube 60EX0
Comprimento do Filamento:.....4,0 cm
Diâmetro do filamento:.....0,013cm
Diâmetro do coletor:.....1,9 cm
Resistência de diâmetro comum:
Máxima tensão do filamento:.....3,0 Vdc
Máxima corrente do filamento:
Máxima tensão do anodo:.....1500 Vdc
Máxima corrente do anodo:
Máxima dissipação do ânodo:

A solenóide tem 90 espiras e 3,2cm

$$n = 90 \text{ espiras} / 3,2 \cdot 10^{-2} = 2812,5 \text{ espiras/m}$$

Se analisarmos o gráfico (figura 04) da corrente do coletor versus a tensão do coletor, verificaremos que os valores são lineares e próximos para cada voltagem no filamento (a legenda do gráfico indica a tensão aplicada no filamento). Esta aproximação pode ser explicada pelo fato de que o coletor é um cilindro e todos elétrons que são emitidos pelo filamento, são coletados no coletor e que o filamento emite uma quantidade quase que igual de elétrons para as diferentes voltagens aplicadas no filamento. Se observamos o gráfico teórico (obtido do livro [1] das referências bibliográficas) da figura 09 (em anexo), veremos que nosso gráfico tem semelhança para a região até 10 mA e 10 V do gráfico teórico. Apesar das válvulas diodo (da RCA e da teoria) serem diferentes, podemos concluir que a tensão aplicada no coletor da válvula da RCA não foi suficiente para que a corrente do coletor tendesse a um valor constante, a chamada corrente de saturação. Para isto teríamos que aumentar a voltagem do filamento bem acima de 200Vdc, o que estaria fora das especificações da válvula.

Lei de Child

Como foi dito anteriormente, temos que levar em consideração, para cálculo da densidade de corrente no coletor, a dinâmica entre a emissão e a absorção dos elétrons, assim como a geometria do coletor e filamento. A partir

da equação 4, fizemos uma regressão linear (figura 04) dos valores da tensão de 0,5 Vdc para o filamento e chegamos num coeficiente angular de $1,1037 \pm 0,00604$. Sabendo que o valor teórico é $1,49 \pm 0,02$, podemos explicar esta diferença pelo fato de que caracterizamos somente o início do espectro da válvula RCA, por causa de suas próprias limitações de construção. Talvez se pudessemos aplicar maior potencial, a inclinação da reta aumentaria e chegaríamos próximo ao valor teórico

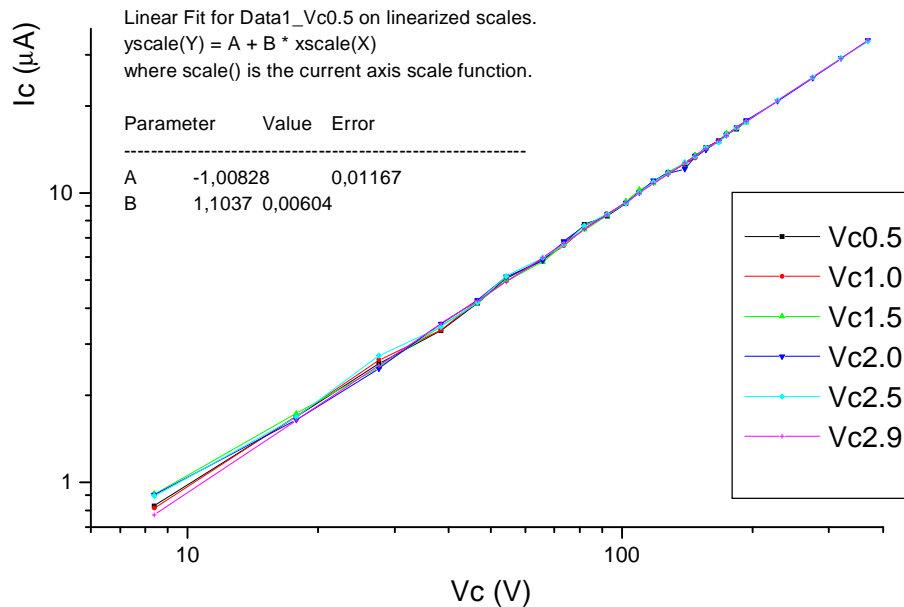


Figura 04: Gráfico da corrente versus tensão no coletor para diferentes tensões do filamento em escala logarítmica.

Para obtenção da razão e/m alimentamos o circuito da solenóide conforme a figura 02. Fixamos as tensões de 2,5011 Vdc no filamento, 21,8 Vdc no coletor e variamos uma corrente de 0,5 a 4,0 A no solenóide. Verificamos que a medida que aumentávamos a corrente no solenóide e conseqüentemente o campo magnético, a corrente no coletor diminuía. Tal acontecimento estava de acordo com a teoria e assim pudemos verificar a ação do campo magnético nos elétrons que eram emitidos do filamento e coletados no coletor. Com os dados de corrente do coletor versus campo magnético aplicado, plotamos o gráfico mostrado na figura 05.

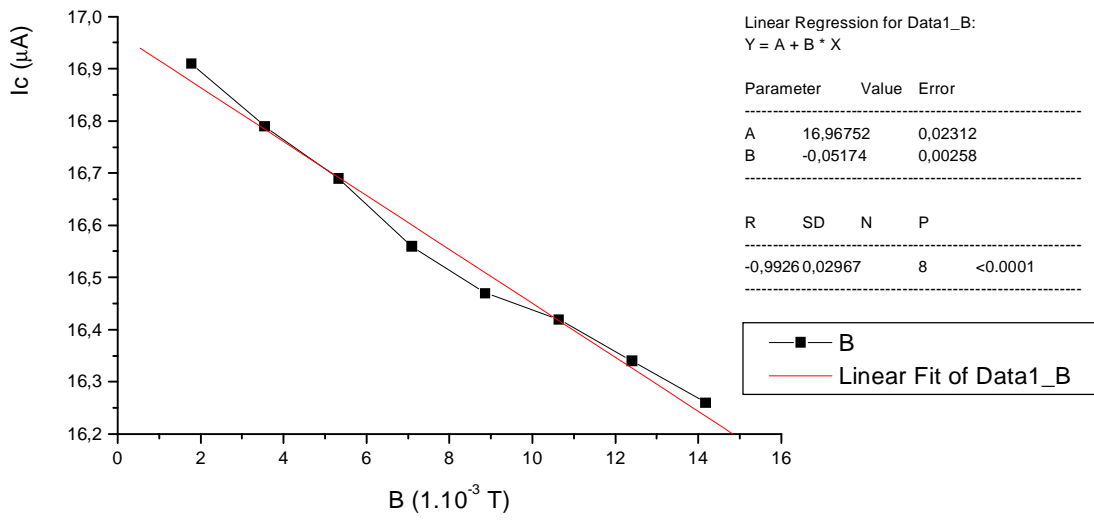


Figura 05: Gráfico da corrente do coletor versus o campo magnético do solenóide.

Analisando o gráfico (figura 05), notamos que a medida que o campo magnético aumenta a corrente do coletor diminuí. Era interessante que a corrente fosse próximo de zero, entretanto conseguimos diminuir a corrente até 16,26 μA , porque o solenóide que usamos tinha poucas espiras (campo magnético insuficiente). Para obter o valor do campo magnético em função da corrente do coletor bem próxima de zero, achamos o coeficiente angular e linear da reta do gráfico. Usando a equação da reta, encontramos um campo magnético de 327,9 mT para corrente no coletor igual a zero.

Pela equação 07, encontramos o valor de $e/m = 1,797 \cdot 10^7 \text{ V} / \text{T}^2 \cdot \text{m}^2$. O valor teórico de $e/m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ coulomb} / \text{Kg}$. Se calcularmos a partir da equação 07 o campo magnético necessário para obter um valor de e/m teórico para está válvula da RCA, encontraremos $B_0 = 348,7 \text{ mT}$, usando o potencial $V_0 = 21,8 \text{ Vdc}$ semelhante ao usado no experimento. Como nosso valor do campo foi estimado, não podemos afirmar que o valor de e/m está correto, mesmo porque a corrente x campo magnético não decresce linearmente até zero. Em experiências para obtenção de e/m geralmente são usadas bobinas de Helmholtz, as quais produzem um campo magnético altamente uniforme e mensurável perpendicularmente a direção do feixe de elétrons emitidos do filamento.

ORIGINALIDADE

No Instituto de Física de São Carlos, USP realizou-se uma experiência tratando do efeito Termo-iônico (O Efeito Termo-iônico: Uma Nova Proposta Experimental –E.F. de Lima, M. Foschini e M. Magini - Instituto de Física de São Carlos, USP). Nesta experiência utilizou-se uma lâmpada de carro comum, ou seja, uma lâmpada de duplo

filamento usada em geral como lanterna e luz de freio na parte traseira do carro. Em nosso projeto a válvula diodo utilizada é diferente da lâmpada de carro. O filamento e o coletor (cilíndrico) têm geometria específicas para que ocorra o mínimo de desvio na corrente coletada.

COLCLUSÃO

Não foi possível verificar a corrente termoiônica em função da temperatura, predita pela equação de Richardson, porque a válvula que estávamos construindo apresentou problemas e a construção física da válvula da RCA não permitia obter os valores de temperatura do filamento com o pirômetro óptico.

A oxidação do filamento da válvula construída pode ter sido ocasionado pelo baixo vácuo no seu interior, uma vez que foi evacuada com bomba mecânica ou por vazamento nos locais onde foi fundido o vidro com eletrodos.

As medidas obtidas com a válvula RCA serviram para estudar o efeito Termoiônico e obter um valor para e/m . A válvula que estamos construindo será usada nas disciplinas de Física moderna. A capacidade da válvula será maior que a do experimento (RCA), podendo assim colocar mais tensão no filamento e coletor. Poderá obter também os valores de temperatura, através de um furo no coletor que dá acesso ao filamento, para medir com o pirômetro óptico.

IMPORTÂNCIA DIDÁTICA

O efeito termoiônico desempenha um importante papel no desenvolvimento da ciência e da compreensão das propriedades da matéria. Com este projeto, tratamos de temas corriqueiros nos cursos de física, como a emissão termoiônica, função trabalho e retificação, que podem ser abordados em disciplinas da Física Moderna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. C. Melissimos: Experiments in Modern Physics, Academic Press INC. Florida, USA.

[2] R. Eisberg e R. Resnick: Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas, reimpressão, Editora Campus LTDA., RJ, Brasil.

[3] Preston, D.: The Art Of Experimental Physics

Site de busca: www.google.com.br

O Efeito Termoiônico: Uma Nova Proposta Experimental –E.F. de Lima, M. Foschini e M. Magini –Instituto de Física de São Carlos, USP.

ANEXOS

Esquema de montagem e fotos da construção parcial da válvula diodo.

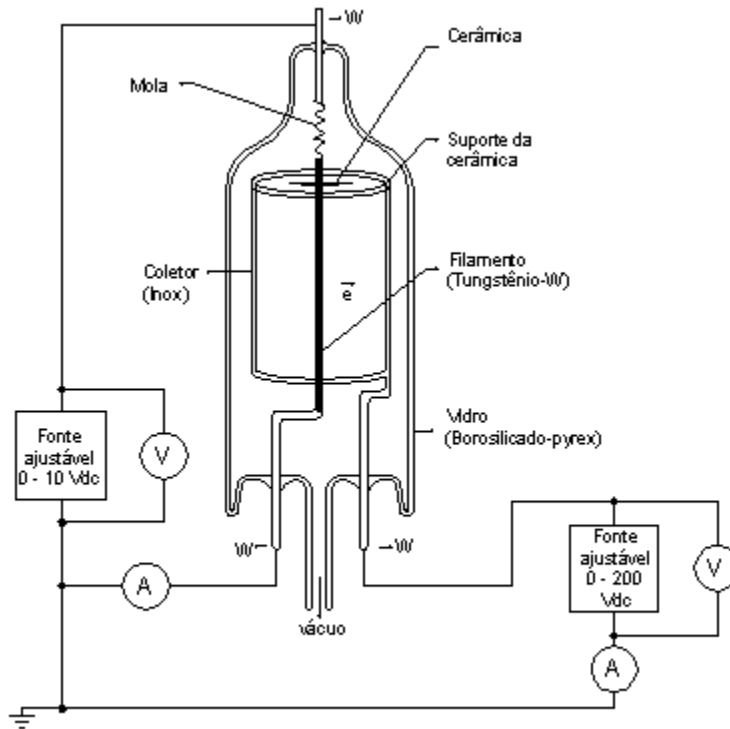


Figura 06: Esquema de montagem de uma válvula diodo para estudo do Efeito Termoiônico. O amperímetro conectado próximo a fonte de 200Vdc mede corrente da ordem de micro amperes.

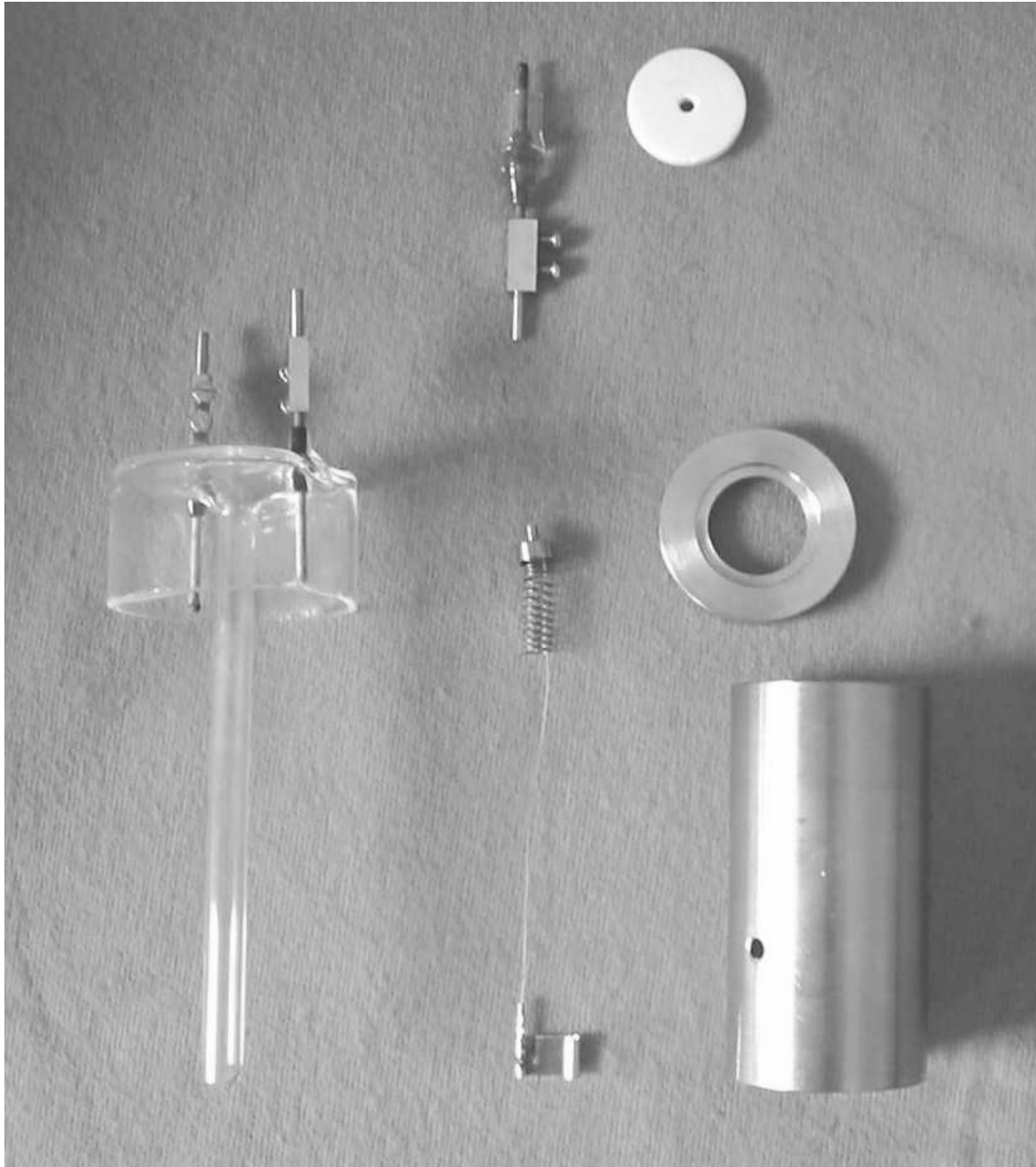


Figura 07: Peças construídas para montagem da válvula diodo.



Figura 08: Montagem parcial da válvula diodo.

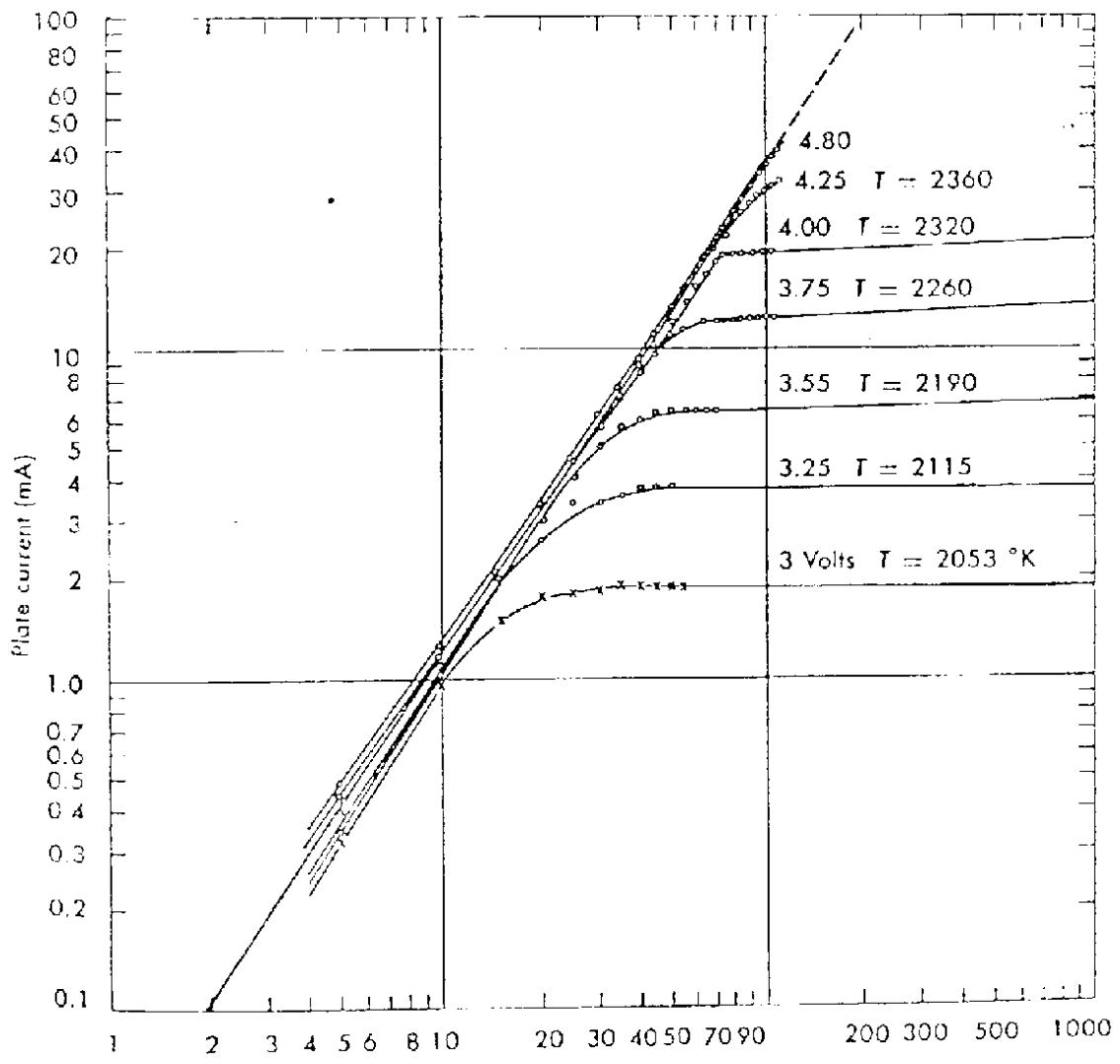


Figura 09: Gráfico teórico da corrente do coletor versus a tensão do coletor em escala logarítmica.