

Seleção de comprimento de onda com filtros de interferência



Fig 1: P2510402 - Montagem do experimento

O que você pode aprender...

- Energia do fóton
- Absorção de fóton
- Efeito fotoelétrico externo
- Função trabalho
- Focélula
- Filtro de interferência
- Teoria quântica
- Constante de Planck

O que você vai necessitar:		
Focélula com encapsulamento	06779-00	1
Filtros de interferências, conjunto de 3	08461-00	1
Filtros de interferências, conjunto de 2	08463-00	1
Lâmpada para experimento 5	11601-00	1
Fonte de alimentação: 0 a 12 VCC/ 6 VCC e 12 VCA	13505-93	1
Amplificador de medição universal	13626-93	1
Multímetro 3 1/2 dígitos	07122-00	2
Resistor variável, 100 Ohm, 1,8 A	06114-02	1
Cabo de conexão, plugue de 4 mm, 32 A, vermelho, 50 cm	07361-01	4
Cabo de conexão, plugue de 4 mm, 32 A, azul, 50 cm	07361-04	3
Cabo de conexão, plugue de 4 mm, 32 A, amarelo, 50 cm	07361-02	1
Cabo de conexão, plugue de 4 mm, 32 A, preto, 50 cm	07361-05	2
Cabo de conexão, plugue de 4 mm, 32 A, azul, 100 cm	07363-04	1
Laboratório de Experimentos TESS expert em CD-ROM	16502-42	1

Princípio:

O efeito fotoelétrico é um experimento chave para o desenvolvimento da física moderna. A luz branca de uma lâmpada de filamento passa através de um filtro de interferência e incide sobre uma fotocélula. A energia máxima dos elétrons ejetados depende somente da frequência da luz incidente e é independente da sua intensidade. Esta lei parece estar em contradição com a teoria das ondas eletromagnéticas da luz, porém ela se torna compreensível no âmbito da teoria corpuscular da luz. A tensão de corte U_0 a diferentes frequências da luz é determinada pelas características de I/U da fotocélula e plotada versus a frequência f da luz correspondente. O quantum de ação de Planck é determinado a partir deste gráfico.

Tarefas

1. Determinar experimentalmente a tensão de corte U_0 para diferentes frequências e intensidades de luz e plotá-la versus a frequência f da luz.
2. Calcular a constante de Planck a partir da tensão de corte U_0 e da frequência f da luz correspondente.



Montagem e Procedimento

A montagem experimental para a demonstração do efeito de fotoelétrico é constituída de: uma célula fotoelétrica, o catodo, que é irradiado por um feixe de luz de freqüência f ; um potenciômetro para aplicar uma tensão U à célula (positiva ou negativa em relação ao catodo), um voltímetro para medir esta tensão; um microamperímetro para medir a corrente fotoelétrica.

- A montagem experimental está ilustrada na Fig. 1.
- Efetue as conexões elétricas conforme ilustração da Fig. 2
- Ajuste o amplificador de medição para o modo de low drift (baixo desvio), amplificação de 104 e constante de tempo de 0.3s.
- Confira o ajuste de zero do amplificador universal - sem nenhuma conexão à entrada, com o controle de zero ajuste a tensão de saída do amplificador para zero
- Ajuste a tensão da fonte de alimentação para 3 V e corrente de 1 A.
- Coloque a fotocélula diretamente em frente à lâmpada, use a abertura redonda do slider
- Os filtros de interferência devem ser colocados em seqüência um após o outro na entrada de luz da fotocélula
- Observe a saída do amplificador. Ela deve ser proporcional à corrente provocada pela luz em função da tensão de polarização da fotocélula
- Meça a tensão de polarização para corrente zero em diferentes freqüências

Observações quanto à operação:

A resistência de entrada do amplificador de medição é de 10000 Ohms. Se o amplificador for ajustado para uma amplificação de 104, então 1 volt à saída do amplificador corresponderá a 0.0001 V à entrada, para uma corrente de 10 nA.

A constante de tempo é ajustada para evitar erros devido à influência de zumbido.

Teoria e avaliação

O efeito fotoelétrico externo foi descrito pela primeira vez em 1886 por Heinrich Hertz. Logo, ficou claro que esse efeito apresentava certas características que não podiam ser explicadas pela teoria clássica das ondas de luz. Por exemplo, quando a intensidade da luz incidindo sobre um metal ficava mais intensa, a teoria clássica da onda esperaria que os elétrons liberados do metal absorvessem mais energia. Porém, os experimentos mostraram que a máxima energia possível dos elétrons ejetados somente dependia da freqüência da luz incidente e não da sua intensidade.

A explicação teórica foi dada por Einstein em 1905. Ele sugeriu que a luz poderia ser considerada, de certa forma, se comportando como partículas movendo-se com uma velocidade constante (à velocidade da luz no vácuo) e possuindo energia $E = hf$. A explicação de Einstein sobre o efeito fotoelétrico, demonstrando o comportamento da partícula como luz, contribuiu para o desenvolvimento da teoria quântica. Assim, o efeito fotoelétrico externo é um dos experimentos chaves para o desenvolvimento da física moderna e Einstein obteve o Prêmio de Nobel de Física "pela sua descoberta da lei do efeito fotoelétrico".

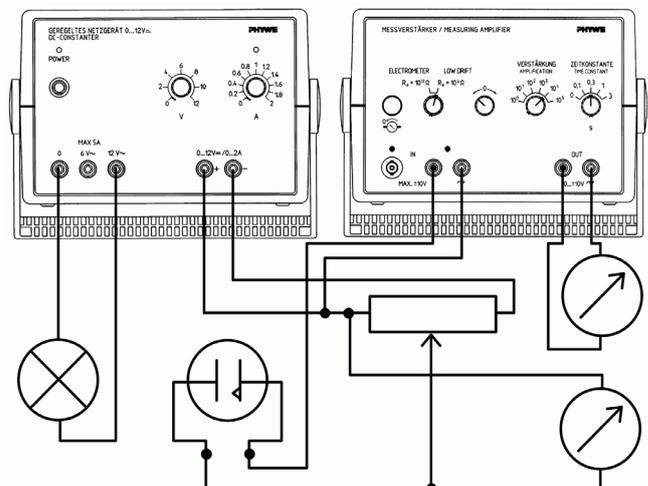


Fig. 2: Conexões elétricas para o experimento

Tarefa 1: Determinar experimentalmente a tensão de corte U_0 para diferentes frequências e intensidades de luz e plotá-la versus a frequência f da luz.

Dentro da fotocélula, um catodo, com camada especial de baixa função trabalho, é colocado junto a um anodo metálico no interior de um tubo a vácuo. Se um fóton de frequência f se choca contra o catodo, então um elétron pode ser liberado do material do catodo (efeito fotoelétrico externo) se o fóton tiver energia suficiente.

Se os elétrons emitidos alcançarem o anodo, eles serão absorvidos pelo anodo devido à função trabalho deste e o resultado será uma corrente fotoelétrica.

O efeito fotoelétrico é uma interação entre um fóton e um elétron. Nesta reação, momento e energia são conservados, o elétron absorve o fóton e adquire, após a reação, toda a energia $h f$ do fóton. Se a energia $h f$ do fóton for maior que o trabalho de extração W_C (função trabalho do catodo), o elétron pode, depois da reação, deixar a substância com uma energia cinética máxima $W_{kin} = h f - W_C$. Este efeito é chamado efeito fotoelétrico externo e é descrito por:

$$h f = W_C + W_{kin} \text{ (Equação de Einstein) (1)}$$

A energia cinética W_{kin} para os elétrons emitidos é determinada utilizando-se o método do campo elétrico de corte: Uma polarização negativa é aplicada ao anodo da célula fotoelétrica em relação ao catodo. Isto desacelera os elétrons diminuindo assim a intensidade da corrente fotoelétrica I , pois nem todos os elétrons têm energia máxima, porém eles têm uma distribuição de energia. O valor da polarização onde nenhum elétron alcança o anodo I se torna zero é denominado tensão de corte e indicado como U_0 .

Plotando-se I versus a tensão de polarização aplicada U_{bias} revela-se que a tensão U_0 é dependente do comprimento de onda de luz λ incidente e não da intensidade da luz, veja Fig. 3. A intensidade da luz determina a intensidade da corrente fotoelétrica.

λ/nm	U_0/V	$f/10^{12} \text{ Hz}$
366	-1,50	820
405	-1,20	741
436	-1,00	688
546	-0,50	550
578	-0,40	520

Tabela 1: Resultados

Tarefa 2: Calcular a constante de Planck a partir da tensão de corte U_0 e da frequência f da luz correspondente.

Os elétrons somente podem alcançar o anodo se a sua energia cinética W_{kin} for maior que a energia que eles perdem ao correr contra o campo elétrico gerado pela tensão de polarização U_{bias} associado ao campo elétrico desconhecido devido à tensão de contato U_{AC} entre o anodo e catodo que tem a mesma direção da tensão de polarização, veja Fig. 3.

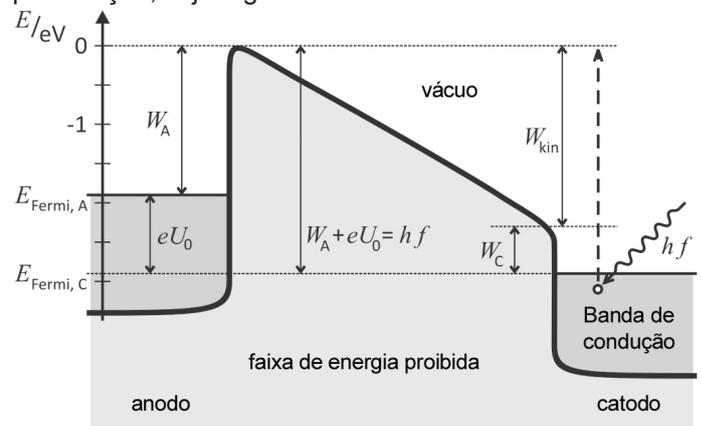


Fig. 3: Diagrama de energia para os elétrons em um fotocélula iluminada com $\lambda = 436 \text{ nm}/f = 688 \text{ THz}$ e polarização de $U_0 = 1 \text{ V}$

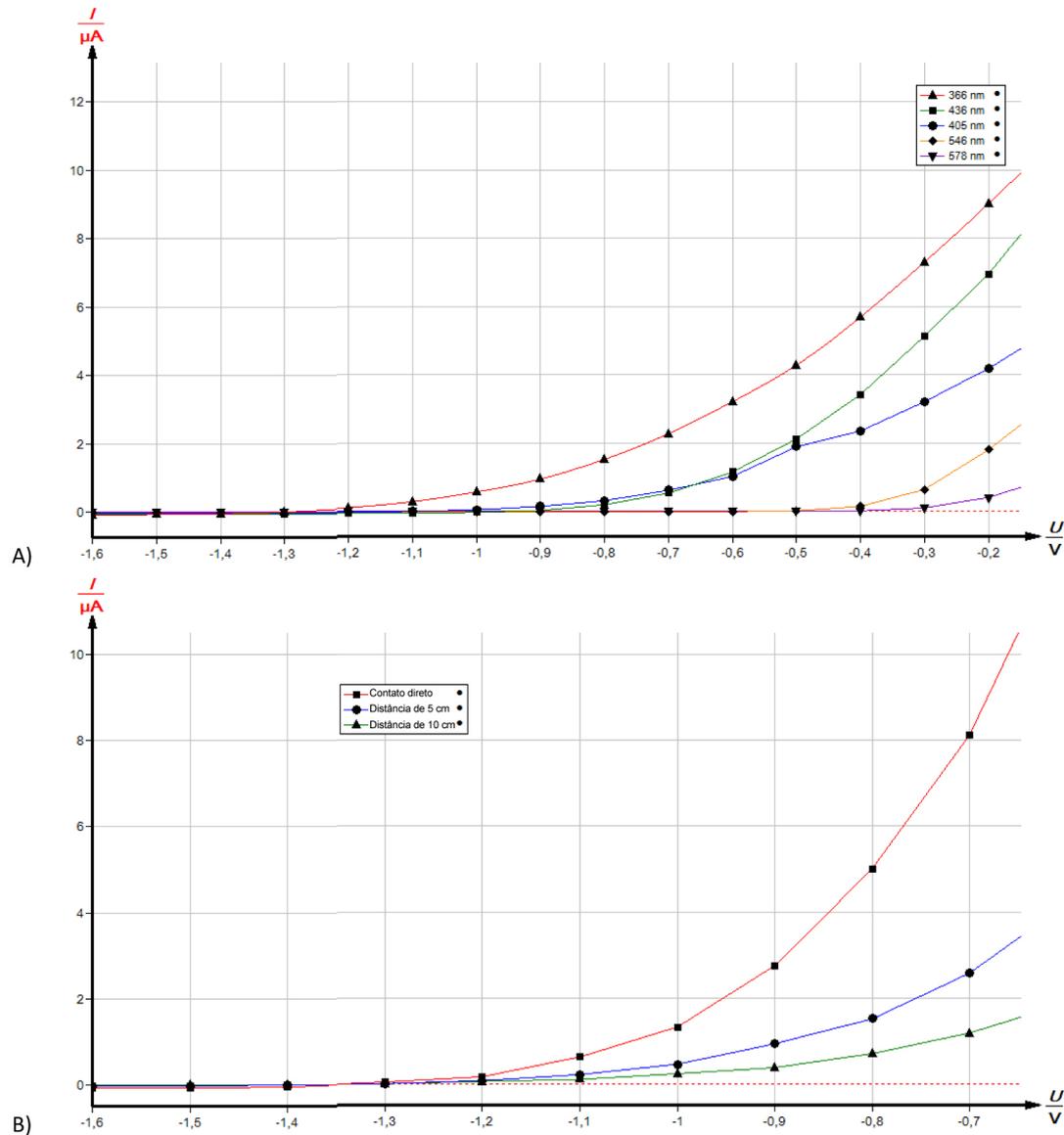


Fig. 3: Intensidade da corrente fotoelétrica I em função da tensão de polarização: A) a diferentes frequências da luz irradiada, B) a intensidades diferentes (comprimento de onda constante: 436 nm).

Nos não podemos esquecer que a tensão de contato é da mesma ordem de magnitude da tensão de polarização. Portanto, não é possível determinar a energia cinética absoluta dos elétrons. Não obstante, a constante de Planck pode ser calculada a partir da tensão de corte da frequência da luz, devido às seguintes considerações:

Na tensão de corte U_0 a energia cinética W_{kin} do elétron iguala a energia perdida no campo elétrico eU (U incluindo a tensão de corte U_0 e a tensão de contato U_{AC}):

$$e(U_0 + U_{AC}) = W_{kin} \quad (2)$$

A tensão de contato é calculada a partir dos potenciais eletroquímicos de anodo U_A e do catodo U_C e a multiplicação dos dois pela carga do elétron $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$. Como nos dá as funções trabalho correspondentes, as equações W_A e W_C (2) são equivalentes a:

$$eU_0 + W_A - W_C = W_{kin} \quad (3)$$

Para calcular a constante de Planck h usando o efeito fotoelétrico, nós comparamos (2) com a equação (1) de Einstein

$$W_{\text{kin}} = eU_0 + W_A - W_C = hf - W_C \quad (3)$$

Adequadamente, a função trabalho do catodo não aparece na fórmula para a tensão de corte e (3) pode ser escrita como a função linear a seguir

$$\begin{aligned} eU_0 &= hf - W_A && \text{ou} \\ U_0 &= \frac{h}{e} f - U_A && (4) \end{aligned}$$

Como U_A é uma constante, existe uma relação linear entre a tensão de corte U_0 e a frequência f da luz. O declive da função linear nos dá a constante de Planck h . A frequência f da luz pode ser calculada a partir do comprimento de onda λ dos filtros de interferências por $f = c / \lambda$ com a velocidade da luz $c = 299\,792\,458$ m/s.

O declive medido é:

$$0,00366 \frac{\text{V}}{10^{12} \frac{1}{\text{s}}}$$

Multiplicando por e temos: $h = 5,59 \cdot 10^{-34}$ Js

O valor calculado pode divergir em $\pm 20\%$ do **valor da literatura** de referência: $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js.

Notas

A função trabalho do catodo não aparece na fórmula para a tensão de corte. Isto é devido ao fato de que os elétrons vindos do nível de Fermi no catodo têm que alcançar a superfície do anodo e, dessa forma, serem capaz de passar a superfície de catodo.

A função trabalho do catodo determina se a energia do fóton é suficiente para liberar um elétron do catodo. Historicamente, este comprimento de onda de limiar de foto-efeito foi importante para a descoberta deste efeito e somente mais tarde foi compreendido quando o espectro de energia do elétron, dos elétrons liberados, foi examinado sistematicamente em dependência à frequência e à intensidade da luz.

Ao determinarmos a tensão de corte U_0 encontraremos curvas com somente um pequeno declive no cruzamento do eixo x (zero ponto). Portanto, é complicada uma determinação exata da tensão de corte.

Há uma corrente negativa para tensões de polarização mais altas. Esta corrente é devida à corrente fotoelétrica do anodo para catodo. Ela também pode ser liberada pelos elétrons do anodo. O número de elétrons também depende da frequência da luz e de uma maneira diferente daquela vista para o catodo. Pode-se assumir que a intensidade e a sensibilidade de comprimento de onda do elétron da corrente fotoelétrica reversa do anodo para o catodo é diferente da alta corrente do catodo para o anodo. Assim, o deslocamento do ponto zero pela intensidade da luz devido a este efeito é diferente para comprimentos de onda diferentes fazendo do ponto zero U/I da curva característica da fotocélula uma medida não muito confiável.

A corrente reversa global pode ser considerada pequena devido à função trabalho muito mais baixa do catodo comparada ao do anodo. Isto justifica desprezarmos este efeito.

Ainda, o deslocamento do ponto zero em dependência da intensidade teria que ser medido para cada comprimento de onda e teríamos que considerar um modo de tentar alcançar uma normalização com respeito à intensidade.

Como os efeitos da distribuição de energia do elétron também estão presentes, o ganho em precisão obtido por este procedimento não será tão grande como os geralmente recomendados. As duas funções trabalho para os elétrons deixar a substância e a energia do elétron antes da reação com o fóton não terão nenhum extremo significativo, de forma que a precisão global atingível por este método é limitada.

Para uma medição mais precisa da constante de Planck são mais adequadas as medições por Raio-X, porém o experimento do efeito fotoelétrico tem sua justificativa por sua grande relevância histórica.



Fig. 3: Tensão de corte U_0 em função da frequência da luz irradiada.