Electricidad

Tubos de rayos de electrones

Tubo de Thomson

ESTUDIO DE LA DESVIACIÓN DE ELECTRONES EN CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS

- Estudio de la desviación de un rayo de electrones en un campo magnético
- Estudio de la desviación de un rayo de electrones en un campo eléctrico
- Montaje de un filtro de velocidades compuesto de un campo eléctrico y uno magnético cruzados
- Estimación de la carga específica del electrón.

UE3070500

04/24 UK/UD

FUNDAMENTOS GENERALES

En el tubo de Thomson pasan electrones horizontalmente a través de un diafragma de ranura que se encuentra detrás del ánodo e inciden sobre una pantalla fluorescente inclinada que se encuentra en la trayectoria de los electrones para poder ser observados. Detrás del diafragma de ranura se encuentra colocado un condensador de placas paralelas en cuyo campo eléctrico vertical se desvían los electrones. Además con un par de bobinas de Helmholtz es posible crear un campo magnético horizontal perpendicular a la dirección de la trayectoria de los electrones para producir también una desviación en la dirección vertical:

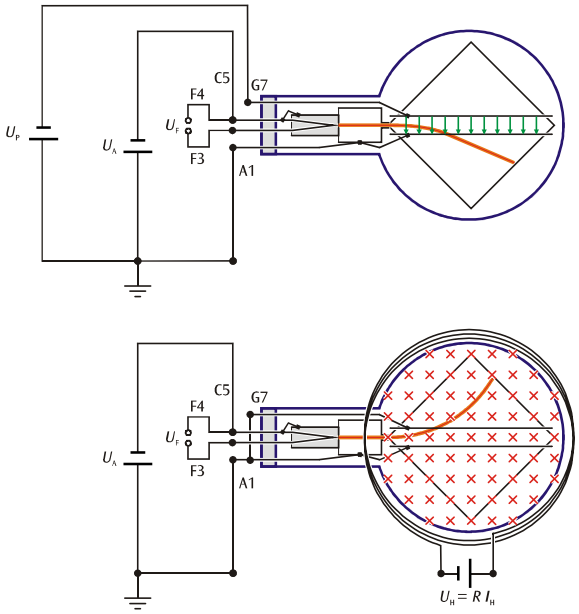

Fig. 1: Representación esquemática del tubo de Thomson. Desviación en el campo eléctrico (arriba), en el campo magnético (abajo)

Sobre un electrón que se mueve con velocidad $\boldsymbol{v}$ en un campo magnético $\boldsymbol{B}$ actúa la fuerza de Lorentz perpendicularmente a la dirección de movimiento y al campo magnético:

$$\boldsymbol{F} = -e \cdot \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \qquad (1)$$

e: carga elemental

La desviación tiene lugar en dirección vertical cuando tanto la dirección de movimiento y la del campo se encuentra en la horizontal (ver Fig. 1 abajo). Si la dirección de movimiento es perpendicular al campo magnético homogéneo, los electrones son llevados a una trayectoria circular, cuya fuerza centrípeta es dada por la fuerza de Lorentz.

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \qquad (2)$$

m: Masa del electrón, r: Radio de la trayectoria circular

La velocidad de los electrones depende de la tensión del ánodo U_A. Se tiene:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \qquad (3)$$

Por lo tanto, la carga específica del electrón se puede determinar a partir del radio de la trayectoria circular, cuando se conocen la tensión del ánodo U_A y el campo magnético homogéneo B. Partiendo de (2) y (3) se obtiene la carga específica del electrón:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2} \qquad (4)$$

El radio de curvatura r se puede determinar tomando como base punto de salida del rayo de electrones sobre la pantalla. El campo magnético B del par de bobinas de Helmholtz se obtiene de la corriente de las bobinas I_H (ver “Evaluación“).

Si en el condensador de placas paralelas se tiene una tensión de U_P, los electrones serán desviados verticalmente en el campo eléctrico vertical $\boldsymbol{E}$ con la fuerza (ver Fig. 1, arriba)

$$\boldsymbol{F} = -e \cdot \boldsymbol{E} \qquad (5)$$

e: Carga elemental

Por lo tanto el campo eléctrico se puede elegir de tal forma que se compense la desviación en el campo magnético:

$$e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0 \qquad (6)$$

En este caso se puede determinar fácilmente la velocidad de los electrones. Se tiene:

$$v = \left| \frac{E}{B} \right| \qquad (7)$$

Una ordenación de campos eléctrico y magnético cruzados en la cual las desviaciones de los electrones se compensen se denomina "Filtro de velocidades".

La dependencia de la velocidad *v* con la tensión de aceleración U_A se obtiene al hacer la comparación de la energía cinética y la energía potencia. Se tiene:

$$e \cdot U_A = \frac{m}{2} v^2 \text{ resp. } v^2 = 2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A \qquad (8)$$

LISTA DE APARATOS

1	Tubo de Thomson S	1000617 (U18555)
1	Soporte de tubos S	1014525 (U185002)
1	Par de bobinas de Helmholtz S	1000611 (U185051)
1	Fuente de alta tensión, 5 kV (@230 V)	1003310 (U33010-230)
o		
1	Fuente de alta tensión, 5 kV (@115 V)	1003309 (U33010-115)
1	Fuente de alimentación CC, 0-500 V (@230 V)	1003308 (U33000-230)
o		
1	Fuente de alimentación CC, 0-500 V (@115 V)	1003307 (U33000-115)
1	Multímetro digital P1035	1002781 (U11806)
1	Juego de 15 cables de experimentación de seguridad, 75 cm	1002843 (U138021)

ADVERTENCIAS DE SEGURIDAD

Tubos de rayos catódicos son tubos de vidrio evacuados de pared delgada: Manéjelos con sumo cuidado: ¡Peligro de implosión!

- No someta el tubo de Thomson a ningún esfuerzo mecánico.

En el tubo de Thomson se pueden encontrar posiblemente tensiones peligrosas al contacto directo.

- Para las conexiones utilice cables de experimentación de seguridad.
- Las conexiones se realizan sólo con la fuente de alimentación de tensión desconectada.
- El tubo de Thomson se monta y desmonta sólo con la fuente de alimentación desconectada.

MONTAJE

Montaje del par de bobinas de Helmholtz y del tubo de Thomson en el soporte del tubo:

- Se colocan ambas bobinas de Helmholtz – con los casquillos de conexión orientados hacia fuera – en el centro de la unidad de enchufe y se desplazan totalmente hacia fuera.
- Se inserta el tubo de Thomson en el soporte para tubo teniendo en cuenta que las espigas de contacto del tubo encajen totalmente en los orificios previstos para ello. La espiga guía del tubo debe salir un poco del soporte.
- Se deslizan ambas bobinas de Helmholtz hacia dentro hasta la marca. La distancia media entre las bobinas de Helmholtz es de 68 mm.

Conexión de las tensiones de caldeo y de aceleración:

- Se deja desconectada la fuente alimentación de alta tensión y el plato de tensión se gira hasta el extremo izquierdo.
- Se conectan los casquillos F3 y F4 del soporte de tubo con la salida de alta tensión (casquillos azules) de la fuente de alimentación de alta tensión, utilizando cables de experimentación de seguridad (ver Fig. 1)
- Se conecta el casquillo C5 del soporte de tubo con el polo negativo (casquillo negro) de la fuente de alimentación de alta tensión, utilizando cables de experimentación de seguridad (los contactos C5 y F4 están conectados entres sí dentro del tubo).
- Se conecta el casquillo A1 del soporte de tubo con el polo positivo de la salida de alta tensión (casquillo rojo) y el polo positivo con el casquillo amarillo – verde de puesta a tierra.

Conexión de las bobinas de Helmholtz:

- Se deja desconectada la fuente de alimentación de CC y se giran todos los ajustes de tensión hasta el extremo izquierdo.
- Se conecta el casquillo A de la primera bobina con el polo negativo y el casquillo Z con el polo positivo de salida de 12 V.
- La segunda bobina se conecta paralelamente a la primera y a su vez se conectan los casquillos que queden frente a frente.
- Se conecta el amperímetro en serie con las dos bobinas de Helmholtz.

Conexión de la tensión de desviación:

- Se conecta el casquillo G7 del soporte de tubo con el polo negativo de salida de 500 V.
- Se conecta el polo positivo de la fuente de alimentación de CC se conecta con el casquillo amarillo – verde de conexión a tierra de la fuente de alimentación de alta tensión.

Observación: En caso de que la desviación en el campo eléctrico o en el magnético estén en la dirección contraria, se intercambian los correspondientes contactos en las respectivas fuentes.

Fig. 2: Montaje experimental para el estudio de la desviación de electrones en un campo eléctrico y en un campo magnético

REALIZACION

- Se conecta la fuente de alimentación de alta tensión. El filamento se enciende inmediatamente de color rojizo.
- Se ajusta la tensión de aceleración en U_A = 2,0 kV y se observa en la pantalla fluorescente el curso "horizontal" del rayo de electrones.
- Se conecta la fuente de alimenta CC de 0–500 V.
- Se aumenta lentamente la corriente I_H por el par de bobinas de Helmholtz hasta que el rayo de electrones pase por el centro de la escala al borde de la pantalla fluorescente (ver Fig. 3)
- Se ajusta la tensión U_P en las placas de desviación hasta que la desviación del rayo de electrones se haya compensado a cero.
- Se anota la intensidad de corriente I_H y en su caso la tensión U_P
- Se retorna a cero la tensión U_P .
- Se repite la medición con U_A = 3,0 y 4,0 kV .

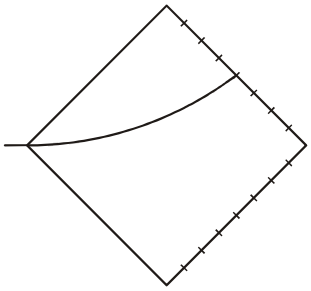

Fig. 3: Desviación del rayo de electrones por el centro de la escala al borde de la pantalla fluorescente

- Se ajusta la tensión de ánodo en U_A = 3 kV.
- Se elige 2 I_H = 0,2 A y se ajusta la tensión de las placas U_P de tal forma que la desviación del rayo de electrones se compense a cero.
- Se anotan la intensidad corriente 2 I_H y la tensión U_P .
- Se repite el proceso para 2 I_H = 0,4 A, 0,6 A y 0,8 A.

EJEMPLO DE MEDIDA

Tabla. 1: (Para una desviación magnética por el centro de la escala en el borde la pantalla) Corriente por el par de bobinas de Helmholtz 2 I_H y tensión de las placas de condensador U_P (para compensar la desviación a cero) en dependencia con la tensión del ánodo U_A.

U_A / kV	2 I_H / A	U_P / V
2,0	0,53	240
3,0	0,62	330
4,0	0,74	470

Tab. 2: Corriente por las bobinas de Helmholtz 2 I_H y la tensión de compensación de placas U_P manteniendo constante la tensión de ánodo U_A = 3,0 kV

No.	2 I_H / A	U_P / V
1	0,2	100
2	0,4	225
3	0,6	360
4	0,8	440

EVALUACIÓN

a) El campo magnético B en un par de bobinas de Helmholtz es proporcional a la intensidad de la corriente I_H por una sola bobina. El factor de proporcionalidad k se puede calcular a partir del radio de la bobina R = 68 mm y el número de espira de cada bobina N = 320:

$$B = k \cdot I_H \text{ mit } k = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R} = 4{,}2\,\frac{\text{mT}}{\text{A}}$$

b) El radio de curvatura r del rayo de electrones desviados se puede determinar a partir del punto de salida B en la Fig. 4.

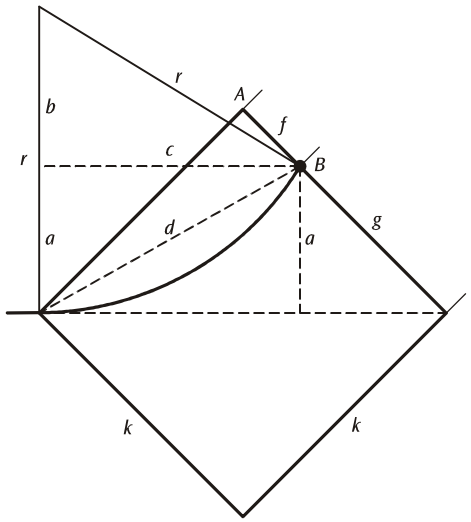

Fig. 4: Representación para el cálculo del radio de curvatura r de la trayectoria de los electrones basándose en la distancia f entre el punto de salida B y el punto de esquina A.

De acuerdo con Pitágoras se tiene:

$$r^2 = c^2 + b^2 = c^2 + (r-a)^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot a + a^2$$

$$c^2 + a^2 = d^2 = k^2 + f^2 \text{ con } k = 80 \text{ mm}$$

$$a^2 = \frac{1}{2} \cdot g^2 = \frac{1}{2} \cdot (k-f)^2$$

Se obtiene: $r = \dfrac{c^2 + a^2}{2a} = \dfrac{k^2 + f^2}{\sqrt{2} \cdot (k-f)}$

Con el punto B en el centro de la escala, f = 40 mm. En este caso se calcula:

r = 141 mm y $\frac{1}{2} \cdot r^2 = 0{,}1\text{m}^2$.

Eq. (4) se puede despejar como: $\dfrac{e}{m} = \dfrac{U_A}{0{,}1\text{m}^2 \cdot B^2}$

c) El campo eléctrico en el condensador de placas se calcula a partir de la tensión U_P y la distancia entre las placas d = 8 mm

$$E = \frac{U_P}{d}$$

d) Para estimar el valor de la carga específica del electrón se calcula el campo magnético B con los valores para la intensidad de corriente I_H indicados en Tab 1 y se obtienen los valores indicados en la Tab. 3.

La Fig. 5 muestra una representación gráfica de la relación entre la tensión del ánodo U_A y el cuadrado del campo magnético B^2 para los valores de la tabla 3.

La pendiente de la recta dibujada que pasa por el origen se calcula por:

$$\frac{U_A}{B^2} = 1{,}7\,\frac{\text{kV}}{\text{mT}^2}$$

A partir de allí se calcula $\dfrac{e}{m} = \dfrac{U_A}{0{,}1\text{m}^2 \cdot B^2} = 1{,}7 \cdot 10^{11}\,\dfrac{\text{As}}{\text{kg}}$

(Valor bibliográfico: $\dfrac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11}\,\dfrac{\text{As}}{\text{kg}}$)

Tab. 3: Valores para B y B^2 determinados en dependencia con la tensión del ánodo U_A. determinados con los valores de la tabla 1 para corriente la I_H

U_A / kV	B / mT	B^2 / mT^2
2,0	1,11	1,24
3,0	1,30	1,70
4,0	1,55	2,41

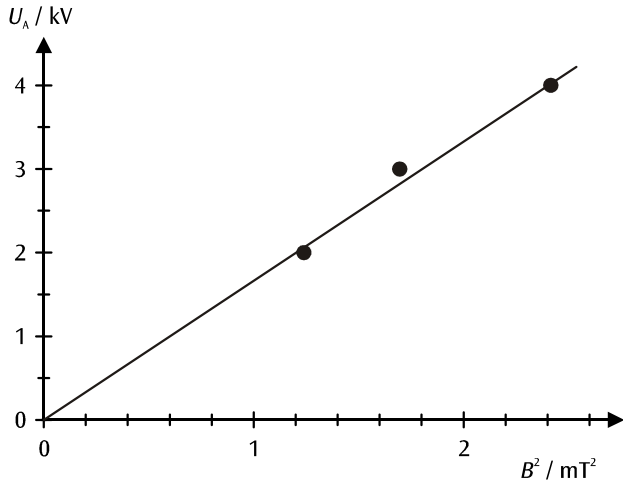

Fig. 5: Representación gráfica de la relación entre U_A y B^2 para un radio de curvatura constante de r = 141 mm

e) Para confirmar la Eq. (7) se calculan a partir de los valores de medida de la Tab. 2 los pares de valores B y E con los cuales la desviación de los electrones se compensa a cero (ver Tab. 4) y se representa el resultado en un diagrama *E – B* (ver Fig. 6)

En concordancia con la Eq. (7) los valores de medida se encuentran sobre una recta que pasa por el origen, dentro de la exactitud de medida. Su pendiente es la velocidad de los electrones.

Se obtiene: $v = 3{,}2 \cdot 10^7 \, \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ (con U_A = 3,0 kV)

Tab. 4: Campo magnético B y campo eléctrico de compensación E con una tensión de ánodo constante de UA = 3,0 kV

No.	*B* / mT	*E* / V/mm
1	0,42	12,5
2	0,84	28,1
3	1,26	41,3
4	1,68	55,0

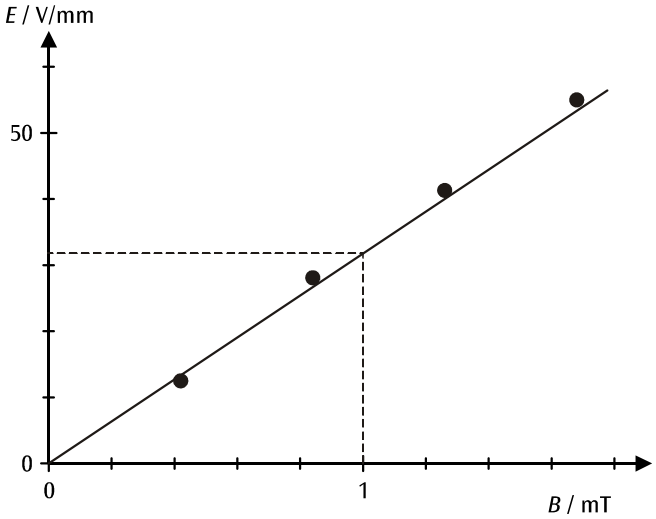

Fig. 6: Representación gráfica de los valores de medida de la Tab.4

f) Por medio de los valores de medida de la Tab. 1 se puede determinar la velocidad de los electrones para diferentes tensiones de ánodo U_A. El resultado se encuentra en la Tab. 5.

Tab. 5: Los valores determinados para B y E determinados a partir de los valores de medida para I_H y U_P de Tab.1, así como la velocidad *v* determinada de ellos y su cuadrado en dependencia con la tensión del ánodo U_A.

U_A / kV	*B* / mT	*E* / V/mm	*v* / m/s	v^2 / (m/s)^2
2,0	1,11	30,0	$2{,}70 \cdot 10^7$	$7{,}3 \cdot 10^{14}$
3,0	1,30	41,3	$3{,}18 \cdot 10^7$	$10{,}1 \cdot 10^{14}$
4,0	1,55	58,8	$3{,}79 \cdot 10^7$	$14{,}4 \cdot 10^{14}$

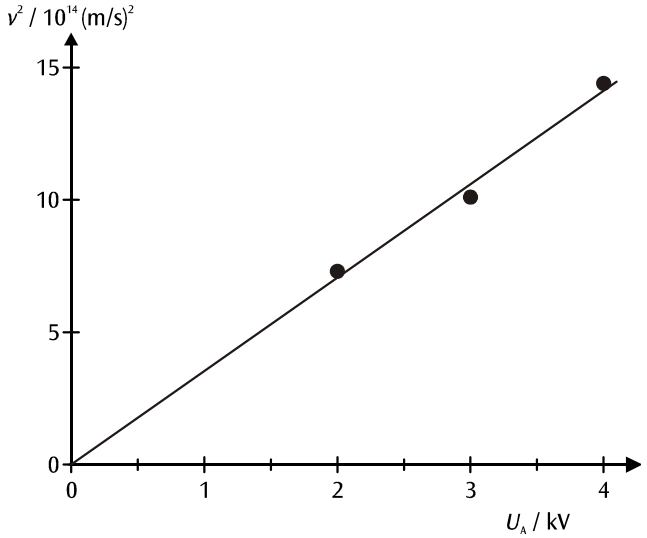

Fig. 7: Representación gráfica de la relación entre v^2 y U_A

La Fig. 7 muestra la relación entre el cuadrado de la velocidad y la tensión del ánodo. A partir de la pendiente de la recta que pasa por el origen dibujada se puede también determinar la carga especifica del electrón aplicando la Eq. (8).

Se obtiene: $\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2 \cdot U_A} = 1{,}8 \cdot 10^{11} \, \frac{\mathrm{As}}{\mathrm{kg}}$

(Valor bibliográfico: $\frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11} \, \frac{\mathrm{As}}{\mathrm{kg}}$)

© Copyright 2024 3B Scientific GmbH