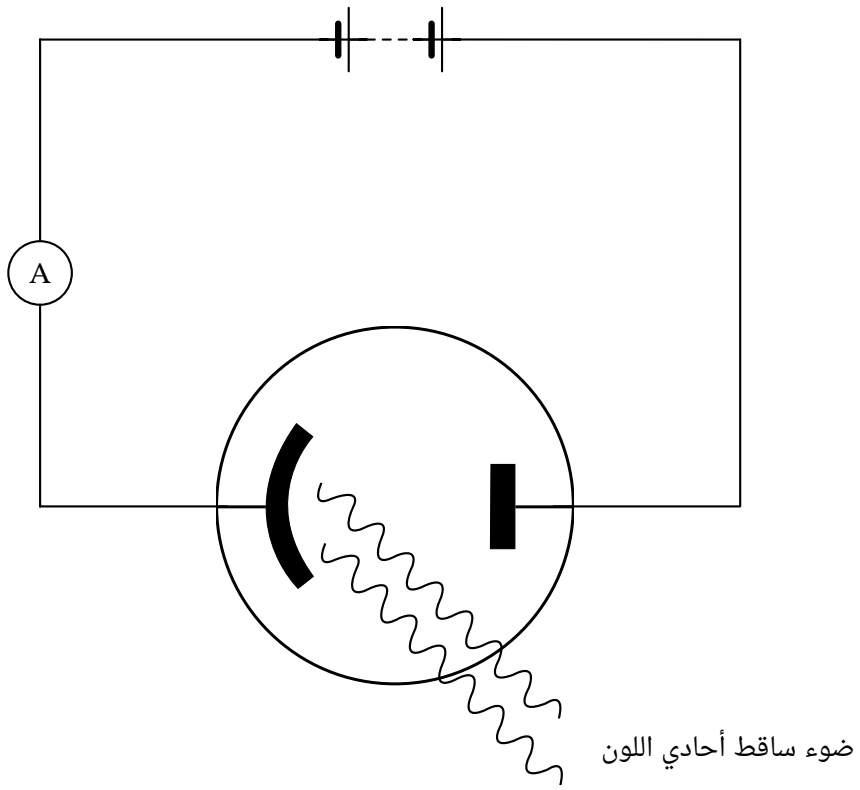
شارح: طاقة حركة الإلكترونات الضوئية

في هذا الشارح، سوف نتعلَّم كيف نحسب أقصى طاقة حركة ممكنة للإلكترونات التي تتحرَّر من سطح فلز بسبب التأثير الكهروضوئي.

التأثير الكهروضوئي هو عملية تحرُّر الإلكترونات من سطح فلز بعد امتصاصه إشعاعًا كهرومغناطيسيًا. يوضِّح الشكل بالأسفل الجهاز التجريبي المُستخدَم لرصد التأثير الكهروضوئي.



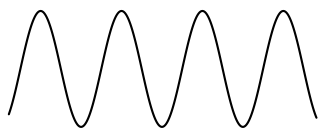
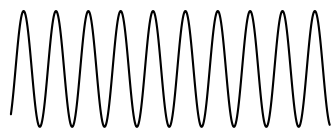
يُوصَّل لوحان فلزيان منفصلان بدائرة كهربية تحتوي على أميتر موصَّل على التوالي. يُوضَع اللوحان الفلزيان في أنبوب زجاجي مفرَّغ من الهواء حتى لا يؤثِّر الهواء على التجربة. يُوجَّه ضوء إلى أحد اللوحين الفلزيين. إذا كانت طاقة الضوء الساقط كافية تتحرَّر الإلكترونات من سطح الفلز. تُعرَف هذه الإلكترونات المتحرِّرة باسم «الإلكترونات الضوئية». يرصد الأميتر تيارًا عندما تصل الإلكترونات الضوئية إلى اللوح المجاور.

تذكَّر أن الضوء له طبيعة جسيمية. تُعرَف جسيمات الضوء بالفوتونات. لكلِّ فوتون كمية منفصلة من الطاقة، ويُرمز لها بـ E، وتصفها المعادلة:

$$E = hf$$

حيث h ثابت بلانك، وf تردُّد الفوتون.

ينقل كل فوتون ساقط الطاقة إلى إلكترون واحد على سطح الفلز. ويغادر الإلكترون السطح إذا كانت طاقة الفوتون كافية. وبما أن طاقة الفوتون يُحدِّدها التردُّد فلا تهمُّ سعة الموجة الضوئية؛ إذ التأثير الكهروضوئي يحدث ما دام تردُّد الضوء كبيرًا بما يكفي. يوضِّح الجدول الآتي العلاقة بين الطاقة والتردُّد، واستقلالية هاتين القيمتين عن السعة:

	تردد أقل وطاقة أقل	تردد أكبر وطاقة أكبر
سعة أقل		
سعة أكبر		

بعد أن ذكرنا أساسيات التأثير الكهروضوئي دعونا نلقِ نظرة عن قرب على انتقال الطاقة بين الفوتونات والإلكترونات.

تذكَّر أن النواة الذرية لها إلكترونات في مستويات طاقة منفصلة. تكون لهذه الإلكترونات طاقات مختلفة عند كل مستوى تبقيها مرتبطة بالنظام الذري، وتُعرَف هذه الطاقة باسم «دالة الشغل». يمكننا اعتبار دالة الشغل، المشار إليها بـ W، الحاجز الذي يُبقِي الإلكترون مُقيَّدًا بالمادة. إذا انتقلت طاقة أكبر من دالة الشغل إلى الإلكترون فإن الحاجز يُكسَر ويتحرَّر الإلكترون من رابطته.

المواد الموصِّلة مثل الفلزات لها دوال شغل منخفضة نسبيًّا. ومن ثَمَّ، يمكن للإلكترونات الموجودة على سطح فلز أن تترك الفلز تمامًا إذا اكتسبت طاقة كافية. وهذا ما يحدث في التأثير الكهروضوئي.

إذا حصل الإلكترون على طاقة أكبر من دالة الشغل تصبح الطاقة المتبقية طاقة حركة للإلكترون. يمكن ملاحظة ذلك لأن الإلكترونات الضوئية غالبًا ما تترك سطح الفلز بسرعات ملحوظة.

يمكننا تحديد طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي ما دمنا نعرف الطاقة التي يوفِّرها الفوتون، ودالة شغل سطح الفلز. مقدار طاقة حركة الإلكترون الضوئي المتحرِّر يساوي الطاقة التي ينقلها إليه الفوتون ناقص دالة الشغل التي يجب التغلب عليها.

هيا نُعرِّف هذه العلاقة بشكل منظَّم.

تعريف: طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي بدلالة التردُّد

تُعطَى طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي كالآتي:

$$E_{\text{max}} = hf - W$$

حيث h ثابت بلانك، وf تردُّد الفوتون الساقط، وW دالة الشغل لسطح الفلز.

سنتدرَّب على استخدام هذه المعادلة في المثال الآتي.

مثال ١: حساب طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية

أُضِيءَ سطح فلز مصقول بضوء ليزر في الفراغ مما تسبَّب في تحرُّر إلكترونات من سطح الفلز. تردُّد الضوء $2.00 \times 10^{15}\ \text{Hz}$. دالة شغل الفلز $1.40\ \text{eV}$. ما طاقة الحركة القصوى للإلكترونات؟ استخدِم $4.14 \times 10^{-15}\ \text{eV·s}$ لقيمة ثابت بلانك. اكتب إجابتك بوحدة الإلكترون فولت.

الحل

لنبدأ بتذكُّر معادلة طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي:

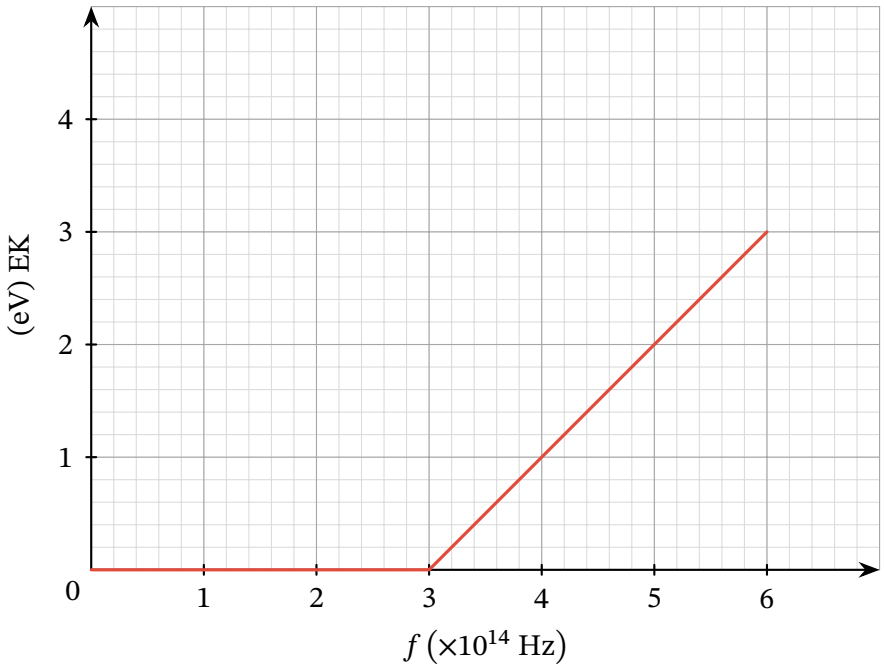
$$E_{\text{max}} = hf - W$$

لدينا القيم h، f، W، وبالتعويض بها نحصل على:

$$\begin{aligned} E_{\text{max}} &= \left(4.14 \times 10^{-15}\ \text{eV·s}\right)\left(2.00 \times 10^{15}\ \text{Hz}\right) - 1.40\ \text{eV} \\ &= 6.88\ \text{eV} \end{aligned}$$

وبذلك نكون قد وجدنا أن أقصى طاقة حركة للإلكترونات تساوي $6.88\ \text{eV}$.

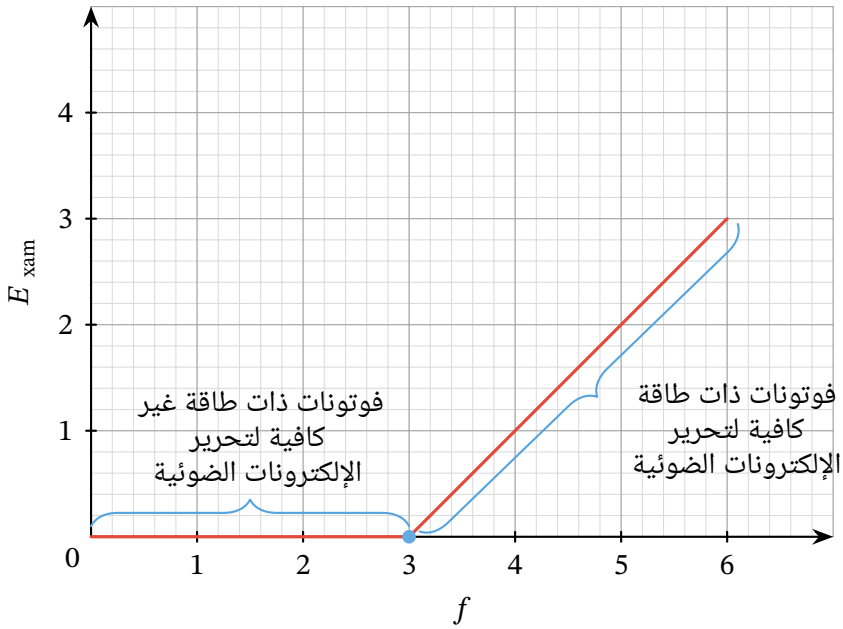
من المفيد عادة تمثيل معادلة طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي بيانيًا. يوضِّح التمثيل البياني الآتي طاقة حركة الإلكترونات الضوئية مقابل تردُّد الفوتون الساقط:



تذكَّر أنه لكي يتحرَّر الإلكترون لا بد من أن يكون تردُّد الفوتون الساقط كافيًا (ومن ثَمَّ تكون طاقته كبيرة بما يكفي) للتغلُّب على دالة الشغل. ولهذا السبب تكون طاقة الإلكترونات الضوئية صفرًا في حالة الضوء ذي التردُّد المنخفض كما هو موضَّح في الجزء الأفقي من المنحنى. هذا يوضِّح أنه ما دامت طاقة الفوتونات الساقطة غير كافية لتحرير الإلكترون فلن نتمكَّن من الكشف عن أيِّ إلكترونات ضوئية ولا عن أيِّ طاقة حركة.

لكن عند وجود تردُّد مرتفع بما يكفي للفوتون يمكن التغلُّب على دالة الشغل. تذكَّر أن دالة الشغل للمادة هي قيمة ثابتة، وأنه بمجرد التغلُّب عليها تزداد طاقة حركة الإلكترونات الضوئية بزيادة تردُّد الفوتون الساقط. إذن، يتناسب E_{max} طرديًّا مع f، وتكون العلاقة بينهما خطية كما هو موضَّح في الجزء المائل من التمثيل البياني.

يمكننا تحديد خصائص معينة للجهاز عن طريق تحليل التمثيل البياني للجهاز الذي يوضِّح E_{max} مقابل f. على وجه التحديد ما يعنينا هو النقطة التي يتحوَّل فيها المنحنى عن المحور الأفقي كما هو موضَّح في التمثيل البياني الآتي. تتحقَّق هذه النقطة عند تردُّد العتبة الذي سنطلق عليه f_0.



هذا التردُّد يحدِّد نقطةَ تحوُّلٍ في التجربة؛ حيث تنقل الفوتونات عندها طاقة كافية بالضبط لتحرِّر الإلكترونات. أما طاقة الحركة «المتبقية» للإلكترونات الضوئية فتساوي صفرًا لأن طاقة الفوتون لا تكفي إلا للتغلُّب على دالة الشغل فقط.

يمكننا استخدام هذه المعلومات لتحديد دالة الشغل للمادة. أولًا، لنُعِدْ ترتيب معادلة طاقة الحركة القصوى لإيجاد W:

$$W = hf - E_{\max}$$

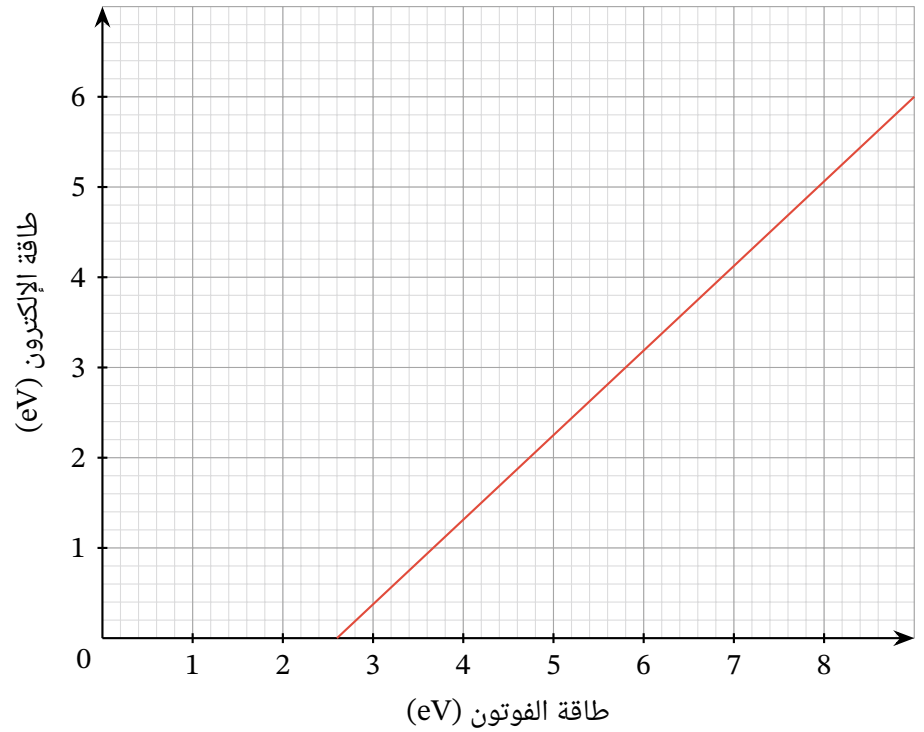
تذكَّر أن $E_{\max} = 0$ عند تردُّد العتبة f_0. وبالتعويض بهذه القيم يكون لدينا:

$$W = hf_0$$

وبذلك، فإن دالة الشغل تساوي طاقة الفوتون الساقط بتردُّد يساوي تردُّد العتبة. سنتدرَّب على هذه الطريقة لتحديد دالة الشغل في المثالين الآتيين.

مثال ٢: تحديد دالة الشغل باستخدام التمثيل البياني لطاقة الإلكترون مقابل طاقة الفوتون

يُستخدَم ليزر قابل للتوليف لإضاءة سطح فلز باستخدام تردُّدات مختلفة من الضوء. عند تجاوز تردُّد معين للضوء تتحرَّر إلكترونات من سطح الفلز. يوضِّح التمثيل البياني طاقة الحركة القصوى للإلكترونات المحرَّرة مقابل طاقة الفوتونات. ما قيمة دالة شغل الفلز؟



الحل

يوضِّح هذا التمثيل البياني العلاقة بين طاقة الفوتون الساقط وطاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي المتحرِّر من سطح الفلز. تذكَّر المعادلة التي تربط هذه القيم:

$$E_{\max} = hf - W$$

حيث hf طاقة الفوتون الساقط بدلالة تردُّده f، وثابت بلانك h. نريد إيجاد دالة الشغل لسطح الفلز هذا؛ ولذا سنعيد ترتيب هذه المعادلة لإيجاد W:

$$W = hf - E_{\max}$$

يمكننا استخدام إحداثيات أيِّ نقطة على التمثيل البياني للتعويض بها في هذه المعادلة. إن أبسط نقطة يمكننا استخدامها بوجه عامٍّ هي عند «تردُّد العتبة» f_0، أو المقطع الأفقي للمنحنى؛ وذلك لأن $E_{\max} = 0$ عند هذه النقطة. إذن، يمكننا حذف $E_{\max}$ من المعادلة، ويتبقَّى لدينا:

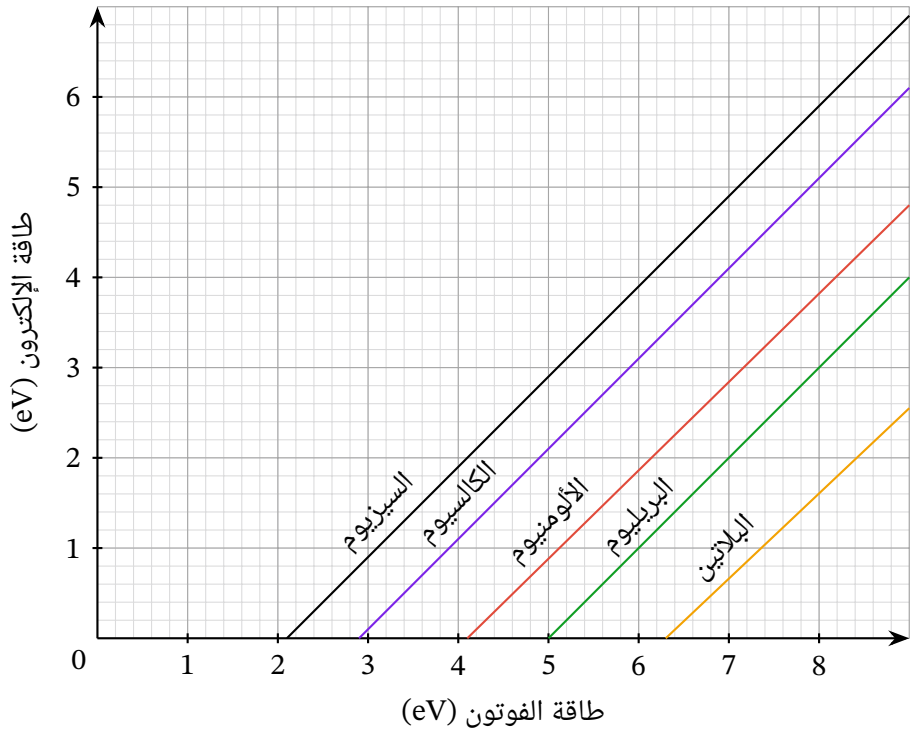
$$W = hf_0$$

وعليه، فإن طاقة الفوتون عند هذه النقطة تساوي دالة شغل المادة.

يتقاطع التمثيل البياني مع المحور الأفقي عند 2.6 eV؛ وبذلك نكون قد توصَّلنا إلى أن قيمة دالة الشغل لهذا الفلز تساوي 2.6 eV.

مثال ٣: تحديد دالة الشغل باستخدام التمثيل البياني لطاقة الإلكترون مقابل طاقة الفوتون

يوضِّح التمثيل البياني طاقة الحركة القصوى للإلكترونات الضوئية عندما تُضاء فلزات مختلفة بضوء له تردُّدات مختلفة.



١. أيُّ الفلزات له أقل دالة شغل؟

٢. أيُّ الفلزات له أكبر دالة شغل؟

الحل

الجزء الأول

تذكَّر معادلة طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي:

$$E_{\text{max}} = hf - W$$

حيث W دالة الشغل، hf طاقة الفوتون؛ وهي تعتمد على تردُّد الفوتون f، وثابت بلانك h.

يوضِّح هذا التمثيل البياني خصائص خمسة عناصر مختلفة. لكل خط من الخطوط الخمسة على التمثيل البياني الميل نفسه، ولا تتمايز إلا بتقاطعاتها مع المحور الأفقي.

يمكننا دراسة العناصر من خلال تقاطعات منحنياتها مع المحور الأفقي لأن هذه القيمة تصف النقطة؛ حيث تصبح طاقة الفوتون الساقط كافية للتغلُّب على دالة الشغل. ومن ثَمَّ، $E_{\text{max}} = 0$، ولكن تظلُّ الإلكترونات تتحرَّر. يمكننا التعويض بهذه

القيمة لإيجاد العلاقة بين دالة الشغل وطاقة الفوتون:

$$0 = hf - W$$

أو

$$hf = W$$

إذن، طاقة الفوتون عند هذه النقطة تساوي دالة شغل المادة.

كلما كان مقطع المحور الأفقي أصغر كانت قيمة طاقة الفوتون المطلوبة أقل. وبذلك يمكننا المقارنة بين قيم دالة الشغل للمواد من خلال مقارنة قيم طاقة العتبة للفوتونات الخاصة بكلٍّ منها. خط السيزيوم هو الخط ذو المقطع الأفقي الأصغر.

وعليه، نجد أن دالة شغل السيزيوم هي الأقل.

الجزء الثاني

عند النظر إلى التمثيل البياني مرة أخرى يمكننا ملاحظة أن البلاتين هو العنصر الذي يتطلَّب أكبر طاقة للفوتون عند العتبة؛ أي حيث $E_{\max} = 0$.

ومن ثَمَّ فإن للبلاتين دالة الشغل الكبرى.

استكشفنا كيفية تحديد دالة الشغل لأيِّ مادة من التمثيل البياني لطاقة حركة الإلكترون مقابل تردُّد الفوتون الساقط.
والآن، لنفترض أننا نريد معرفة كيفية ارتباط ذلك بالطول الموجي للضوء الساقط بدلًا من التردُّد. للقيام بذلك علينا إيجاد علاقة بين تردُّد الضوء وطوله الموجي حتى نتمكَّن من التعويض عن f بدلالة λ.

يمكننا الربط بين التردُّد والطول الموجي باستخدام معادلة سرعة الموجة:

$$c = \lambda f$$

حيث c سرعة الضوء. بإعادة ترتيب هذه المعادلة لإيجاد التردُّد يصبح لدينا:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

نتذكَّر الآن معادلة طاقة حركة الإلكترونات؛ وهي:

$$W = hf - E_{\max}$$

أخيرًا، يمكننا التعويض عن التردُّد:

$$W = \frac{hc}{\lambda} - E_{\max}$$

تسمح لنا هذه المعادلة بربط دالة الشغل، وأقصى طاقة حركة للإلكترون الضوئي، والطول الموجي للضوء الساقط.

يمكننا إعادة ترتيب هذه المعادلة لتعريف طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي بدلالة الطول الموجي للفوتون الساقط كما هو موضَّح بالأسفل.

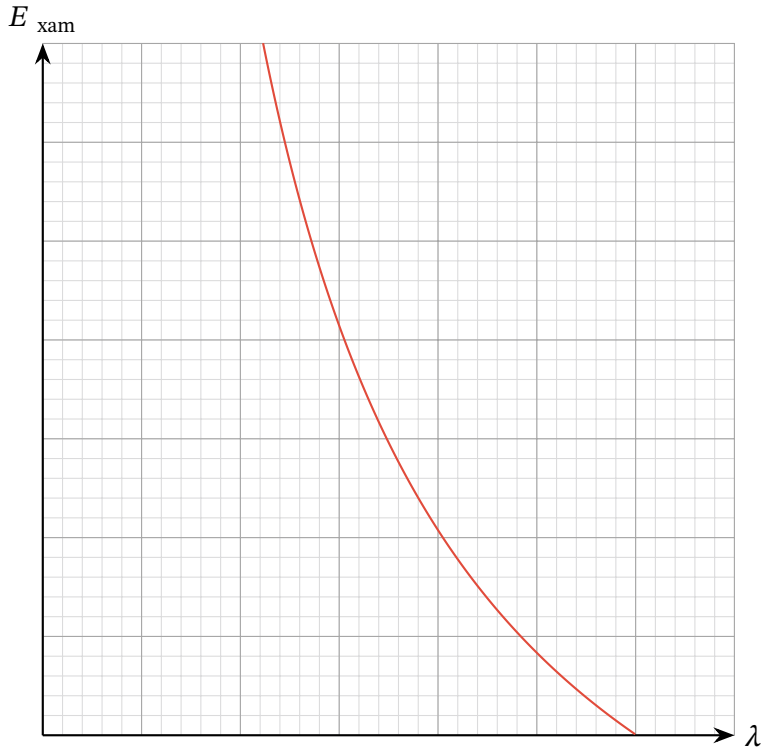
تعريف: طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي بدلالة الطول الموجي

تُعطَى طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي كالآتي:

$$E_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - W$$

حيث h ثابت بلانك، c سرعة الضوء، λ الطول الموجي للفوتون الساقط، W دالة الشغل لسطح الفلز.

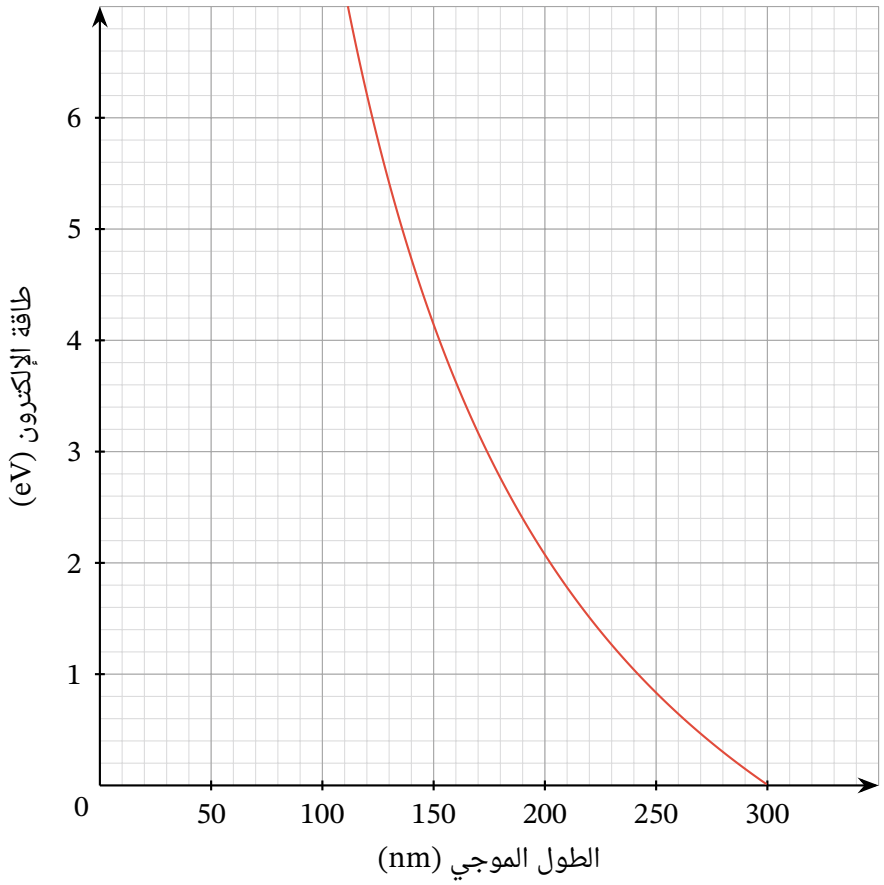
لاحظ أن المعادلة المكتوبة بدلالة التردُّد يظهر فيها f في البسط؛ وهو ما يسمح بوجود علاقة خطية بين f و$E_{\max}$. في حين أن المعادلة المكتوبة بدلالة الطول الموجي يظهر فيها λ في المقام؛ وهو ما يعني أن التمثيل البياني لـ $E_{\max}$ مقابل λ ليس له ميل خطي. يوضِّح التمثيل البياني بالأسفل الشكل العامَّ لمنحنى طاقة حركة الإلكترون مقابل الطول الموجي للفوتون.



لاحظ أنه لا توجد إلكترونات ضوئية تتحرَّر عندما يتخطَّى الطول الموجي للفوتونات قيمة معينة. وذلك لأننا عندما نزيد الطول الموجي للضوء الساقط فإننا نقلِّل تردُّده (ومن ثَمَّ نُقلِّل طاقته). لنتدرَّب على استخدام هذه العلاقة من خلال مثالين.

مثال ٤: تحديد دالة الشغل باستخدام التمثيل البياني لطاقة الإلكترون مقابل الطول الموجي للفوتون

يُستخدَم ليزر قابل للتوليف لإضاءة سطح فلز بأطوال موجية مختلفة من الضوء. عندما يكون الطول الموجي للضوء أقصر من قيمة معينة تتحرَّر إلكترونات من سطح الفلز. يوضِّح التمثيل البياني طاقة الحركة القصوى للإلكترونات المتحرِّرة مقابل الطول الموجي للفوتونات.



١. ما أقصى طول موجي للضوء تتحرَّر عنده الإلكترونات من سطح الفلز؟

٢. ما دالة شغل الفلز؟ استخدِم القيمة 4.14×10^{-15} eV·s لثابت بلانك. اكتب إجابتك بالإلكترون فولت لأقرب منزلتين عشريتين.

الحل

الجزء الأول

في البداية دعونا نتذكَّر معادلة طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي بدلالة الطول الموجي للفوتون الساقط:

$$E_{\text{max}} = \frac{hc}{\lambda} - W$$

ثمة علاقة عكسية بين طاقة الفوتون والطول الموجي. ولذا، عندما يتخطَّى الطول الموجي للفوتونات الساقطة طولًا موجيًا معيَّنًا، لا تعود للفوتونات طاقة كافية للتغلُّب على حاجز دالة الشغل والتسبُّب في التأثير الكهروضوئي.

تتحقَّق هذه النقطة على التمثيل البياني عندما يكون $E_{\text{max}} = 0$. ويُمثِّل الطول الموجي عند هذه النقطة أقصى طول موجي للضوء يمكن عنده أن تتحرَّر الإلكترونات من السطح. تقع هذه النقطة على المحور الأفقي عند $\lambda = 300\ \text{nm}$.

إذن، أقصى طول موجي للضوء الساقط يتسبَّب في تحرُّر الإلكترونات من سطح الفلز يساوي 300 nm.

الجزء الثاني

تذكَّر أن معادلة دالة الشغل بدلالة الطول الموجي للفوتون الساقط هي:

$$W = \frac{hc}{\lambda} - E_{\text{max}}$$

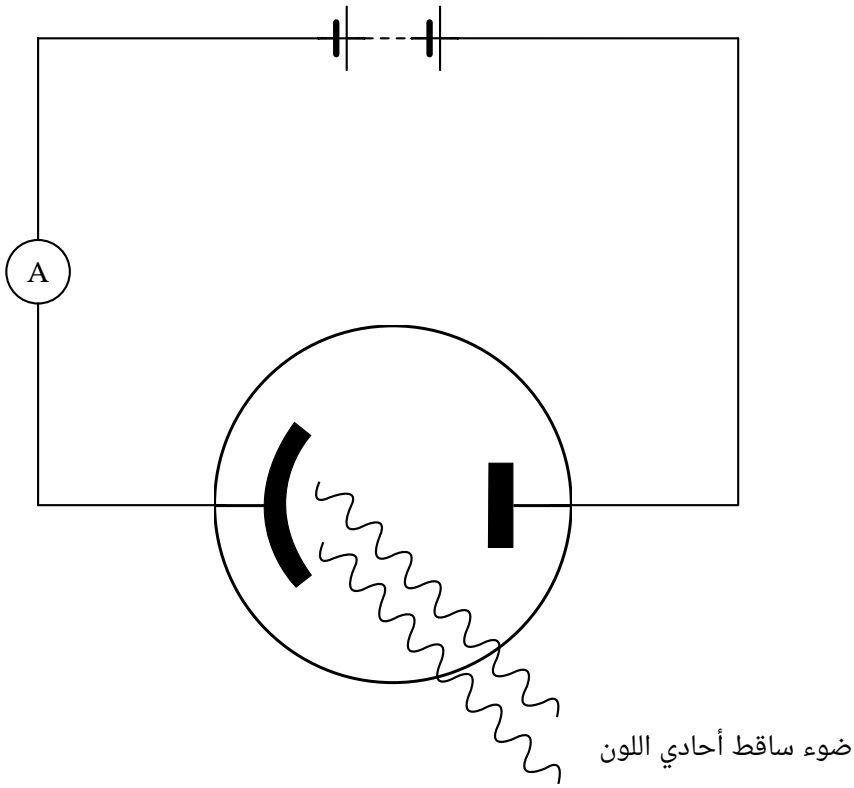
لإيجاد دالة شغل الفلز يمكننا التعويض بقيمة المقطع الأفقي من المنحنى في هذه المعادلة. علينا تحويل النانومتر إلى متر؛ وعليه تكون قيمة الطول الموجي هي: $300\ \text{nm} = 300 \times 10^{-9}\ \text{m}$. عند هذا الطول الموجي للضوء الساقط تساوي طاقة حركة الإلكترونات صفرًا؛ إذن سنحذف E_{max}. بعد ذلك نعوِّض بقيم ثابت بلانك وسرعة الضوء، ونحسب دالة الشغل:

$$\begin{aligned} W &= \frac{\left(4.14 \times 10^{-15}\ \text{eV}\cdot\text{s}\right)\left(3.0 \times 10^{8}\,\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{300 \times 10^{-9}\ \text{m}} \\ &= 4.14\ \text{eV}. \end{aligned}$$

إذن دالة شغل الفلز تساوي 4.14 eV.

مثال ٥: حساب خصائص جهاز التأثير الكهروضوئي التجريبي

يوضِّح الشكل دائرة كهربية. تحتوي الدائرة على مصعد ومهبط في غرفة تفريغ. وُصِّل المصعد والمهبط بأميتر وبطارية على التوالي. المهبط مصنوع من النيكل.



١. استُخدِم ضوء بأطوال موجية مختلفة في إضاءة مهبط النيكل. عندما يكون الطول الموجي للضوء أقصر من $248\ \text{nm}$ يُظهِر الأميتر قراءة مقدارها $12.8\ \text{mA}$. ما دالة الشغل للنيكل؟ استخدم القيمة $4.14 \times 10^{-15}\ \text{eV·s}$ لثابت بلانك. قرِّب إجابتك لأقرب منزلتين عشريتين.

٢. في البداية كانت قدرة خرج أشعة الليزر المُستخدَمة في إضاءة المهبط $64\ \text{mW}$. إذا زادت قدرة الخرج إلى $128\ \text{mW}$ فما شدة التيار المار في الدائرة؟ قرِّب إجابتك لأقرب منزلة عشرية.

الحل

الجزء الأول

لنبدأ بتذكُّر معادلة دالة الشغل بدلالة الطول الموجي للفوتون الساقط:

$$W = \frac{hc}{\lambda} - E_{\text{max}}$$

نعلم أن الإلكترونات تتحرَّر من سطح النحاس عندما يسقط ضوء بطاقة كبيرة بما يكفي مما يتسبَّب في رصد الأميتر لتيار.

نعلم هنا أن الأميتر لن يرصد تيارًا إلا عندما يكون الطول الموجي للضوء الساقط أقل من $248\ \text{mA}$. وعند قيمة الطول الموجي هذه التي سنسميها λ_0 تكون للفوتونات الساقطة طاقة كافية للتغلُّب على حاجز دالة الشغل. ومن ثَمَّ لن تتبقَّى

طاقة حركة للإلكترونات الضوئية؛ وهو ما يعني أن $E_{\text{max}} = 0$، وهكذا تصبح المعادلة:

$$W = \frac{hc}{\lambda_0}$$

لحساب دالة الشغل يمكننا التعويض بقيم ثابت بلانك، وسرعة الضوء، والطول الموجي:

$$\begin{aligned} W &= \frac{(4.14 \times 10^{-15}\ \text{eV}\cdot\text{s})\left(3.0 \times 10^{8}\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{248 \times 10^{-9}\ \text{m}} \\ &= 5.01\ \text{eV} \end{aligned}$$

وبذلك نكون قد وجدنا أن دالة الشغل للنيكل تساوي 5.01 eV.

الجزء الثاني

تُنتِج قدرة الليزر مقدارًا من الطاقة لكل ثانية. وتحمل الفوتونات طاقة حزمة الليزر؛ ولذا إذا تضاعفت طاقة الليزر لكل ثانية فإن عددًا مضاعَفًا من الفوتونات ينبعث لكل ثانية. تذكَّر أن الفوتون الساقط يتفاعل مع إلكترون واحد على سطح الفلز. إذن، في حالة تَضاعُف عدد الفوتونات الساقطة على السطح فإن عدد الإلكترونات التي تستقبل الطاقة وتتحرَّر من السطح يتضاعف.

ومن ثَمَّ، تتضاعف شدة التيار بمضاعفة قدرة الليزر. وبما أن الأميتر قد رصد في البداية تيارًا شدته 12.8 mA فسيرصد الآن ضِعف هذه القيمة.

وهكذا فإن شدة التيار المار في الدائرة ستكون 25.6 mA.

هيا نختم بتلخيص بعض المفاهيم المهمة.

النقاط الرئيسية

- التأثير الكهروضوئي هو ظاهرة تحرُّر إلكترونات من سطح فلز عن طريق تسليط ضوء عليه. والإلكترون الضوئي هو إلكترون ينبعث من السطح بعد استقباله طاقةً من فوتون ساقط.
- دالة الشغل لأيِّ مادة هي الحدُّ الأدنى من الطاقة اللازم لتحرير إلكترون من سطح الفلز، ويمكن إيجاد قيمتها من التمثيل البياني لطاقة حركة الإلكترون مقابل طاقة الفوتون.
- تتناسب طاقة الفوتون طرديًّا مع تردُّده، وعكسيًّا مع طوله الموجي.
- يمكننا ربط دالة الشغل W، وطاقة الحركة القصوى للإلكترون E_{max}، بدلالة التردُّد f، باستخدام المعادلة: $E_{\text{max}} = hf - W$؛ حيث h هو ثابت بلانك.
- يمكنا ربط دالة الشغل W، وطاقة الحركة القصوى للإلكترون E_{max}، بدلالة الطول الموجي λ، باستخدام المعادلة: $E_{\text{max}} = \frac{hc}{\lambda} - W$؛ حيث h هو ثابت بلانك، وc هو سرعة الضوء.