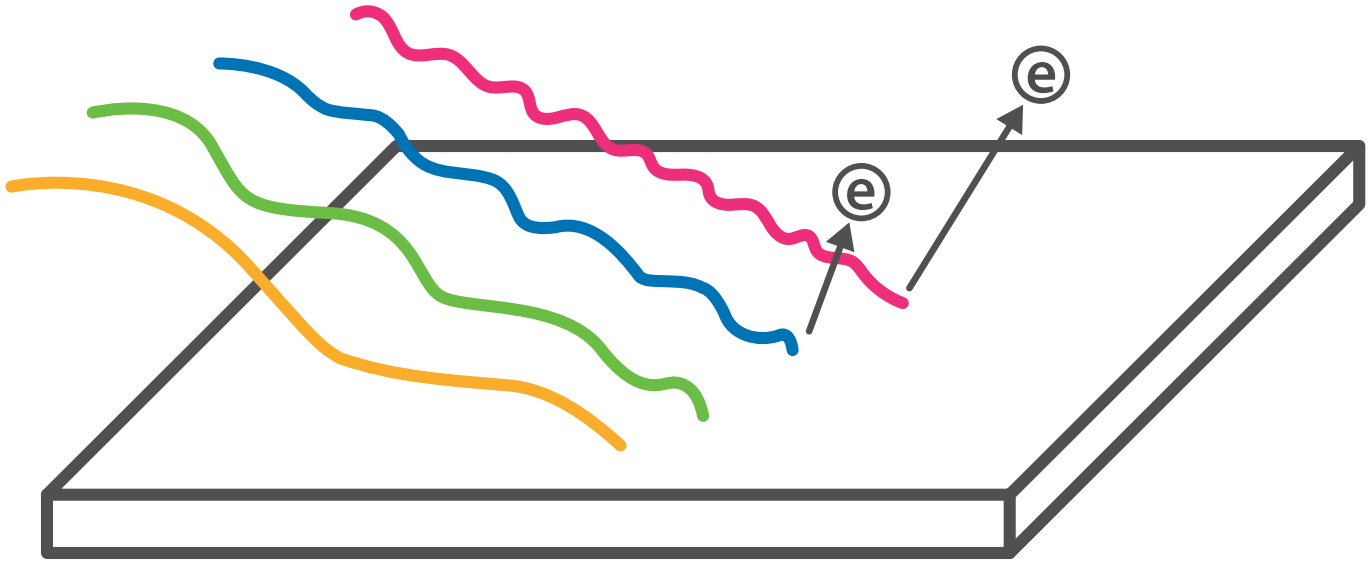
طاقة حركة الإلكترونات الضوئية



أهداف الدرس

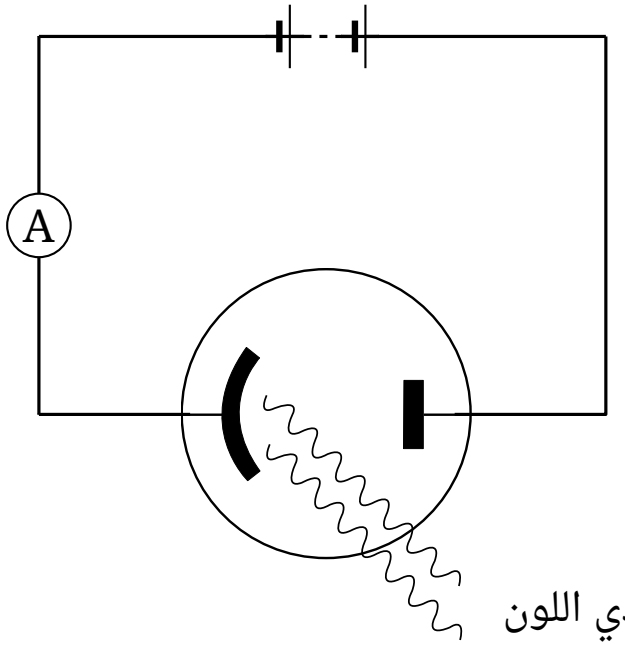
ستتمكَّن من:

- وصف ماهية التأثير الكهروضوئي
- استخدام المعادلة $E_{\max} = hf - W$
  - لإيجاد أقصى طاقة حركة $E_{\max}$ للإلكترونات المنبعثة من فلز عن طريق التأثير الكهروضوئي بمعلومية القيم الأخرى
  - لإيجاد التردد f للفوتونات الساقطة على سطح فلز بمعلومية القيم الأخرى
  - لإيجاد دالة الشغل W للفلز بمعلومية القيم الأخرى
- معرفة دالة الشغل لفلز من تمثيل بياني لطاقة حركة الإلكترون مقابل تردد الفوتون
- معرفة دالة الشغل لفلز من تمثيل بياني لطاقة حركة الإلكترون مقابل الطول الموجي للفوتون

تذكر: الفوتونات

- الفوتونات هي جسيمات من الضوء
- تُعطى طاقة الفوتون بالعلاقة $E = hf$؛ حيث h يمثل ثابت بلانك، وf تردد الفوتون
- تتحرك الفوتونات بسرعة الضوء $c = 3 \times 10^8\ \text{m/s}$.

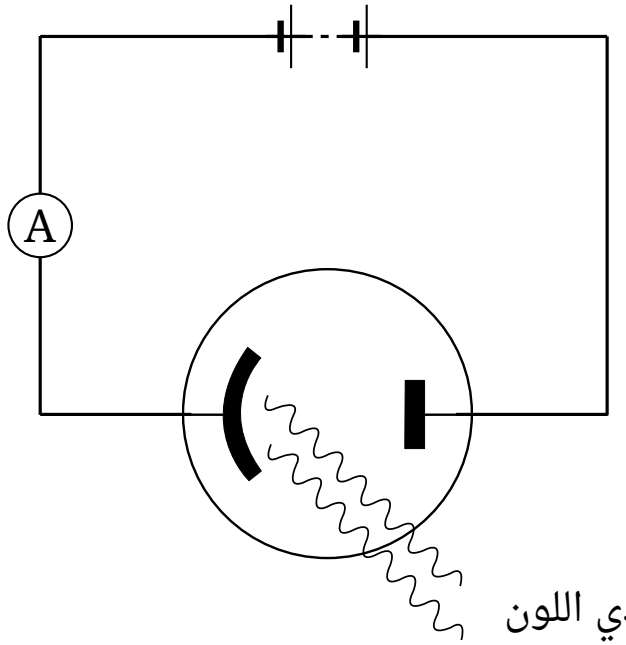
التأثير الكهروضوئي



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

التأثير الكهروضوئي (متابعة)

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.

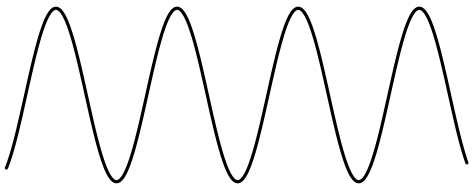
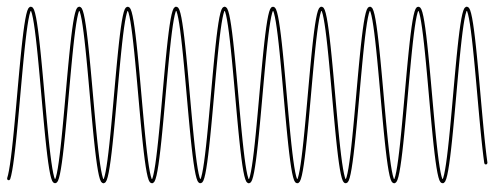


دالة الشغل

- الإلكترونات لها طاقات مختلفة عند كل مستوى ذري تبقيها مرتبطة بالذرة، وتُعرَف هذه الطاقة باسم «دالة الشغل». يمكننا اعتبار دالة الشغل، المشار إليها بـ W، الحاجز الذي يُبقِي الإلكترون مُقيَّدًا بالمادة. إذا انتقلت طاقة تساوي أو أكبر من دالة الشغل إلى الإلكترون فإن الحاجز يُكسَر ويتحرَّر الإلكترون من رابطته.
- المواد الموصِّلة لها دوال شغل منخفضة نسبيًّا مقارنة بالمواد غير الموصِّلة.

طاقة الفوتونات

بما أن طاقة الفوتونات تعتمد على ترددها، فإن أي ضوء بأي سعة ولكن بضوء تردده كبير بما يكفي لإحداث تأثير كهروضوئي. الفرق بين سعة وتردد الضوء موضح في الجدول الآتي.

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

طاقة الفوتونات (متابعة)

في التأثير الكهروضوئي، يصطدم فوتون واحد بإلكترون واحد ناقلًا إلى الإلكترون طاقة كافية ليتم تحريره من الذرة.

إذا حصل الإلكترون على طاقة أكبر من دالة الشغل تصبح الطاقة المتبقية طاقة حركة للإلكترون.

تعريف: طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي بدلالة التردُّد

تُعطَى طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي كالآتي:

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

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

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 $4.14 \times 10^{-15}\ \text{eV} \cdot \text{s}$ لقيمة ثابت بلانك. اكتب إجابتك بوحدة الإلكترون فولت.

الحل

لنبدأ بتذكُّر معادلة طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي:

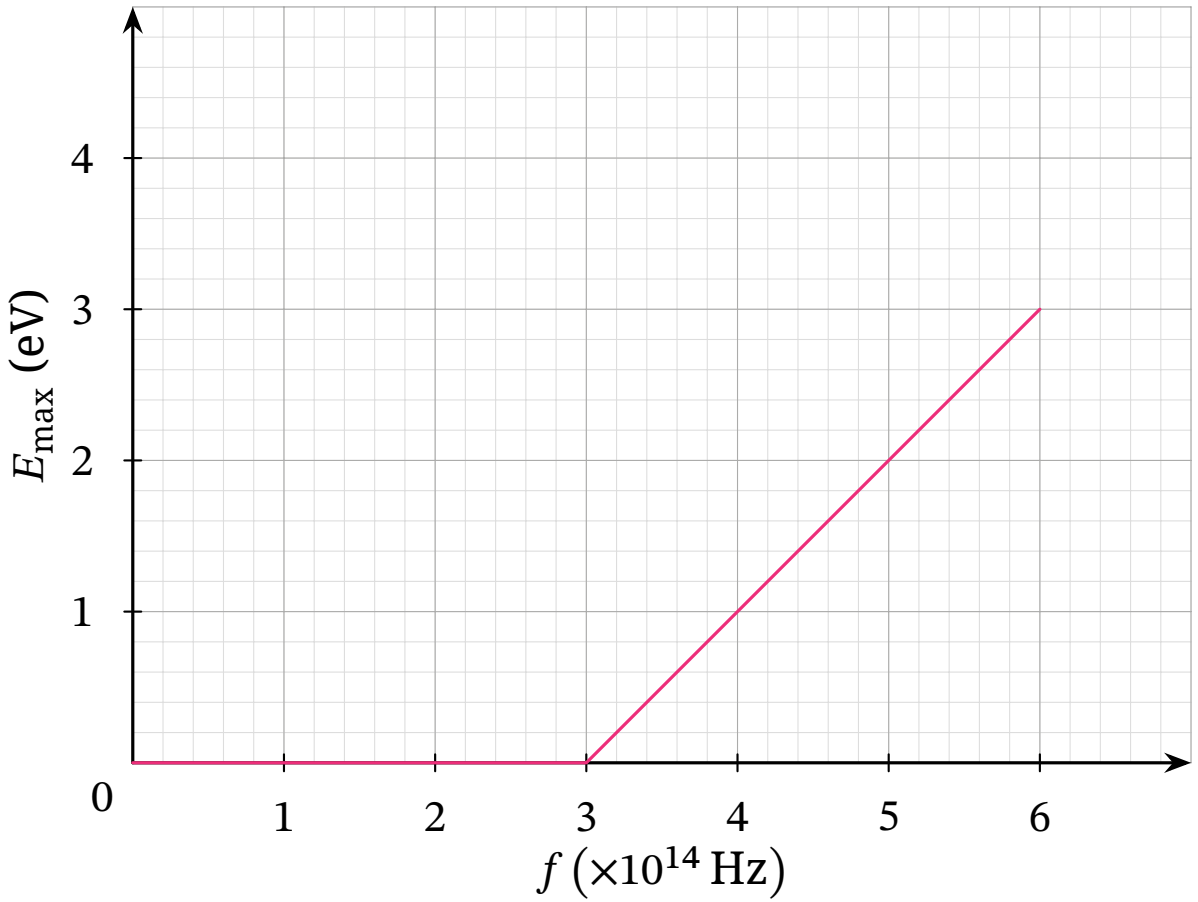
$$E_{\text{max}} = hf - W.$$

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

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

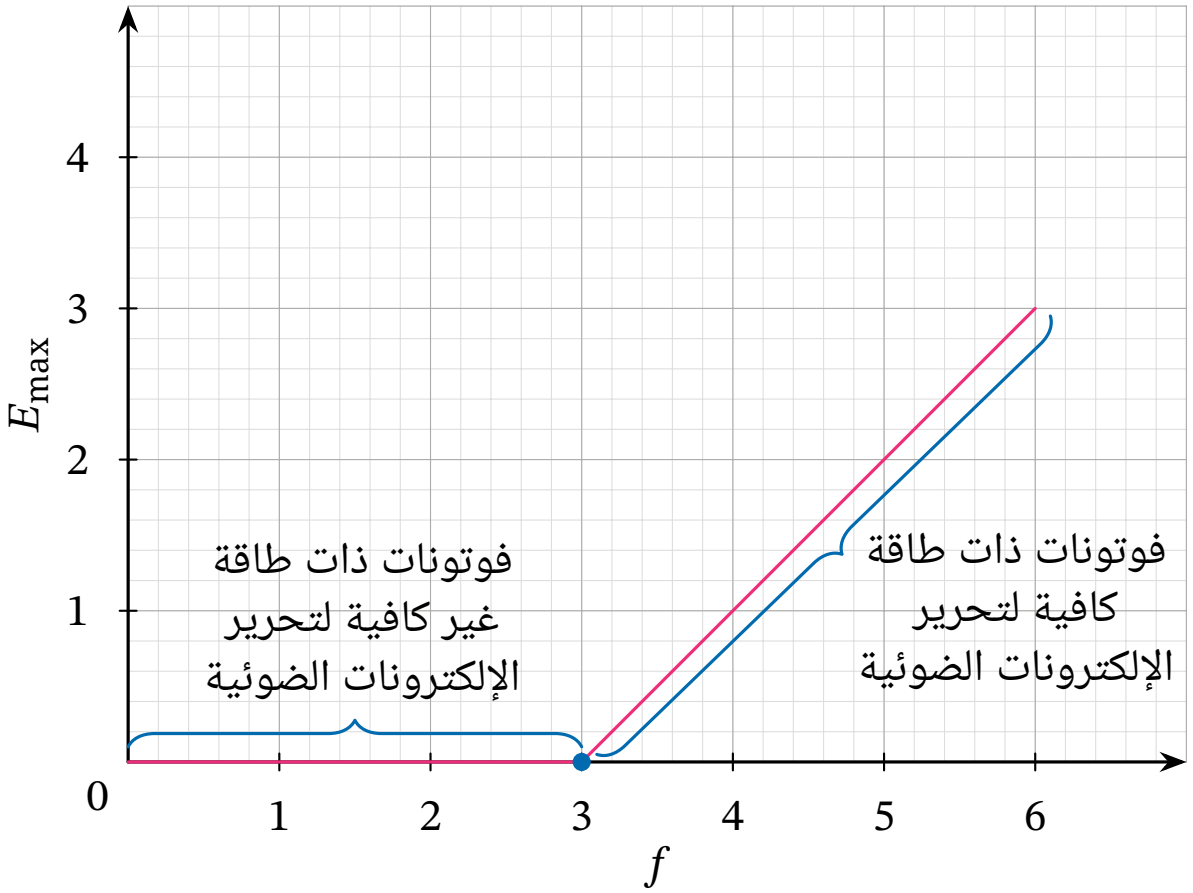
وبذلك نكون قد وجدنا أن أقصى طاقة حركة للإلكترونات تساوي $6.88\ \text{eV}$.

العلاقة بين طاقة الحركة القصوى للفوتونات الضوئية وتردداتها



يوضح الشكل البياني طاقة حركية تساوي صفرًا إلى أن يصل تردد الفوتون الساقط إلى قيمة معينة. لا تتحرر الإلكترونات من الفلز ما لم يكن تردُّد الفوتون الساقط كافيًا. معنى ذلك أن طاقته كبيرة بما يكفي للتغلُّب على دالة الشغل.

العلاقة بين طاقة الحركة القصوى للفوتونات الضوئية وتردداتها (متابعة)



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.

تردد العتبة

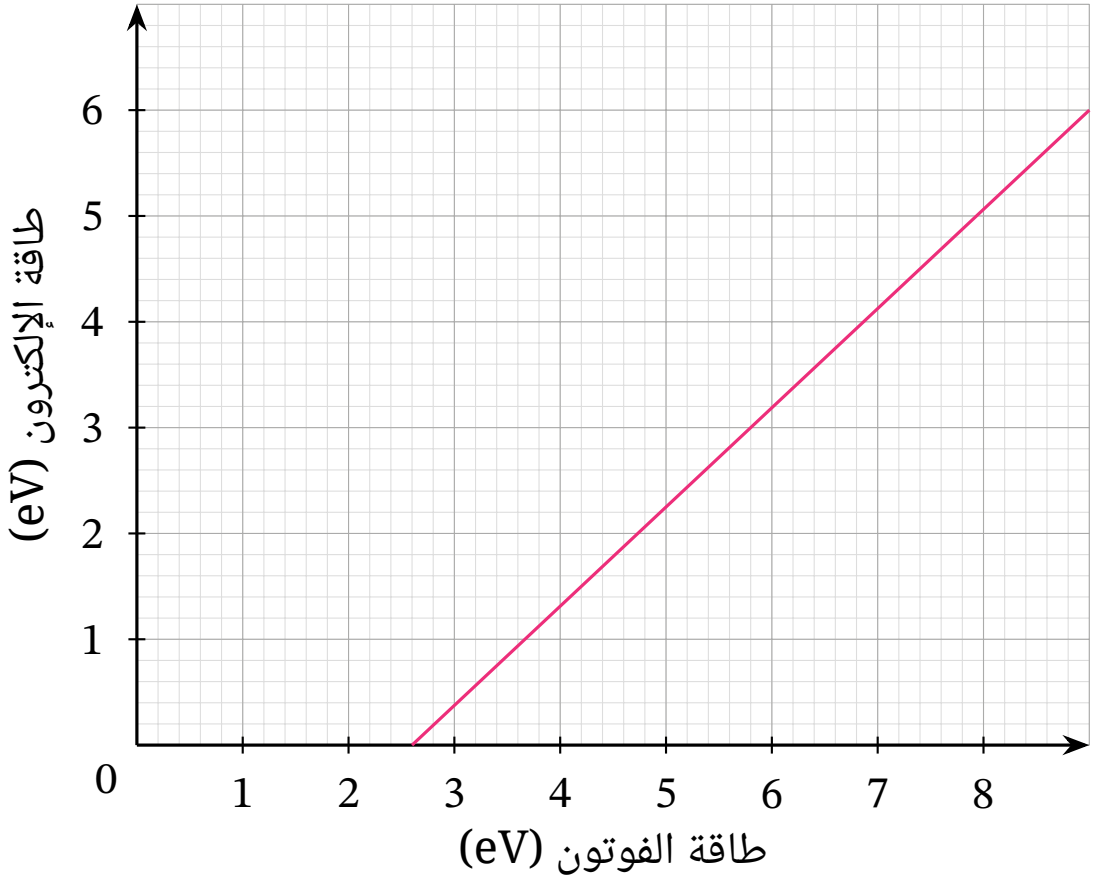
التردد الذي فيه يساوي طاقة الفوتون الساقط دالة شغل الفلز المستخدم يسمى بتردد العتبة:

$$W = hf_0.$$

ونظرا لأن كل فلز له دالة شغل مميزة، فإن تردد عتبة الفوتون الساقط يكون مميزًا كذلك.

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؟



مثال ٢ (متابعة)

الحل

نعلم أن دالة الشغل يمكن أن تُعطى بالمعادلة:

$$W = hf_0,$$

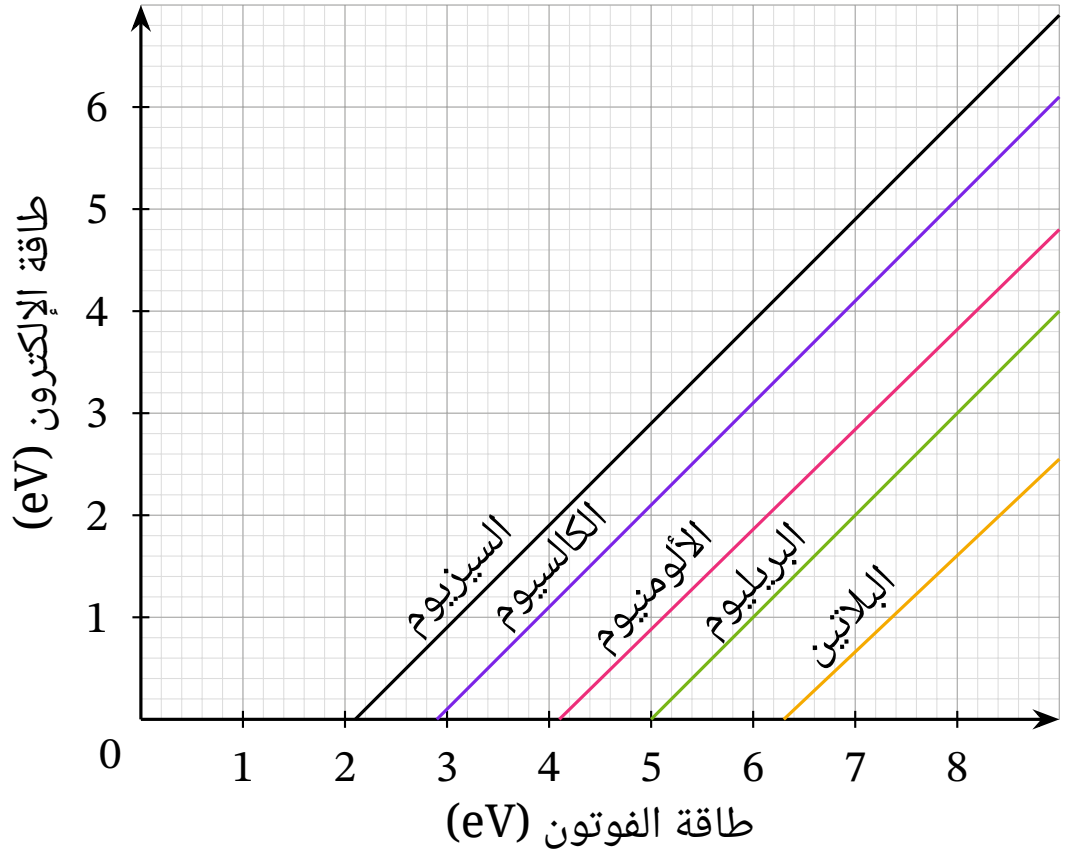
حيث h ثابت بلانك وf_0 تردد العتبة.

إذن دالة الشغل هي حيث يتقاطع الخط المستقيم مع المحور الأفقي؛ حيث E_{max} يساوي صفرًا. بفحص التمثيل البياني نتوصل إلى أن:

$$W = 2.6\,\text{eV}.$$

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؟

مثال ٣ (متابعة)

الحل

الجزء الأول

طاقة الفوتونات التي تساوي عندها $E_{\max}$ صفرًا هي دالة شغل الفلزات.

نحصل على ذلك عند التعويض يصفر عن $E_{\max}$ في معادلة طاقة الحركة القصوى للإلكترون اضوئي:

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

دالة الشغل في التمثيل البياني هي الجزء المقوع من المحور الأفقي. الفلز الذي له أقل دالة شغل يقطع المحور الأفقي عند قيمة صغيرة. وعليه، نجد أن دالة شغل السيزيوم هي الأقل.

الجزء الثاني

وكذلك الفلز الذي له أكبر دالة شغل له يقطع جزء أكبر من المحور الأفقي. ومن ثَمَّ فإن للبلاتين دالة الشغل الكبرى.

طاقة الفوتونات بدلالة أطوالها الموجية

يمكننا التعبير عن تردد الفوتون على الصورة:

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

باستخدام تلك الصيغة لـ f للتعويض في معادلة طاقة الفوتون، $E = hf$ نحصل على طاقة الفوتون بدلالة الطول الموجي:

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

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

تعريف: طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي بدلالة الطول الموجي

تُعطَى طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي كالآتي:

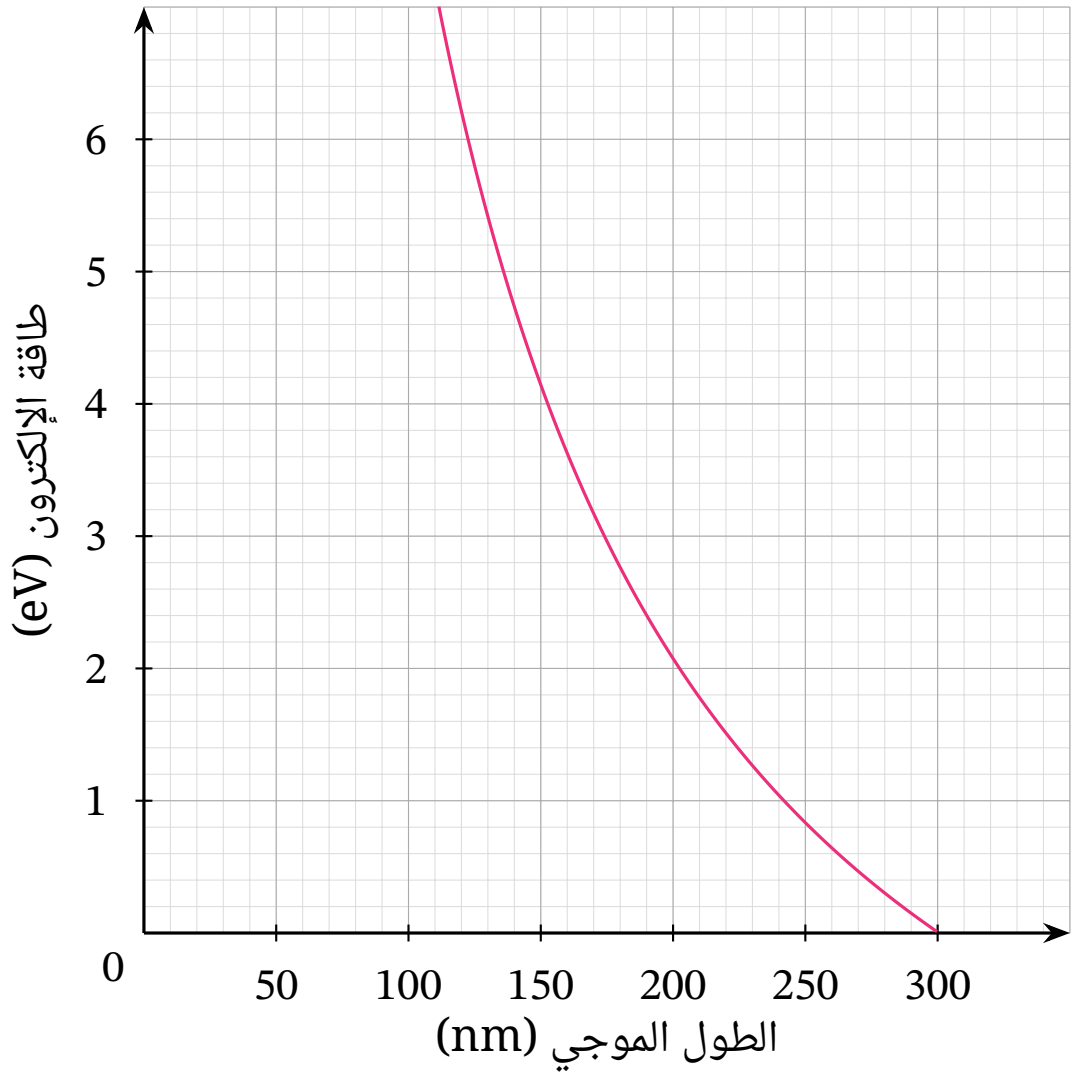
$$E_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - W,$$

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

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.

مثال ٤ (متابعة)



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

٢. ما دالة شغل الفلز؟ استخدِم القيمة $4.14 \times 10^{-15}\ \text{eV}\cdot\text{s}$ لثابت بلانك. اكتب إجابتك بالإلكترون فولت لأقرب منزلتين عشريتين.

مثال ٤ (متابعة)

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 وطوله الموجي. ولذا عندما يتخطَّى الطول الموجي للفوتونات الساقطة طولًا موجيًّا 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 $300\,\text{nm}$.

مثال ٤ (متابعة)

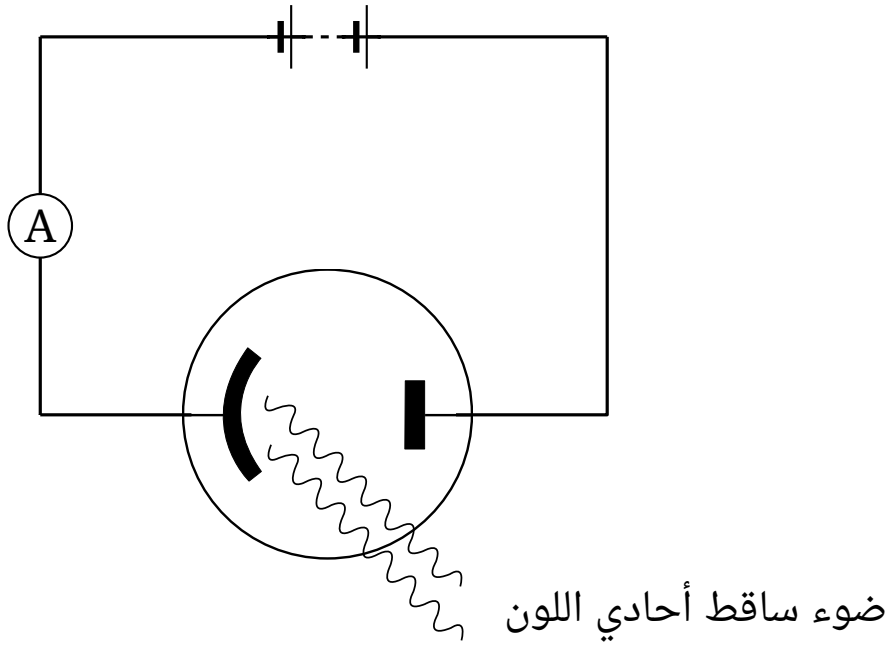
الجزء الثاني

لإيجاد دالة شغل الفلز يمكننا التعويض بالقيمة التي يقطع عندها المنحنى المحور الأفقي في معادلة طاقة الحركة القصوى للإلكترون الضوئي. 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:

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

مثال ٥: حساب خصائص جهاز التأثير الكهروضوئي

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



مثال ٥ (متابعة)

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 $4.14 \times 10^{-15}\,\text{eV}\cdot\text{s}$ 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.

مثال ٥ (متابعة)

نعلم هنا أن الأميتر لن يرصد تيارًا إلا عندما يكون الطول الموجي للضوء الساقط أقل من 248 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 $E_{\text{max}} = 0$، وهكذا تصبح المعادلة:

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

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

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

مثال ٥ (متابعة)

الجزء الثاني

يُنتِج الليزر مقدارًا من الطاقة لكل ثانية. وتحمل الفوتونات طاقة حزمة الليزر؛ ولذا إذا تضاعفت طاقة الليزر لكل ثانية فإن، مثلًا، عدد الفوتونات ينبعث لكل ثانية. تذكَّر أن الفوتون الساقط يؤثر على إلكترون واحد على سطح الفلز. إذن في حالة زيادة عدد الفوتونات الساقطة على السطح إلى الضعف فإن عدد الإلكترونات التي تستقبل الطاقة وتتحرَّر من السطح يزيد إلى الضعف.

ومن ثَمَّ تزيد شدة التيار إلى الضعف عند زيادة قدرة الليزر إلى الضعف. وبما أن الأميتر قد رَصد في البداية تيارًا شدته 12.8 mA فسيرصد الآن ضِعف هذه القيمة. وهكذا فإن شدة التيار المار في الدائرة ستكون 25.6 mA.

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: $E_{\max} = hf - W$؛ حيث h هو ثابت بلانك.
- يمكننا ربط دالة الشغل W، وطاقة الحركة القصوى للإلكترون $E_{\max}$، بدلالة الطول الموجي λ، باستخدام المعادلة: $E_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - W$؛ حيث h هو ثابت بلانك وc هو سرعة الضوء.