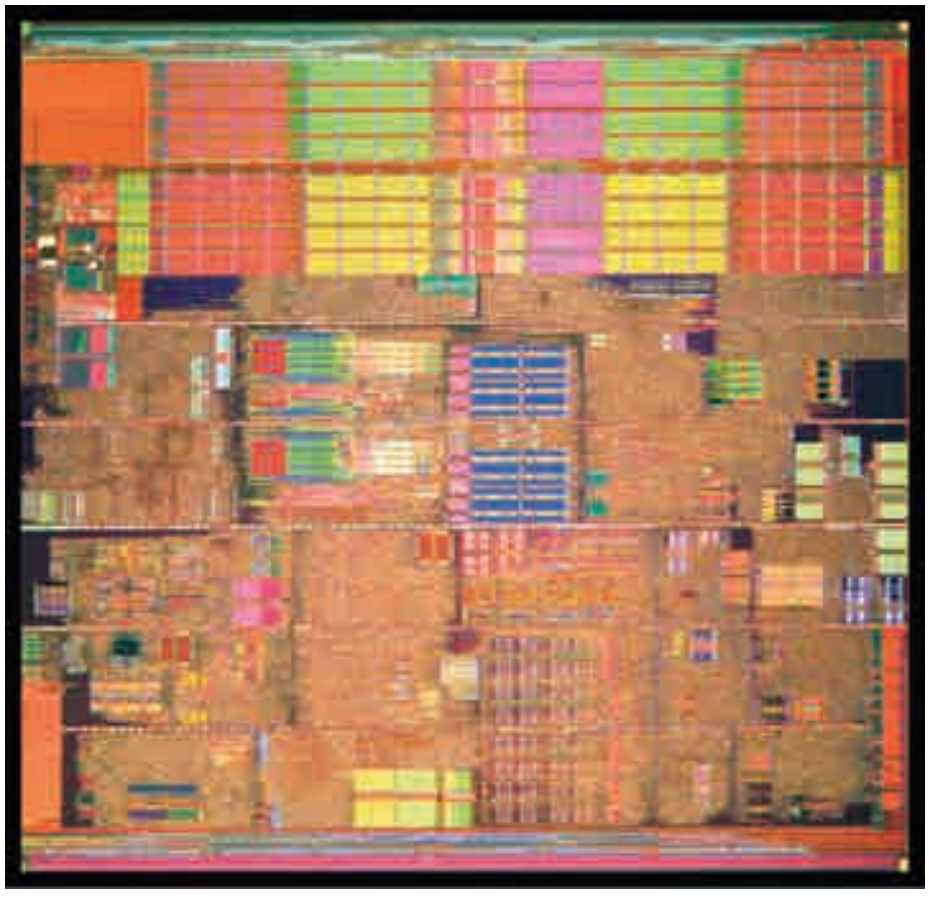


تُعدّ شريحة بنتيوم 4 إحدى المعالجات الرّئيسة المستخدمة في الحواسيب حاليًّا، حيث يحتوي نموذج 2004 على 125 مليون ترانزيستور، إضافة إلى الصّمّامات الثّنائيّة والعناصر الإلكترونيّة شبه الموصلة الأخرى الموجودة جميعها على شريحة واحدة طول جانبها 1 سم تقريبًا. وقبل مناقشة أشباه الموصلات وتطبيقاتها، سندرس طريقة وصف النّظريّة الكمّيّة لترابط الذّرات لتشكيل الجزيئات، وكيفية تفسيرها للتّصرّفات الجزيئيّة. ثم نفحص الطّريقة التي تشكّل فيها الذّراتُ والجزيئات المواد الصّلبة، مع التّركيز على الفلزّات وأشباه الموصلات، واستخداماتها في الأجهزة الإلكترونيّة.

الفصل 29

الجزيئات والمواد الصّلبة

كان للميكانيكا الكمية أثرٌ عميقٌ في حياتنا من الناحيتين العقلية والتقنية منذ أن طوّرت في عشرينيّات القرن العشرين (1920s). وكما رأينا في الفصل الثامن والعشرين، فإنّ الطريقة التي كنا نرى العالم فيها قد تغيرت أيضا. والآن، سنناقش كيف منحتنا الميكانيكا الكمية فهمًا لطريقة تركيب الجزيئات والمادة في مجملها، بالإضافة إلى عدد من التطبيقات المهمة، والتي من ضمنها أجهزة أشباه الموصلات، وتطبيقات علوم حياتية.

* 29-1 التّرابط في الجزيئات

تمثلت إحدى نجاحات الميكانيكا الكمية العظيمة في قدرتها على منح العلماء- أخيرًا- فهمًا أفضل لطبيعة الروابط الكيميائية. وبسبب اعتمادها على الفيزياء، وضرورة استيعابها لأهميتها الكبيرة في مجالات عديدة، سنقوم بمناقشتها في هذا الفصل.

نقصد بالجزيء، مجموعة مترابطة بقوة من ذرتين أو أكثر لدرجة تجعلها تتصرف كوحدة واحدة. وعندما تلتصق الذرات ببعضها على هذه الصورة، نقول إنّ هناك **رابطة** كيميائية قد تشكّلت. وهناك نوعان رئيسان من الروابط الكيميائية القوية هما: التساهمية والأيونية. وكثير من الروابط في الحقيقة تقع بين هذين النوعين الرّئيسين.

الرّوابط التّساهميّة

إذا أردنا معرفة كيفية تشكّل **الروابط التساهمية**؛ فإنّنا سنأخذ أبسط حالة، وهي الرابطة التي تمسك ذرتي هيدروجين مع بعضهما بعضًا لتشكّل جزيء الهيدروجين H_2. تُعدّ طريقة أو آلية عمل هذه الرابطة بصورة رئيسة هي ذاتها للروابط التساهمية الأخرى. فعندما تقترب ذرتا هيدروجين من بعضهما بعضًا، تبدأ سحابتاهما الإلكترونيتان بالتداخل، لتستطيع عندها الإلكترونات من كلّ ذرة "بالدوران" حول النواتين. (وهذا ما يدعى أحيانا "مشاركة" الإلكترونات) . إذا كان كلّ من الإلكترونين في الحالة الأرضية $(n = 1)$ حسب ذرته، فهناك احتمالان هما أن يكون غزلهما (الفصل 28) متوازيين (كلاهما إلى الأعلى أو إلى الأسفل). وفي كلتا الحالتين، فإنّ الغزل الكلي $S = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ ، أو أنّ غزلهما يمكن أن يكون متعاكسا $(m_s = +\frac{1}{2})$ لأحدهما، و $m_s = -\frac{1}{2}$ للآخر). فيكون الغزل الكلي $S = 0$. وسنرى الآن أنّ الرابطة قد تكونت للحالة $S = 0$ فقط، عندما يكون الغزل متعاكسًا.

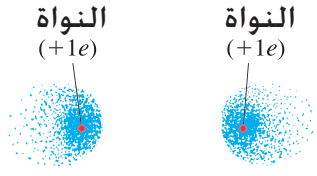
أولاً، سنأخذ بالحسبان الحالة $S = 1$، عندما يكون الغزل متشابها. لا يمكن للإلكترونين أن يكونا عند أخفض حالة طاقة وملتصقين بالذرة ذاتها؛ لأنهما سيمتلكان عندئذ أعداداً كمية متماثلة مخالفين بذلك مبدأ الاستبعاد، الذي يخبرنا بأنه لا يمكن لإلكترونين أن يشغلا الحالة الكمية نفسها. وإذا حصل إلكترونان على الأعداد الكمية نفسها ، فيجب أن يكونا مختلفين بطريقة ما – وتحديدا، أن يكونا في مكانين مختلفين في الفضاء (فعلى سبيل المثال، أن يكونا ملتصقين بذرتين مختلفتين). وعندما تقترب الذرتان من بعضهما بعضا، فستبقى إلكتروناتهما بعيدة عن بعضها كما هو مبين في التوزيع الاحتمالي الظاهر في (الشكل 29 – 1). وعندها ستُطرد النواتان المشحونتان بشحنتين موجبتين بعضهما بعضا، ولن تتشكّل عندئذٍ أيّ رابطة.

وعند الحالة $S = 0$ -على الوجه الآخر- يكون الغزل متعاكسا، ويكون الإلكترونان في حالتين كميتين مختلفتين بسبب ذلك (m_s مختلفة، $+\frac{1}{2}$ لواحدة و $-\frac{1}{2}$ للأخرى). ولذلك، ستستطيعان الاقتراب من بعضهما. وفي هذه الحالة، سيبدو التوزيع الاحتمالي كما في (الشكل 29 – 2)؛ تستطيع الإلكترونات أن تقضي معظم وقتها بين النواتين. والنواتان المشحونتان بشحنتين موجبتين ستنجذبان إلى السحابة الإلكترونية المشحونة بشحنة سالبة الموجودة بينهما، وهذا هو التجاذب الذي يمسك الذرتين مع بعضهما لتشكيل الجزيء؛ وهذه هي *الرّابطة التّساهميّة*.

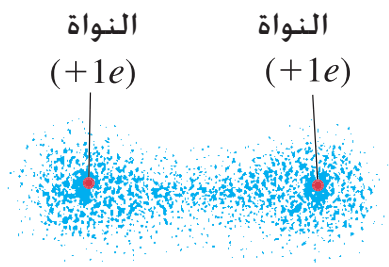
التوزيعان الاحتماليان (للشكلين 29 – 1، و 29 – 2) من الممكن أن يفهما بشكل أفضل على أساس موجي. وما يتطلبه مبدأ الاستبعاد أنّه عندما يتشابه الغزل، سيكون هناك تداخل هدّام بين دوال الإلكترونات الموجية في المنطقة بين الذرتين. ولكن عندما يتعاكس الغزل، يحدث تداخل بناء في المنطقة بين الذرتين، تنتج منه كمية كبيرة من الشحنة السالبة هناك. ويمكن القول حينئذٍ بأنّ رابطة تساهمية قد تكونت نتيجة للتداخل البناء بين دوال الإلكترونات الموجية في الفضاء بين الذرتين، وكذلك للتجاذب الكهروستاتيكي بين النواتين الموجبتين، وتركيز الشحنات السالبة بينهما.

ويمكن فهم أسباب تشكل الرابطة من وجهة نظر الطاقة؛ فعندما تقترب ذرتا H من بعضهما، مع كون غزل إلكتروناتهما متعاكسا، فإنّ الإلكترونات ستشغل الحيز نفسه في الفضاء، كما نوقش سابقًا. وهذا يعني أنّ كلّ إلكترون يستطيع الآن التحرّك بحرية في فضاء الذرتين بدلا من داخل حيّز إحداهما فقط. ولأنّ كلّ إلكترون يشغل الآن فضاءً أكبر، فهو مرتبط بالموضع بدرجة أقل بكثير. وبسبب أنّ كلّ إلكترون له "فلك" أكبر، فإنّ طول موجته λ يستطيع أن يكون أكبر أيضا. لذا، فإنّ زخمه $p = h/\lambda$ (الشكل 27 – 8) يمكن أن يكون أقلّ. ومع هذا الزّخم الأقلّ، تصبح طاقة كلّ إلكترون أقلّ عند اتحاد الذرتين مقارنة بطاقته عندما يكونان منفصلَيْن؛ أي أنّ للجزيء طاقة أقلّ من تلك التي للذرتين المنفصلتين. وعليه، فهو مستقر أكثر. ومن الضروري إضافة طاقة بمقدار معين لكلّ جزيء H_2 لينفصل إلى ذرتين من H منفصلتين. ولهذا، فإنّ جزيء H_2 يشكّل كيانًا مستقرًا. وهذا ما نعنيه برابطة. وتُدعى الطاقة الضرورية لكسر رابطة **"طاقة الرّابطة"**، أو **"طاقة الرّبط"**، أو **"طاقة التّفكّك"**. وطاقة ربط جزيء الهيدروجين، H_2، تساوي 4.5 eV.

رابطة تساهمية



الشكل 29 – 1 توزيع إلكتروني احتمالي (سحابة إلكترونية) لذرتي H عندما يكون غزلهما متشابها $(S = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1)$.



الشكل 29 – 2 توزيع إلكتروني احتمالي (سحابة) حول ذرتي H عندما يكون غزلهما متعاكسا $(S = 0)$. وفي هذه الحالة، تتشكل رابطة بسبب تجاذب النواتين الموجبتين إلى تركيز الشحنات السالبة بينهما، وهذا جزيء هيدروجين H_2.

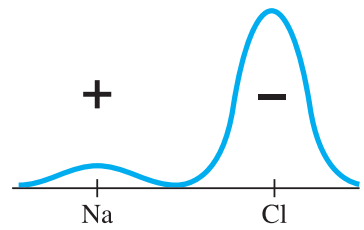
تفسير الطاقة للرابطة

طاقة الرابطة

الرّوابط الأيونية

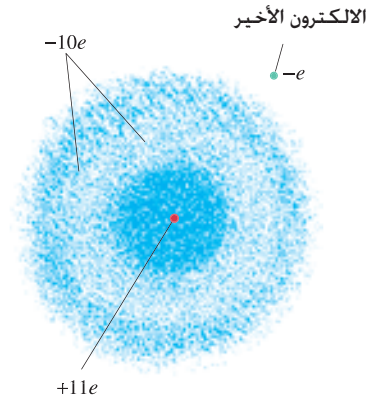
الروابط الأيونية

تعدّ الرابطة الأيونية -إلى حدّ ما- حالة خاصة من الرابطة التساهمية. وبدلًا من المشاركة المتساوية بالإلكترونات، تصبح المشاركة غير متساوية. وعلى سبيل المثال، في كلوريد الصوديوم (NaCl)، يقضي الإلكترون الخارجي للصوديوم معظم وقته تقريبًا حول الكلور (الشّكل 29 – 3). وتكتسب ذرة الكلور شحنة سالبة صافية كنتيجة للإلكترون الإضافي، في حين تترك ذرة الصوديوم مع شحنة موجبة صافية. أمّا التجاذب الكهروستاتيكي بين هاتين الذرتين المشحونتين فيبقيهما معًا. وتسمى الرّابطة الناجمة بالرّابطة الأيونية لأنها تشكّلت بواسطة التجاذب بين الأيونين (Na^+ و Cl^-). ولكي نفهم الرابطة الأيونية؛ يجب أن نفهم سبب قضاء إلكترون الصوديوم الإضافي الكثير من وقته حول ذرة الكلور. فعلى الرّغم من كلّ هذا، فإنّ ذرة الكلور متعادلة، فلماذا إذن ستجذب إلكترونًا آخر؟

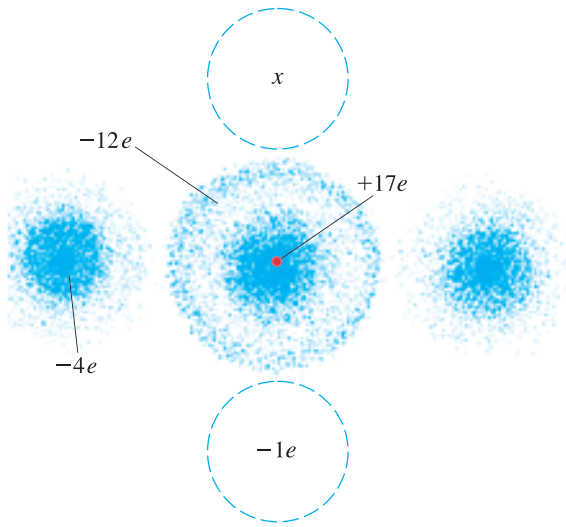


الشكل 29 – 3 توزيع احتمالي للإلكترون الأخير للصوديوم في NaCl.

وتقع الحل في التوزيعات الاحتمالية للذرتين المتعادلتين. يحتوي الصوديوم على 11 إلكترونًا؛ 10 منها في قشور مغلقة كروية متماثلة (الشّكل 29 – 4). في حين يقضي الإلكترون الأخير معظم وقته خارج هذه القشور المغلقة. ولأنّ القشور المغلقة لها شحنة صافية مقدارها $-10e$ وشحنة النواة $+11e$، فإنّ الإلكترون الخارجي الأبعد في الصوديوم "يشعر" بتجاذب صافٍ ناجٍ من $+1e$. وهو غير مربوطٍ بقوة كبيرة. وعلى الجانب الآخر، فإنّ 12 من إلكترونات الكلور الـ 17 تشكل قشورًا مغلقة، أو قشورًا فرعية (تتوافق مع $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$). وهذه الإلكترونات الـ 12 تشكل درعًا كرويًا حول النواة. أما الإلكترونات الخمسة الأخرى فهي في حالات $3p$ حيث توزيعاتها الاحتمالية ليست متماثلة كرويًا، ولها شكل مشابه لحالات $2p$ في الهيدروجين المبينة في (الشكلين 28 – 9 ب و جـ). إنّ 4 من إلكترونات $3p$ هذه يمكن أن تمتلك توزيعًا على هيئة حلقة، "مبرومة الشكل" متماثلًا حول محور z، كما هو مبين في (الشّكل 29 – 5). أمّا الإلكترون الخامس، فيمكن أن يمتلك توزيعًا "عموديّ الشكل" كما في (الشّكل 28 – 9 ب) عندما $m_l = 0$، والذي يبين في (الشّكل 29 – 5) في خطوط متقطعة فقط لأنّه نصف ملوء. أي أنّ مبدأ الاستبعاد يسمح بوجود إلكترون واحد إضافي في هذه الحالة (وسيمتلك غزلًا معاكسًا للإلكترون الموجود هناك سابقًا). وإذا حصل أنّ إلكترونًا إضافيًا –ولنقل من ذرة Na كان في الجوار، فيمكن له أن يكون في هذه الحالة، ولنقل عند نقطة x في (الشكل 29 – 5). ويمكن أن يشعر بتجاذب ناجٍ من ما يعادل $+5e$؛ لأنّ شحنة النواة $+17e$ قد حجبت جزئيًا عند هذه النقطة بواسطة 12 إلكترونًا داخليًا فقط. وعليه، فإنّ الإلكترون الخارجي لذرة الصوديوم سيجذب بقوة أكبر بواسطة $+5e$ من ذرة الكلور مقارنة مع $+1e$ من قِبَل ذرته نفسها. إنّ هذا، بالإضافة إلى الجذب القوي بين الأيونين عند بقاء الإلكترون الإضافي تحت سيطرة Cl^-، ينتج توزيع الشحنات في (الشّكل 29 – 3)، وبالتالي تتكون الرابطة الأيونية.



الشكل 29 – 5 في ذرة صوديوم متعادلة، تحجب الإلكترونات العشرة الداخلية النواة، فينجذب الإلكترون الخارجي الوحيد بواسطة شحنة صافية مقدارها $+1e$.

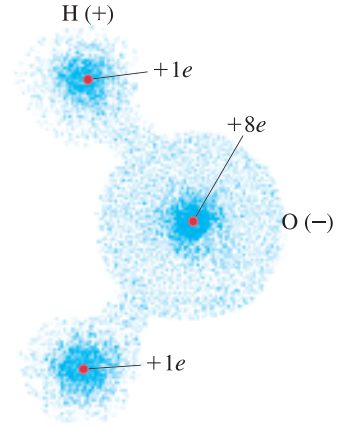


(الشكل 29 – 5) ذرة كلور متعادلة. $+17e$ في النواة، تحجب بواسطة 12 إلكترونًا في القشور الداخلية والقشور الفرعية. أربعة من إلكترونات $3p$ الخمسة مبينة في سحب على هيئة حلقة (دونات)، والخامس في سحابة (خطٌ مقطع) مركزة حول محور z (رأسيًا). أما الإلكترون الإضافي عن x فسينجذب بواسطة شحنة صافية يمكن أن تصل إلى $+5e$.

الخاصّيّة الأيونيّة الجزئيّة للرّوابط التّساهميّة

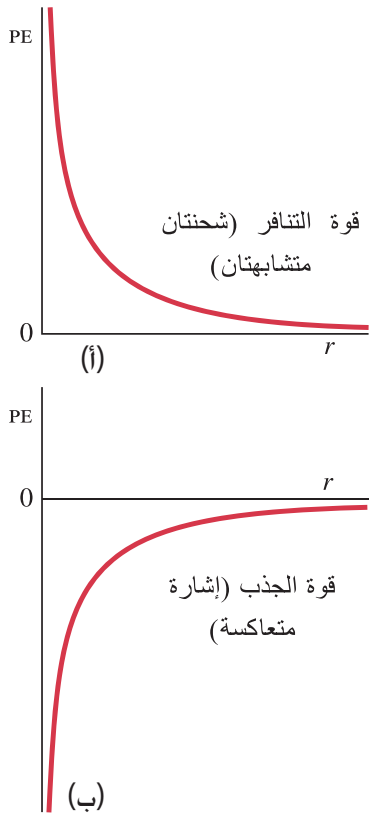
تحدث الروابط التساهمية النقية التي يتم تقاسم الإلكترونات خلالها بالتساوي في الجزيئات المتماثلة مثل H_2، و O_2، و Cl_2. وعندما تكون الذرات المعنية مختلفة عن بعضها، فمن الطبيعي أن تجد الإلكترونات المشتركة تميل إلى إحدى الذرتين أكثر منها إلى الأخرى. والحالة المتطرفة هي الرابطة الأيونية. أمّا في الحالات المتوسطة، فيقال إنّ الرابطة التساهمية لها خاصية أيونية جزئية. والجزيئات نفسها **قطبية**: أي أنّ جزءًا واحدًا (أو أجزاء) من الجزيء له شحنة صافية موجبة، أمّا الأجزاء الأخرى، فلها شحنة صافية سالبة. ومثال على ذلك، جزيء الماء H_2O (الشّكل 29 – 6). ومن المتوقع إيجاد الإلكترونات المشتركة بدرجة أكبر حول ذرة الأكسجين وليس حول ذرتي الهيدروجين.

الجزيئات القطبية



الشكل 29 – 6 جزيء الماء H_2O قطبي.

السبب مشابه لذلك الذي نوقش سابقًا والمتعلق بالروابط الأيونية. للأكسجين ثمانية إلكترونات $(1s^2 2s^2 2p^4)$ (أربعة منها تشكل لبًّا كرويًّا متماثلًا، وأمّا الأربعة الأخرى فيمكن أن تمتلك، على سبيل المثال، توزيعا مبروم الشّكل). إنّ التوزيع العمودي الشّكل على محور z مثل ذلك المبين مقطعا في (الشكل 29 – 5) يمكن أن يكون خاليا، وبذلك، فإنّ إلكترونات ذرة الهيدروجين يمكن أن تنجذب بواسطة شحنة صافية مقدارها $+4e$. وهي في الوقت نفسه أيضًا منجذبة بواسطة نواتي H، وهي بذلك تدور جزئيًّا حول ذرتي H كما تدور حول ذرة O. والتأثير الصافي هو أنّ هناك شحنة موجبة صافية على كلّ ذرة H (أقلّ من $+1e$)، بسبب قضاء الإلكترونين جزءًا من وقتهما فقط هناك. وهناك شحنة سالبة صافية على ذرة O.



الشكل 29 – 7 طاقة الوضع كدالة في البعد لشحنتين نقطيتين لـ: (أ) إشارات متشابهة. (ب) إشارات متعاكسة.

* 29-2 رسومات توضيحيّة لطاقة ـ وضع الجزيئات

من المفيد أن نحلل التفاعل بين جسمين – ولنقل بين ذرتين أو جزيئين – مستعينا برسم توضيحي، مخطط طاقة وضع مقابل المسافة الفاصلة.

وللحالة البسيطة للشحنتين النقطيتين q_1، و q_2، تعطى PE بواسطة (نجمع المعادلتين 17 – 2 و 17 – 5 مجموعتين)

$$\mathrm{PE} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r}$$

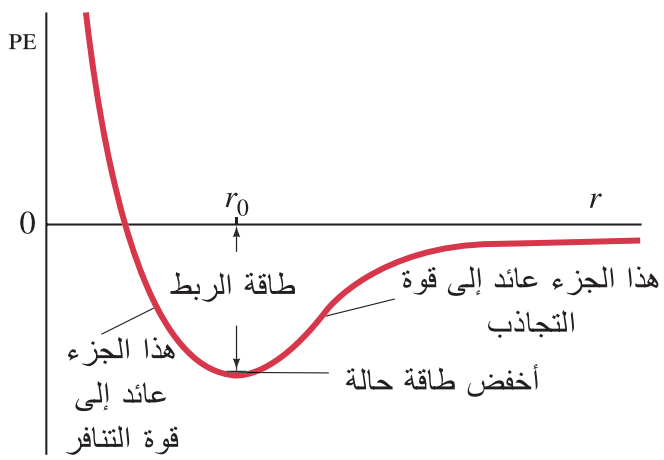
وتمثل r المسافة الفاصلة بين الشحنتين، والثابت $(1/4\pi\epsilon_0)$ يساوي $9.0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$. وإذا كان للشحنتين الإشارة نفسها، فإنّ PE موجبة لقيم r جميعها، ويصبح الرّسم البياني لـ PE مقابل r في هذه الحالة كما هو مبين في (الشكل 29 – 7أ). وتكون القوة طاردة. (للشحنات الإشارة نفسها) فيزداد ارتفاع المنحنى كلما قلت r، ويعدّ هذا منطقيًّا؛ لأنّ الشغل قد بذل لجلب الشحنتين إلى بعضهما، ونتيجة لذلك، تزداد طاقة وضعهما. إلى جانب أنه إذا كانت الشحنتان *متعاكستين* في الإشارة، فإنّ PE تصبح سالبة لأنّ الناتج $q_1 q_2$ سالب. وتصبح القوة جاذبة في هذه الحالة، ويظهر الرسم البياني لـ PE مقابل r كما هو مبين في (الشكل 29 – 7ب)، لتصبح PE *سالبة* أكثر كلّما قلت r.

والآن، سننظر إلى الرسم التوضيحي لطاقة الوضع لتشكيل رابطة تساهمية، كتلك التي لجزيء الهيدروجين، H_2. تم تخطيط طاقة الوضع لذرة H واحدة بوجود الأخرى في (الشكل 29 – 8). وابتداءً من r كبيرة، تقل PE كلما اقتربت الذرتان من بعضهما؛ بسبب تركيز الإلكترونات بين النواتين (الشكل 29 – 2). فيحدث عندئذٍ تجاذب. ومع هذا، فعند مسافات قصيرة جدًا، "تحشر" الإلكترونات إلى الخارج – لعدم وجود متسع لها بين النواتين. ودون الإلكترونات بين النواتين، ستشعر كلّ منهما بقوة تنافر بسبب الأخرى. لذا، فإنّ المنحنى سيرتفع مع نقصان قيمة r أكثر.

وهناك مسافة فاصلة مثلى بين الذرتين، r_0 في (الشكل 29 – 8)، تصل قيمة الطاقة عندها إلى أدنى قيمة ممكنة.

طاقة ربط

وهذه نقطة أعلى اتزان لجزيء الهيدروجين، وتمثل r_0 متوسط المسافة الفاصلة بين الذرتين في جزيء H_2. وتمثل أخفض نقطة في هذه "البئر" طاقة الربط،* كما هو مبين. وهذا مقدار الطاقة الضروري إضافته إلى النظام لفصل الذرتين إلى مالا نهاية، حيث PE = 0. ولجزيء H_2، فإنّ طاقة الربط هي 4.5 eV، و $r_0 = 0.074$ nm تقريبا.



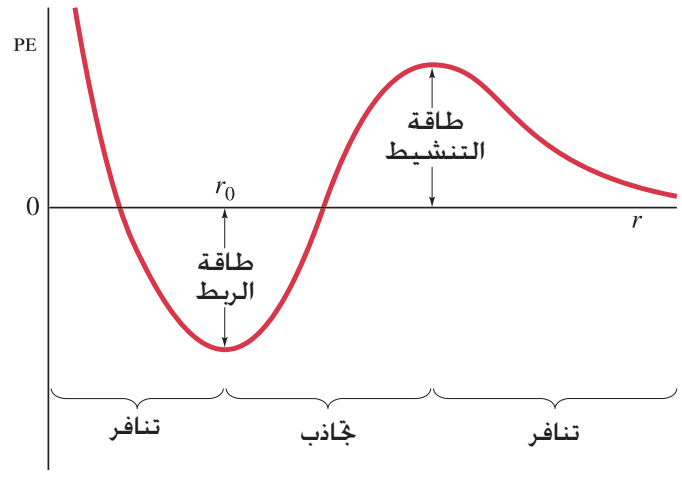
الشكل 29 – 8 رسم توضيحي لطاقة وضع جزيء H_2. تمثل r المسافة الفاصلة بين ذرتي H. طاقة الربط (فرق الطاقة بين PE = 0 وأخفض طاقة حالة قرب قعر البئر) هي 4.5 eV، و $r_0 = 0.074$ nm.

ولروابط عديدة، فإنّ منحنى طاقة الوضع له الهيئة المبينة في (الشكل 29 – 9). ولا تزال هناك مسافة مثلى r_0 يكون الجزيء عندها مستقرا. ولكن عندما تقترب الذرات من مسافات بعيدة، فإنّ القوة الابتدائية تكون قوة تنافر بدلًا من قوة تجاذب. ولذلك، فإنّ الذرات لا تتفاعل تلقائيًّا. وبدلًا من هذا، يجب حقن النظام ببعض الطاقة الإضافية لدفعه فوق " السنام" (أو الحاجز) في الرسم التوضيحي لطاقة الوضع. وهذه الطاقة الضرورية تدعى **طاقة التنشيط** (*Activation Energy*).

طاقة تنشيط

إنّ المنحنى في (الشكل 29 – 9) أكثر عمومية بكثير من ذلك الذي في (الشكل 29 – 8). وطاقة التنشيط تعكس غالبًا الحاجة لكسر روابط أخرى، قبل أن تصنع الرابطة قيد المناقشة. وعلى سبيل المثال، لتكوين الماء من جزيئي O_2، و H_2؛ يجب أولًا كسر جزيئي H_2، و O_2 إلى ذراتهما H، و O بإضافة طاقة، وهذا ما تمثله طاقة التنشيط.

* لا تتطابق طاقة الربط تمامًا مع أسفل منحنى PE، ولكن مع أخفض طاقة حالة، وهي أعلى بقليل من تلك، كما هو مبين في (الشكل 29 – 8).



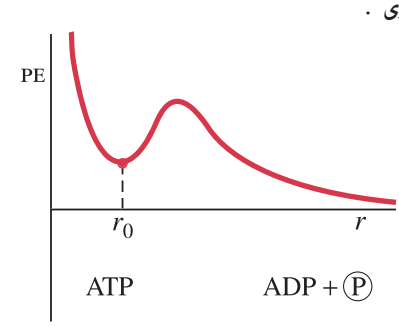
الشكل 29 – 9 رسم توضيحي لطاقة الوضع لرابطة تتطلب طاقة التنشيط.

وعندها يمكن لذرات H . و O أنّ تتحد لتشكّل H_2O مع إطلاق قدر هائل من الطاقة أكثر من الذي أضيف في البداية. ويمكن تزويد طاقة التنشيط الابتدائية بفعل شرارة كهربائية على مزيج من H_2 و O_2 لتكسير عدد قليل من هذه الجزيئات إلى ذرات H و O. كما أنّ إطلاق الطاقة المتفجرة الناتجة عند إدماج هذه الذرات لتشكّل H_2O يزود وبسرعة طاقة التنشيط الضرورية للتفاعلات اللاحقة. لذلك تتكسر جزيئات إضافية من H_2، و O_2 وتندمج مرة أخرى ليتشكّل H_2O .

ويمكن للرسوم التوضيحية لطاقة الوضع للروابط الأيونية أن تحظى بأشكال متشابهة. فعلى سبيل المثال، في NaCl، تجذب أيونات Na^+ و Cl^- بعضها بعضًا من مسافات أكبر بقليل من r_0، ومع هذا، فإنّ تداخل قشور الإلكترونات الداخلية عند المسافات الأقصر ينمي التنافر. لذا، فإنّ الذرتين تكونان أكثر استقرارًا عند مسافة فاصلة متوسطة ما، r_0، وغالبًا فإنّ هناك طاقة تنشيط ما.

تطبيق الفيزياء
وطاقة في الخليةATP

وفي بعض الأحيان، تبدو طاقة الوضع لرابطة ما كتلك المبينة في (الشكل 29 – 10). وفي هذه الحالة، فإنّ طاقة الجزيء المترابط، عند مسافة فاصلة r_0، هي أكبر منها عند غياب الرابطة ($r = \infty$). أي أنّ هناك حاجة إلى طاقة مُدخلة لتتشكّل الرّابطة (ولذلك فإنّ طاقة الربط سالبة)، وهناك طاقة تتحرر عندما تكسر الرابطة. إنّ رابطة كتلك تكون مستقرة فقط بسبب وجود حاجز طاقة التنشيط. وهذا النوع من الروابط مهم في الخلايا الحية، حيث يمكن تخزين طاقة بكفاءة في هذه الروابط في جزيئات معينة، وخصوصا في ATP (أدينوسين ثلاثي الفوسفات).
الرابطة التي تربط آخر مجموعة فوسفات رُمِزَ إليها Ⓟ في (الشكل 29 – 10) مع بقية الجزيء (ADP، ويعني أدينوسين ثنائي الفوسفات، لأنها تحتوي على وحدتين من الفوسفات فقط) لها PE على الهيئة المبينة في (الشكل 20 – 10)؛ الطاقة مختزنة في هذه الرابطة. وعند انكسار الرابطة ($ATP \rightarrow ADP + Ⓟ$)، تطلق طاقة يمكن استعمالها من أجل "إحداث" تفاعلات كيميائية أخرى .



الشكل 29 – 10 رسم توضيحي لطاقة وضع لتشكيل ATP من ADP وفوسفات (Ⓟ).

وفي الخلايا الحية، تمتلك كثيرٌ من التفاعلات الكيميائية طاقات تنشيطية غالباً ما تكون بمقدار عدة eV. وحواجز طاقة كهذه، ليس من السهل التغلب عليها داخل الخلية. وهنا يأتي دور الأنزيمات التي تعمل كمحفزات (*Catalysts*)، وهذا يعني أنّها تعمل على تخفيض طاقة التنشيط لتجعل التفاعلات تحدث. ودون هذه المحفزات، لم يكن بالإمكان حدوث ذلك؛ لأنّ الأنزيمات تعمل على تشويه سحب الترابط الإلكترونية، فيُصبح تكسير الروابط الابتدائية أمرا سهلا.

تعمل الأنزيمات على تخفيض طاقة التنشيط

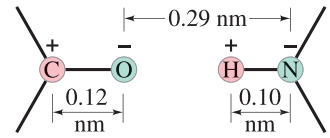
* 3-29 الروابط (فان دير فالز) الضعيفة

ما إن تتشكل الرابطة بين ذرتين أو أيونين، يصبح من الطبيعي أن تضاف الطاقة لكسر هذه الرابطة وفصل الذرات. وكما ذكر في (البند 29 – 1)، تُدعى هذه الطاقة طاقة الرابطة أو طاقة الربط. إنّ طاقة الربط للرابطتين التساهمية والأيونية تتراوح من 2 eV إلى 5 eV. وتدعى الرابطتان اللتان تمسكان الذرات مع بعضها بعضاً لتشكل جزيئات، غالباً **روابط قوية** لتمييزها عمّا يُسمّى "روابط ضعيفة". يعدّ هذا المصطلح **رابطة ضعيفة**، كما استخدمناه هنا، وهو يُشير إلى الالتصاق بين الجزيئات بسبب التجاذب الكهروسكوني البسيط – كالذي بين الجزيئات القطبية (وليس الجزيء القطبي ذاته، وهي رابطة قوية). إنّ قوةَ الالتصاق أقلُّ بكثير من الروابط القوية. كما أنّ طاقات الربط في المدى المحصور بين 0.04 eV و 0.3 eV ولهذا، فإنّها تُدعى "روابط ضعيفة".

تنشأ الروابط الضعيفة بشكل عام من التجاذب بين الثناقطبيات. (شحنتان نقطيتان متساويتان Q، مختلفتا الإشارة، تفصل بينهما مسافة l، وتسميان **ثناقطبي كهربائي**، كما رأينا في الفصل 17). وعلى سبيل المثال، يبين (الشكل 29 – 11) جزيئين، لهما عزما ثناقطبي دائمين، يجذب أحدهما الآخر. وبجانب روابط "**الثناقطبي – ثناقطبي**" هذه، يمكن أن يكون هناك أيضا **روابط ثناقطبي – ثناقطبي** محفزة، والتي يمكن من خلالها لجزيء قطبي ذي عزم ثناقطبي دائم أن يحفز عزم ثناقطبي في جزيئات أخرى متعادلة كهربائيّا، تماما مثلما تستطيع شحنة وحيدة من تحفيز فصل الشحنات في جسم قريب (انظر الشكل 16 – 7). ويمكن أن يكون هناك أيضًا تجاذب بين جزيئين غير قطبيين، بسبب تحرك إلكتروناتهما في فضائهما؛ وعند أيّ لحظة ربّما تكون هناك مرحلة فصل شحنات عابرة، تولد تجاذبًا ضعيفًا. وتُدعى هذه الروابط الضعيفة جميعها **روابط فان دير فالز**، وتُدعى هذه القوى **قوى فان دير فالز**. وتظهر طاقة الوضع المعنية في (الشكل 29-8)، وتتغير تبعًا للعلاقة $1/r^6$.

وعندما تكون إحدى الذرات في **رابطة ثناقطبي – ثناقطبي** هي الهيدروجين، كما في (الشكل 29 – 11)، فعندها تدعى **رابطة هيدروجينية**. وهي بشكل عام (الرابطة الهيددروجينية) أقوى الروابط الضعيفة؛ لأنّ الهيدروجين أصغر الذرات التي يمكن الاقتراب منها. وللروابط الهيدروجينية أيضًا ميزة "تساهيمة" جزئية، وهي أنّ الإلكترونين بين الثناقطبيين يمكن التشارك فيهما خلال مدى قصير، لتتشكل رابطة قوية تدوم فترة أطول.

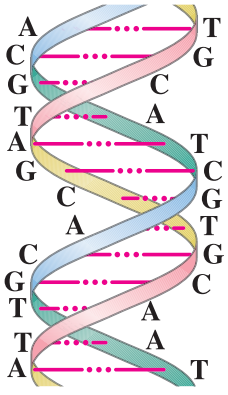
إنّ الروابط الضعيفة مهمة في السوائل والمواد الصلبة خاصة عند اختفاء الروابط القوية (انظر البند 29 – 5). وهي أيضًا مهمّةً جدًّا لفهم أنشطة الخلايا، مثل شكل اللولبي المزدوج DNA (الشكل 29 – 12)، واستنساخ DNA (انظر البند 16 – 11). إنّ متوسط الطاقة الحركية للجزيئات في خلية حية عند درجات الحرارة الطبيعية ($T \approx 300\,\text{K}$) حوالي $\frac{3}{2}kT \approx 0.04\,\text{eV}$ و هي تقع ضمن قيم الروابط الضعيفة. وهذا يعني أنّ رابطة ضعيفة ما جاهزة لتتكسر عن طريق التصادمات الجزيئية فقط. لذا، فإنّ الروابط الضعيفة ليست دائمة تمامًا ؛ بل إنّها تلتصق لفترات قصيرة، وهذا يساعدها على القيام بأدوار معينة في الخلية.



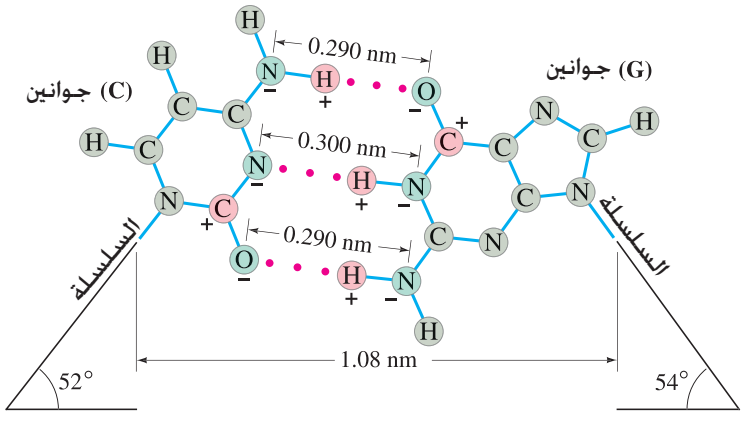
الشكل 29 – 11 الثناقطبية $C^+—O^-$ و $H^+—N^-$ تجذب بعضها بعضا. (هذه التثناقطبية يمكن أن تكون جزءا من جزيئات سيتوساين وجواناين على سبيل المثال، (الشكل 19 - 12). الشحنتان + و - نمطيّا تمتلكان قيمًا هي أجزاء من e.

تطبيق الفيزياء

DNA



(أ)



(ب)

الشكل 29 – 12 (أ) جزء من اللولبي المزدوج DNA. تمثل النقاط الحمراء روابط هيدروجينية بين الحبلين. (ب) منظر "قريب": سايتوساين. (جـ) جواناين. (د) جزيئات على حبلين مختلفين من اللولبي المزدوج DNA ضمت لبعضها بعضا بواسطة روابط هيدروجينية (نقاط حمراء) مرتبطة بـ H^+ على جزيء واحد منجذب إلى N^- أو $C^+—O^-$ من جزيء على السلسلة المجاورة. انظر أيضا إلى (البند 16 - 11 والشكلين 16 - 14، و 16 - 45).

وعلى الجانب الآخر، فإنّ الروابط القوية – تلك التي تشد الجزيئات إلى بعضها– غالباً لا تكسر أبداً ببساطة بتأثير التصادمات الجزيئية. لذا، فهي دائمة نسبيّا. ويمكن لها أن تتكسر بعمل كيميائي (وحتى عمل روابط أقوى) وهذا عادة ما يحدث في الخلية بمساعدة أنزيم ما، والذي هو جزيء بروتين.

المثال 29-1 طاقة النويد

احسب طاقة الوضع بين الثناقطبي C═O لثيامين، والثناقطبي H—N لأدانين، مفترضًا أنّ الثناقطبين قد اصطفا كما هو مبين في (الشكل 29 – 11). حسابات عزم الثناقطبي (انظر الجدول 17 – 2) تعطي

$$q_{\mathrm{H}} = -q_{\mathrm{N}} = 0.19e = 3.0 \times 10^{-20}\,\mathrm{C}$$

و

$$q_{\mathrm{C}} = -q_{\mathrm{O}} = 0.41e = 6.6 \times 10^{-20}\,\mathrm{C}$$

النهج : نريد إيجاد طاقة الوضع للشحنتين في ثناقطبي واحد والناجمة من الشحنتين في الآخر، وسيكون هذا مساويًا للشغل الضروري لفصلهما بعيدا عن بعضهما إلى مالا نهاية. طاقة الوضع PE لشحنة ما q_1 في وجود شحنة q_2 هي

$$PE = k\frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

حيث $k = 9.0 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2}$ (انظر المعادلتين 17 – 2، و 17 – 5).

الحلّ: ستتكون طاقة الوضع (باستخدام الرمز U) من أربعة حدود هي :

$$U = U_{\mathrm{CH}} + U_{\mathrm{CN}} + U_{\mathrm{OH}} + U_{\mathrm{ON}}$$

حيث U_{CH} تعني طاقة الوضع لـ C في وجود H، وهكذا للحدود الأخرى. ليس لدينا حدود تعود إلى C و O ، أو N و H، على افتراض أنّ الثناقطبيين كميتان مستقرتان. وعندئذٍ

$$U = k\frac{q_C q_H}{r_{CH}} + k\frac{q_C q_N}{r_{CN}} + k\frac{q_O q_H}{r_{OH}} + k\frac{q_O q_N}{r_{ON}}$$

وباستخدام المسافات المبينة في (الشكل 29 – 11)، نحصل على

$$U = (9.0 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2})\left(\frac{(6.6)(3.0)}{0.31} + \frac{(6.6)(-3.0)}{0.41} + \frac{(-6.6)(3.0)}{0.19} + \frac{(-6.6)(-3.0)}{0.29}\right)\frac{(10^{-20}\,\mathrm{C})^2}{(10^{-9}\,\mathrm{m})}$$

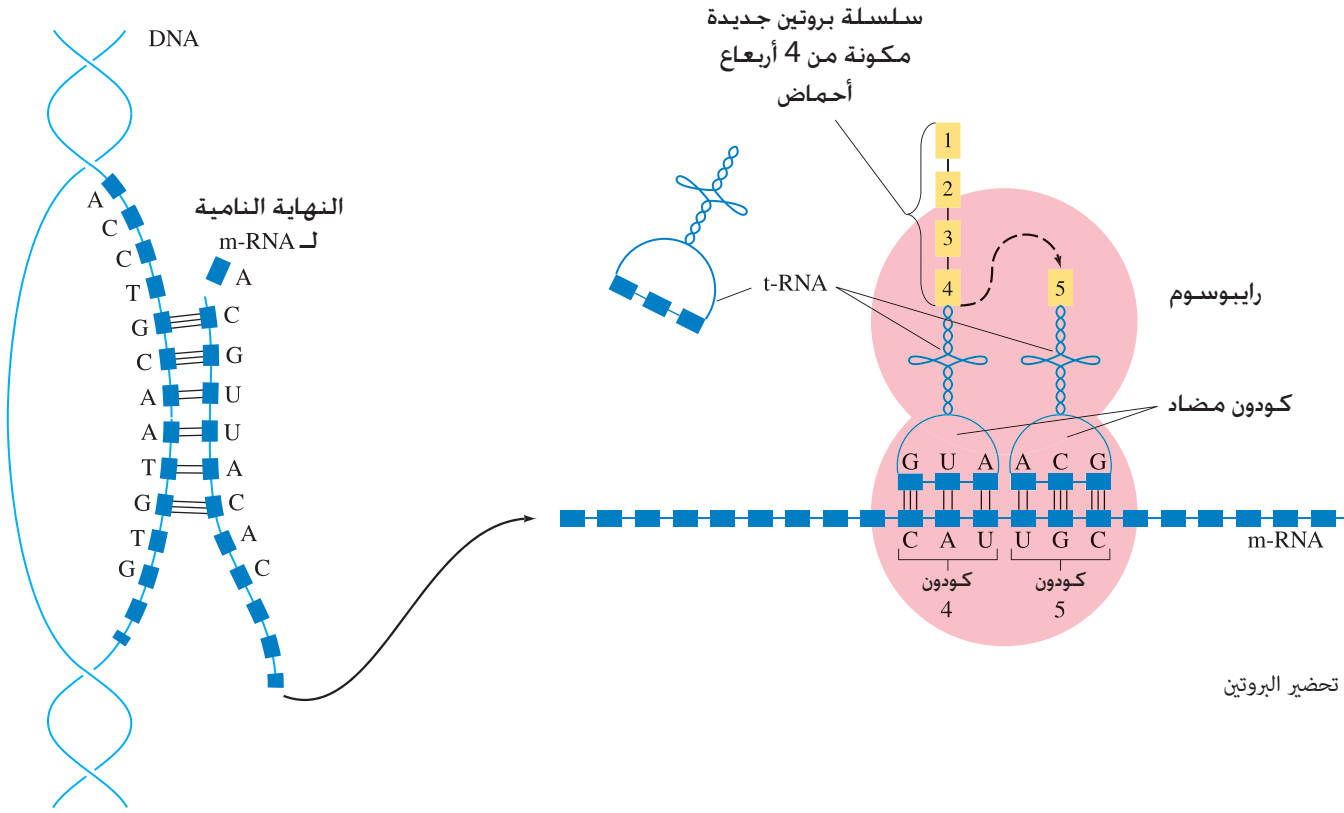
$$= -1.83 \times 10^{-20}\,\mathrm{J}$$

$$= -\frac{(1.83 \times 10^{-20}\,\mathrm{J})}{(1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{J/eV})} = -0.11\,\mathrm{eV}$$

طاقة الوضع PE سالبة، وهذا يعني أنّ 0.11 eV من الشغل (أو الطاقة المدخلة) ضرورية لفصل الجزيئات. أي أنّ طاقة ربط هذه الرابطة "الضعيفة" أو الهيدروجينية هي 0.11 eV. وهذا تقديري، بالطبع، لأنّ الشحنات الأخرى في الجوار سيكون لها تأثير أيضًا.

تحضير البروتين

تعدّ الروابط الضعيفة، خصوصًا الروابط الهيدروجينية، أساسية لعملية تحضير البروتين. تخدم البروتينات كأجزاء تركيبية في الخلية، وكأنزيمات لتحفز التفاعلات الكيميائية الضرورية لنمو الكائن الحي ونجاته. يتكون جزيء البروتين من سلسلة، أو عدة سلاسل من الجزيئات الصغيرة المعروفة *بالحموض الأمينيّة*.



الشكل 29 – 13 تحضير البروتين

تطبيق الفيزياء

تحضير البروتين

يبيّن الرّسم التّوضيحيّ في (الشّكل 29 – 13) النموذج المعياري لكيفية اتصال الحموض الأمينية بعضها ببعض بالترتيب الصحيح لتشكيل جزيء بروتيني. وهي تبدأ عند اللولب الثنائي DNA، حيث إنّ كلّ جين على الكرموسوم يحتوي المعلومات اللازمة لإنتاج أحد البروتينات. وترتيب القواعد الأربع، A، و C، و G، و T يزود "الشفرة" و "الشفرة الجينية" لترتيب الحموض الأمينيّة في البروتين. أوّلًا، يقوم اللولب الثنائي DNA بالامتداد، ويتم تحضير جزيء جديد "كقالب" يدعى مرسال RNA (m–RNA) باستخدام حبل واحد من DNA. أما m–RNA فهو جزيء سلسلة يحتوي على أربع قواعد مختلفة، تشبه قواعد DNA مع استبدال الثيامين (T) ليحلّ بدلا منه جزيء مشابه له يُدعى جزيء يوارسيل (U). في (الشكل 29 – 13)، تم إضافة C إلى سلسلة m–RNA النامية بالطريقة نفسها التي ينسخ DNA بها نفسه (الشكل 16 – 45)، و A المنجذبُ والمُمسكُ فيه قريبًا من T في سلسلة DNA بواسطة القوّة الكهروستاتيكية، يتمّ لصقه بعد فترة قصيرة بـ C بواسطة الأنزيم. أمّا ترتيب القواعد، وما ينجم عن ذلك من معلومات جينية، فتحفظ في m–RNA. وتبدأ m–RNA بالتخبط والاهتزاز في الخلية (تذكر النظرية الحركية) إلى أن تصبح قريبة من جزيئة عضوية متناهية في الصغر تُسَمّى الرايبوسوم، والتي يمكن أن تلتصق فيها بواسطة التجاذب الكهروستاتيكي (الشكل 29 – 13). وكذلك يُمسك بواسطة القوة الكهروستاتيكية مع الرايبوسوم جزيء أو جزيئان من RNA الناقل (t–RNA). وهذه الجزيئات t–RNA "تحوّل" الشفرة الجينية من قواعد النويدات إلى حموض أمينية بالطريقة التالية. فهناك جزيء t-RAN مختلف لكلّ تجمع من ثلاث قواعد. فتكون مضادات الرموز الوراثية عند أحد طرفي جزيء t-RNA "المضاد الوراثي"، وهو مجموعة من ثلاث قواعد للنويدات. وإذا توافقت القواعد الثلاث لمضادات الرموز الوراثية جميعها (بناء على G إلى C، و A إلى U) مع القواعد الثلاث "للرموز الوراثية" على m–RNA عند التصاقها بالرايبوسوم، فإنّ مضادات الرموز الوراثية ستنجذب بطريقة كهروستاتيكية إلى الرموز الوراثية لـ m–RNA وستُمْسَك هناك لفترة قصيرة. أمّا على الطرف الآخر لجزيء t–RNA فيوجد الحمض النووي المناسب. ويمتلك الرايبوسوم موقعين خاصين للالتصاق يمكن أن يلتصق فيهما جزيئان t–RNA، في حين تصل الأنزيمات حموضها الأمينية معًا لإطالة سلسلة الحمض النووي (ذات اللون الأصفر في الشكل 29 – 13). وبينما يلتصق كلّ حمض أميني بواسطة أنزيم (هناك أربعة قد تم توصيلها سابقا في (الشكل 29 – 13). والخامس على وشك التوصيل)، يتم إزالة جزيء t–RNA القديم – ربّما بواسطة تصادم عشوائي مع جزيء ما في المائع الخلوي. لينجذب بعد ذلك بقليل جزيء جديد، في حين يتحرك الرايبوسوم على امتداد m–RNA.

تقدم هذه العملية من تحضير البروتين – غالبا- كما لو أنها حدثت بطريقة عمل الساعة الدقيقة، أو أنّ كلّ جزيء قد عرف دوره تماما فذهب إلى مكانه المحدّد له. ولكن ليس هذا هو ما يحدث. إنّ قوى التجاذب بين الشحنات الكهربائية للجزيئات ضعيفة كثيرا، وتصبح ذات تأثير عندما تستطيع الجزيئات الاقتراب من بعضها فقط. وعندما يمكن تكوين عدة روابط ضعيفة. وبالفعل، إذا لم تكن الأشكال صحيحة كما يجب، فلن يكون هناك أيّ تجاذب كهروستاتيكي، وهذا هو السبب في وجود أخطاء قليلة. والواقع أنّ كون الروابط ضعيفة مهم جدّا. فلو أنها كانت قوية، فإنّ التصادمات مع الجزيئات الأخرى لن تسمح لجزيء t–RNA بالانفلات من الرايبوسوم، أو انفلات m–RNA من DNA. ولو أنها لم تكن حوادث مؤقتة، لنتج من ذلك توقف عملية الأيض تماما.

وكلما أضيف حمض نووي إلى سابقه، يزداد طول جزيء البروتين إلى أن يصبح كاملا. وحتى خلال تكونه، فإنّ هذه السلسلة ستهتز بشدة، وتتلاطم خلال محيطها الخلوي؛ ويمكننا التفكير فيها وكأنها دودة ملتوية. يمتلك جزيء البروتين مجموعات قطبية مشحونة كهربائيّا على امتداد طوله. وخلال اتخاذها أشكالا مختلفة، فإنّ قوى التجاذب الكهربائية تعمل بين أجزاء الجزيء المختلفة بالدفع باتجاه تركيب معين يكون مستقرًا تمامًا في نهاية الأمر. وكلّ نوع من البروتين له شكل خاص فيه، اعتمادا على موضع الذرات المشحونة. وفي آخر تحليل، فإنّ الشكل النهائي سيعتمد على ترتيب الحموض النووية.

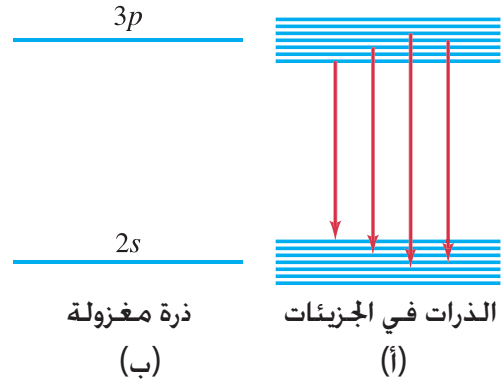
شكل البروتين

* 4-29 الأطياف الجزيئيّة

عندما تتجمع الذرات لتشكّل جزيئات، تتداخل التوزيعات الاحتمالية للإلكترونات الخارجية، فيغير هذا التفاعل من مستويات الطاقة. ومع هذا، فيمكن للإلكترونات أن تمر بانتقالات بين مستويات طاقة إلكترونية كما تفعل الذرات. وعلى سبيل المثال، يمكن لجزيء H_2 أن يمتص فوتونًا ذا تردد مناسب ليهيّج فيه أحد إلكتروناته من الحالة الأرضية إلى حالة مهيجة (مثارة). ويستطيع الإلكترون المهيّج عندئذ العودة إلى الحالة الأرضية، باعثا فوتونا. وطاقة الفوتونات المنبعثة بواسطة الجزيئات لها المقدار المنبعث نفسه من الذرات؛ في العادة 1 إلى 10 eV.

ويتاح للجزيئات، وليس للذرات، مستويات طاقة إضافية متوافرة بسبب قدرة الجزيء ككلّ على الدوران، وتستطيع ذرات الجزيء أن تهتز نسبة لبعضها بعضا. إنّ مستويات الطاقة لكلّ من المستويات الاهتزازية والدورانية مكمية، وهي تبعد عن بعضها مسافات أقلّ بكثير (10^{-3} eV إلى 10^{-1} eV) من المستويات الإلكترونية بشكل عام. ويصبح عندئذ كلّ مستوى طاقة ذري مجموعة من المستويات القريبة من بعضها ناجّة من الحركتين الاهتزازية والدورانية (الشكل 29 – 14). تظهر الانتقالات من مستوى إلى آخر كخطوط كثيرة قريبة جدّا من بعضها. وفي الواقع، لا يمكن تمييز الخطوط من بعضها دائما، وتدعى هذه الأطياف **أطيافَ الحزمة**. ولأنواع الجزيئات جميعها أطياف مميزة، يمكن استخدامها لتمييزها ولتحديد تركيبها. وسنناقش الآن تفصيلات أكثر من الحالات الدورانية و الاهتزازية في الجزيء.

الشكل 29 – 14 (أ) مستويات الطاقة الفردية لذرة معزولة تصبح (ب) حزمًا من مستويات قريبة من بعضها بعضا في الجزيئات، وكذلك في المواد الصلبة والسائلة.



*مستويات الطاقة الدورانية في الجزيئات

نعتمد هنا فقط الجزيئات ثنائية الذرة. على الرغم من إمكانية امتداد التحليل إلى الجزيئات متعددة الذرة. وعندما يدور الجزيء ثنائي الذرة حول مركزه الكتلي كما هو مبين في (الشكل 29 – 15). فإنّ طاقة حركته الدورانية (انظر البند 8 – 7) تعطى كالتالي:

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} I\omega^2 = \frac{(I\omega)^2}{2I}$$

حيث تمثل $I\omega$ الزخم الزاوي (البند 8 – 8). وتتنبأ الميكانيكا الكمية بتكمية الزخم الزاوي تمامًا كما في الذرات (انظر المعادلة 28 – 3).

$$I\omega = \sqrt{L(L+1)}\,\hbar, \qquad L = 0, 1, 2, \cdots$$

حيث L عدد صحيح يُدعى **عدد الزّخم الزّاويّ الكمّيّ الدّورانيّ**. ولذلك. فإنّ الطاقة الدورانية مكمية :

$$E_{\text{rot}} = \frac{(I\omega)^2}{2I} = L(L+1)\frac{\hbar^2}{2I}, \qquad L = 0, 1, 2, \cdots \qquad \textbf{(1 – 29)}$$

وتخضع الانتقالات بين مستويات الطاقة الدورانية لقاعدة الانتقاء (كما في البند 28 – 6) :

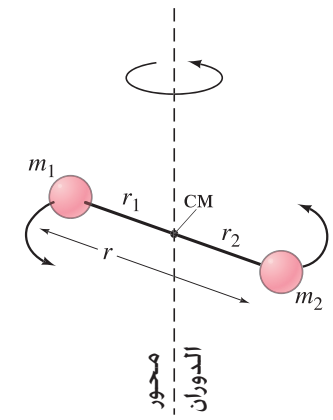
$$\Delta L = +1.$$

طاقة الفوتون المنبعث أو الممتص لانتقال بين حالات دورانية ذات عدد زخم زاوي كمي L و $L-1$ ستكون

$$\Delta E_{\text{rot}} = E_L - E_{L-1} = \frac{\hbar^2}{2I}L(L+1) - \frac{\hbar^2}{2I}(L-1)(L)$$

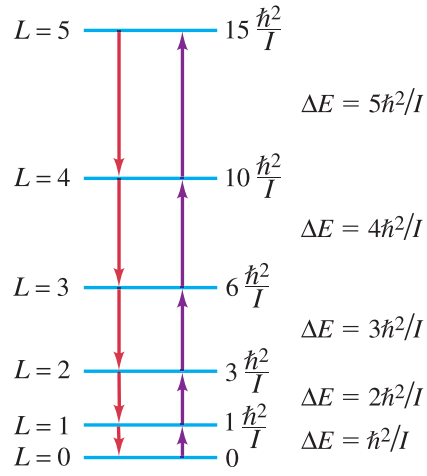
$$= \frac{\hbar^2}{I}L \qquad [L \text{ لمستوى الطاقة العلوي}] \qquad \textbf{(2 – 29)}$$

ونرى أنّ طاقة الانتقال تزداد مباشرة مع L. يبين (الشكل 29 – 16) بعض مستويات الطاقة الدورانية والانتقالات المسموح بها. وتقع خطوط الامتصاص التي قيست في منطقتي الميكروويف وتحت الحمراء من الطيف. وترداتهما بشكل عام هي: 2. أو 3. أو 4 ... أضعاف أعلى من أخفض واحد. كما تنبأت به (المعادلة 29 – 2).



الشكل 29 – 15 جزيء ثنائي الذرة يدور حول محور رأسي.

قاعدة انتقاء
(مستويات دورانية)



الشكل 29 – 16 مستويات طاقة دورانية وانتقالات مسموح فيها (انبعاث وامتصاص) لجزيء ثنائي الذرة. الأسهم المشيرة إلى الأعلى تمثل امتصاص فوتون، والأسهم المشيرة إلى الأسفل تمثل انبعاث فوتون.

المثال 29-2 الانتقال الدوراني

للانتقال الدوراني من $L = 1$ إلى $L = 0$ للجزيء CO. فإنّ طول موجة امتصاص مقيس يعادل $\lambda_1 = 2.60\,\text{mm}$ (وهذا ضمن منطقة المايكروويف). استخدم هذا لتحسب ما يلي: (أ) عزم القصور (أو الاستمرارية) لجزيء CO. (ب) طول رابطة r، CO.

النهج: إذا تمّ استخدام طول موجة الامتصاص لإيجاد طاقة الفوتون المتص. فعندئذ نستطيع حساب عزم القصور (أو الاستمرارية). I. من (المعادلة 2 – 29). ويرتبط عزم القصور (أو الاستمرارية) بالمسافة الفاصلة في CO (طول الرابطة r).

الحلّ: (أ) طاقة الفوتون، $E = hf = hc/\lambda$، تساوي فرق مستوى الطاقة الدوراني، ΔE_{rot}. ونستطيع أن نكتب من (المعادلة 29 – 2)

$$\frac{\hbar^2}{I}L = \Delta E_{\text{rot}} = hf = \frac{hc}{\lambda_1}$$

ومع $L = 1$ (الحالة العلوية) في هذه الحالة. نحلّ لإيجاد I:

$$I = \frac{\hbar^2 L}{hc}\lambda_1 = \frac{h\lambda_1}{4\pi^2 c} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(2.60 \times 10^{-3}\,\text{m})}{4\pi^2(3.00 \times 10^{8}\,\text{m/s})}$$
$$= 1.46 \times 10^{-46}\,\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

(ب) يدور الجزيء حول مركزه الكتلي (CM) كما هو مبين في (الشكل 29 – 15). افرض أنّ m_1 تمثل كتلة ذرة C. $m_1 = 12\,\text{u}$. وافرض كذلك أنّ m_2 تمثل كتلة O. $m_2 = 16\,\text{u}$. المسافة إلى مركز الثقل CM من الذرة C. وهي r_1 في (الشكل 15 – 29). معطاة بواسطة صيغة CM. (المعادلة 7 – 9):

$$r_1 = \frac{0 + m_2 r}{m_1 + m_2} = \frac{16}{12 + 16}r = 0.57r$$

وتبعد الذرة O مسافة $r_2 = r - r_1 = 0.43r$ من CM.

عزم القصور (أو الاستمرارية) لجزيء CO حول CM هو (انظر المثال 8 – 10)

$$\begin{aligned} I &= m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 \\ &= \left[(12\,\text{u})(0.57r)^2 + (16\,\text{u})(0.43r)^2\right]\left[1.66 \times 10^{-27}\,\text{kg/u}\right] \\ &= \left(1.14 \times 10^{-26}\,\text{kg}\right) r^2 \end{aligned}$$

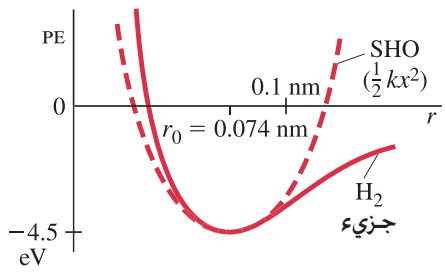
ونحلّ لإيجاد r . ونستخدم النتيجة من الجزء (أ) لإيجاد I :

$$r = \sqrt{\frac{1.46 \times 10^{-46}\,\text{kg}\cdot\text{m}^2}{1.14 \times 10^{-26}\,\text{kg}}} = 1.13 \times 10^{-10}\,\text{m} = 0.113\,\text{nm}$$

التمرين أ: ما أطوال الأمواج للانتقالات الدورانية الثلاثة التالية لـ CO؟

*مستويات الطاقة الدورانية في الجزيئات

إنّ طاقة الوضع للذرتين في جزيء ثنائي اعتيادي لها الهيئة المبينة في (الشكلين 29 – 8 و 29 – 2). ويبين (الشكل 29 – 17) مرة أخرى PE لجزيء H_2 (المنحنى المتصل). ومنحنى PE هذا، على الأقل بالقرب من مسافة الاتزان الفاصلة r_0، يماثل طاقة الوضع لمتذبذب توافقي، $\text{PE} = \frac{1}{2}kx^2$، والمبين متراكبًا في خطوط متقطعة. ولذلك، لإزاحات صغيرة من r_0، تشعر كلّ ذرة بقوة إرجاع تتناسب مع الإزاحة تقريبا، ويهتز الجزيء كهزاز توافقي بسيط (SHO) (انظر الفصل 11).



الشكل 29 – 17 طاقة وضع لجزيء H_2 ولهزاز توافقي بسيط ($\text{PE} = \frac{1}{2}kx^2$، مع $|x| = |r - r_0|$)

وحسب الميكانيكا الكمية ، فإنّ مستويات الطاقة الممكنة مكمّية حسب

$$E_{\text{vib}} = \left(\nu + \tfrac{1}{2}\right)hf, \qquad \nu = 0, 1, 2, \cdots, \tag{3 – 29}$$

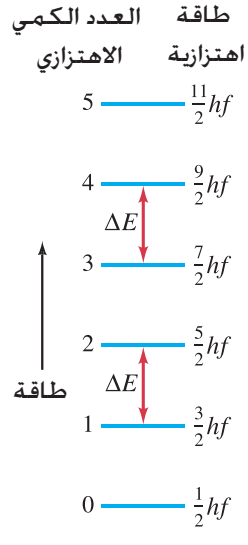
وتمثل f التردد التقليدي (انظر الفصل 11 – تعتمد f على كتلة الذرتين وكذلك على شدّة الرابطة أو "الصّلابة") و يمثل ν عددا صحيحا يدعى العددَ الاهتزازيَّ الكمّيَّ. إنّ أقلّ حالة طاقة ($\nu = 0$) ليست صفرا (كما في الدوران)، ولكنها تمتلك $E = \frac{1}{2}hf$. وتُسَمّى هذه طاقةَ النقطة – صفر . والحالات الأعلى لها طاقة $\frac{3}{2}hf, \frac{5}{2}hf$، وهكذا دواليك، كما هو مبين في (الشكل 18 – 29). تخضع الانتقالات لقاعدة الانتقاء:

$$\Delta\nu = \pm 1$$

لذا، فإنّ الانتقالات المسموح بها تحدث بين الحالات المتجاورة فقط ، وجميعها تصدر فوتونات ذات طاقة

$$\Delta E_{\text{vib}} = hf \tag{4 – 29}$$

وهذا قريب جدًّا من القيم العملية عند قيم ν الصغيرة، ولكن عند الطاقات الأعلى، يبدأ منحنى PE (الشكل 29 – 17) بالانحراف عن منحنى SHO المثالي، وعندئذ يؤثر هذا بدوره في أطوال أمواج الانتقالات وتردداتها. وطاقات الانتقال الاعتيادية هي على قدر 10^{-1} eV، حوالي 10 مرّات أكبر من طاقات الانتقالات الدورانية، مع أطوال أمواج في المنطقة تحت الحمراء من الطيف ($\approx 10^{-5}$ m).



الشكل 29 – 18 طاقات اهتزازية مسموح بها لجزيء ثنائي الذرة، حيث f هو التردد الأساس للاهتزاز (انظر الفصل 11). مستويات الطاقة متساوية الأبعاد. الانتقالات مسموح بها بين المستويات المتجاورة فقط ($\Delta\nu = \pm 1$).

قاعدة انتقاء
(طاقة اهتزازية)

المثال 29-3 مستويات الطّاقة الاهتزازيّة في الهيدروجين

تبعث اهتزازات جزيء الهيدروجين أشعة تحت حمراء طول موجتها 2300 nm تقريبا.
(أ) ما الفرق في الطاقة بين المستويات الاهتزازية المتجاورة؟ (ب) ما أخفض طاقة حالة اهتزازية ؟

النّهج: الطاقة الفاصلة بين المستويات الاهتزازية المتجاورة هي (المعادلة 29 – 4)
$\Delta E_{\text{vib}} = hf = hc/\lambda$. أخفض طاقة (المعادلة 29 – 3) لها $\nu = 0$.

الحل: (أ)
$$\Delta E_{\text{vib}} = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^{8}\,\text{m/s})}{(2300 \times 10^{-9}\,\text{m})(1.60 \times 10^{-19}\,\text{J/eV})} = 0.54\,\text{eV}$$

حيث يحتوي المقام على معامل التحويل من جول إلى eV.
(ب) تمتلك أخفض طاقة اهتزازية $\nu = 0$ حسب (المعادلة 29 – 3):

$$E_{\text{vib}} = \left(\nu + \tfrac{1}{2}\right)hf = \tfrac{1}{2}hf = 0.27\,\text{eV}$$

التمرين ب: ما طاقة أوّل حالة اهتزازية فوق الحالة الأرضية في جزيء الهيدروجين؟

* 5-29 التّرابط في المواد الصّلبة

قدّمت الميكانيكا الكمية مساهمة عظيمة لفهم تركيب المواد الصلبة. ويُدعى حقل الأبحاث النشط في أيامنا هذه **فيزياء الحالة – الصلبة**، أو **فيزياء المادة – المكثفة** لكي تضم السوائل أيضًا. وقد تم تخصيص بقية هذا الفصل لهذا الموضوع. وسنبدأ بنظرة مختصرة إلى تركيب المواد الصلبة والروابط التي تمسكها معا.

وبسبب أنّ بعض المواد الصلبة غير متبلورة في تركيبها (كالزجاج)، حيث لا تبدي ذراتها أو جزيئاتها أيّ ترتيب بعيد المدى، فإننا سنهتم بالصنف الآخر من المواد البلورية التي تشكل ذراتها أو أيوناتها أو جزيئاتها، بشكل عام مقبول، مصفوفة مرتبة في توزيع هندسي يعرف بالشبكة. يظهر (الشكل 29 – 19) ثلاثة من التوزيعات الممكنة للذرات في البلورة هي: مكعب بسيط، ومكعب ممركز وجهها، ومكعب ممركز جسما. إنّ بلورة NaCl هي مكعب ممركز وجهها، مع أيون واحد من Na^+ أو Cl^- عند كلّ نقطة شبكة (انظر الشكل 29 – 20).

يتم ربط جزيئات المادة الصلبة مع بعضها بعدة طرق. وأكثر هذه الطرق شيوعًا الرابطتان التساهمية (كما هو بين ذرات الكربون في بلورة الألماس) والأيونية (كما في بلورة NaCl). وغالبًا ما تكون الروابط جزئيًا تساهمية وجزئيًا أيونية . إنّ نقاشنا السابق في هذا الفصل عن هذه الروابط في الجزيئات ينطبق تماما على المواد الصلبة.

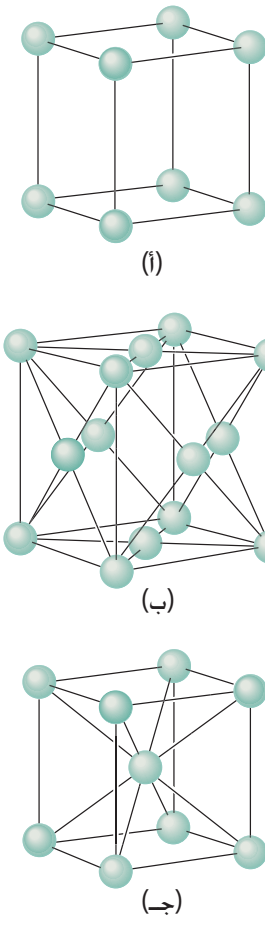
والآن، دعنا ننظر إلى بلورة NaCl في (الشكل 29 – 20). يشعر كلّ أيون Na^+ بطاقة جذب كولومية ناجّة من ستة "أقرب جارات" أيونات Cl^- المحيطة به. ولاحظ عدم امتلاك أيّ أيون Cl^- لأيّ أيون Na^+ بشكل تام. وعليه، يجب ألا نفكر في المواد الصلبة الأيونية كما لو أنها تتكوّن من جزيئات منفردة. كما أنّ كلّ Na^+ يشعر أيضًا بطاقة تنافر كولومية ناجّة من أيونات Na^+ الأخرى، بالرغم من أنها أضعف؛ لأنّ أيونات Na^+ أكثر بعدا.

وهناك نوع مختلف من الروابط، لم يناقش في (البند 29 – 1)، يحدث في الفلزات. وللذرات الفلزية إلكترونات خارجية ضعيفة الارتباط (نسبيًا) بذراتها. وتقترح نظريات **الروابط الفلزية** في المادة الصلبة الفلزية، تجوّل الإلكترونات الخارجية بحرية بين الذرات الفلزية جميعها، تاركة ذراتها دون إلكترونات خارجية، أيونات موجبة. وقد يكون التجاذب الكهروستاتيكي بين أيونات الفلز وهذا "الغاز" الإلكتروني السالب، على الأقل، مسؤولا جزئيًا عن إمساك المادة الصلبة مع بعضها. إنّ طاقة الترابط للروابط الفلزية هي 1 إلى 3 eV عادة ، وهي أضعف من الروابط الأيونية أو التساهمية (5 إلى 10 eV، في المواد الصلبة) نوعا ما. و"الإلكترونات الحرّة" هي المسؤولة عن كلّ من التوصيلين الكهربائي والحراري العالي للفلزات. وتفسّر هذه النظرية بشكل جيد لمعان السّطوح الفلزية الناعمة: تستطيع الإلكترونات الحرّة أن تهتز عند أيّ تردّد، فعندما يسقط ضوءٌ له مدى من الترددات على فلز ما، تستطيع الإلكترونات عندئذٍ أن تهتز متجاوبة لتعيد انبعاث الضوء بالترددات نفسها. لذا، فإنّ الضوء المنعكس سيتكوّن بشكل كبير من ترددات الضوء الساقط نفسها. وإذا قورن هذا مع المواد غير الفلزية التي تظهر لونا مميزا، فإنّ الإلكترونات الذرية توجد في حالات طاقة معينة فقط. وعندما يسقط ضوء أبيض عليها، تبدأ الذرات بالامتصاص عند ترددات معينة، وتعكس الترددات الأخرى التي تكون اللون الذي نراه.

وفيما يلي مقارنة مختصرة لروابط قوية مهمة:

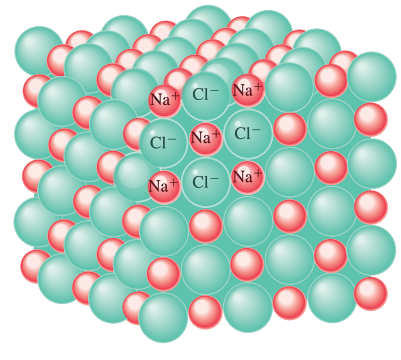
- **أيونيـــــة**: يُخطف إلكترونٌ من ذرة بواسطة أخرى.
- **تساهميّة**: تتشارك ذرات الجزيء الواحد بالإلكترونات.
- **فلـــــزيّة**: تتشارك الذرات في الفلز جميعها بالإلكترونات.

يمكن أن تشكّل ذرات بعض المواد أوجزيئاتها، مثل الغازات النبيلة، **روابط ضعيفة** مع بعضها بعضا. وكما رأينا في (البند 29 – 3)، فإنّ الروابط الضعيفة لها طاقات ربط ضعيفة جدّا، ومن غير المتوقع نتيجة لذلك أن تمسك الذرات مع بعضها لتشكّل سائلًا أو مادة صلبة عند درجة حرارة الغرفة. وتتكاثف الغازات النبيلة عند درجات حرارة منخفضة فقط، حيث الطاقة الذرية الحركية (الحرارية) صغيرة ليستطيع عندئذٍ التجاذب الضعيف من إمساك الذرات مع بعضها.



الشّكل 29 – 19 ترتيب الذرات في (أ) بلورة مكعب بسيط. (ب) بلورة مكعبة مركزية الوجه (لاحظ أن الذرة عند مركز كلّ وجه). (جـ) بلورة مركزية الجسم. ويبين كلّ رسم تخطيطي العلاقة بين الروابط. وكلّ من هذه "الخلايا" تتكرر في ثلاثة أبعاد وحتى حواف البلورة الجاهريّة.

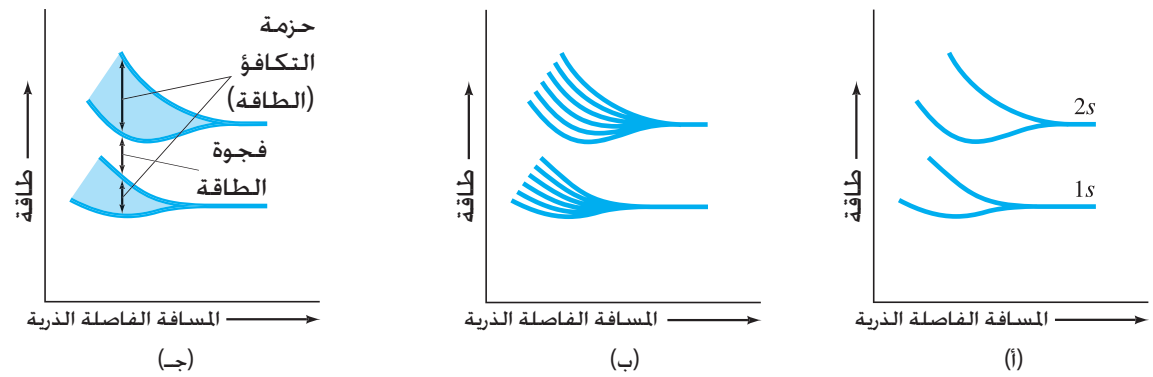
الشّكل 29 – 20 رسم تخطيطي لبلورة NaCl، تظهر "تراصّ" الذرات.



* 6-29 نظرية الحزم للمواد الصّلبة

لقد رأينا في (البند 29 – 1) أنّه عندما تقترب ذرتا هيدروجين من بعضهما، تتداخل الدوال الموجية، وتنقسم الحالتان $1s$ (واحدة من كلّ ذرة) إلى حالتين لهما الطّاقة نفسها. (وكما رأينا ، واحدة فقط من هاتين الحالتين، $S = 0$، لها طاقة منخفضة بما فيه الكفاية لتكون جزيء هيدروجين H_2 مترابطا). يظهر (الشكل 29 – 21) أ هذا الوضع للحالتين $1s$ و $2s$ لذرتين. وإذا اقتربت الذرتان من بعضهما (باتجاه يسار المنحنى)، فستنشطر الحالتان $1s$ و $2s$ إلى مستويين. ولكن عند اقتراب ست ذرات من بعضها، كما في (الشكل 29 – 21 ب)، تنشطر كلّ من هذه الحالات إلى ستة مستويات. أمّا إذا اقترب عدد كبير من الذرات من بعضها بعضا لتشكل مادة صلبة، فيصبح عندئذٍ كلّ من مستوياتها الذرية الأصلية **حزمة** كما هو مبين في (الشكل 29 – 21 جـ). إنّ مستويات الطاقة قريبة جدّا من بعضها في كلّ حزمة لتبدو وكأنها مستمرة بشكل مطلق. وهذا هو السبب في أنّ طيف الأجسام الصلبة المسخنة (البند 27 – 2) يبدو مستمرًا.

حزم الطاقة



الشكل 29 – 21 انشطار مستويات الطاقة الذرية $1s$ و $2s$ عندما (أ) تقترب ذرتان من بعضهما بعضًا (تقلّ المسافة الفاصلة الذرية باتجاه يسار المنحنى). (ب) الشيء نفسه لستّ ذرات. (جـ) لعدة ذرات عندما تقترب مجتمعة لتشكل مادة صلبة.

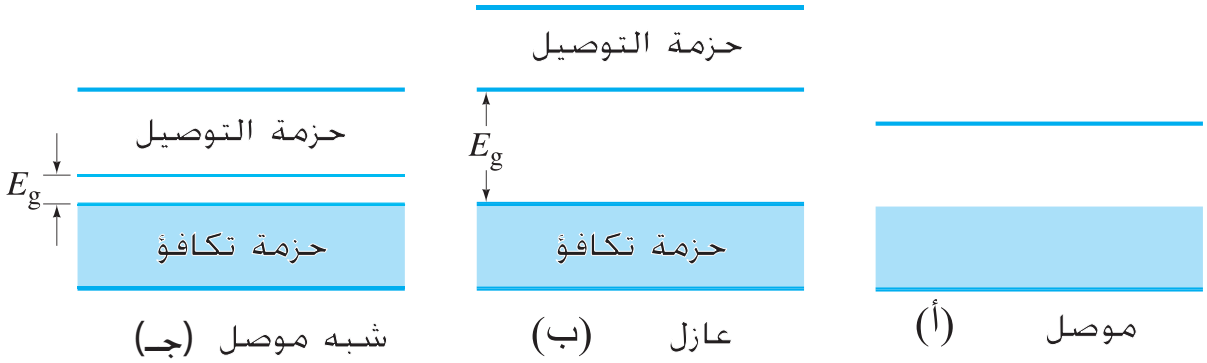
موصلات

تكمن الصفة المميزة للموصل الجيد في أنّ أعلى حزمة طاقة تكون مملوءة جزئيًّا. خذ بالحسبان الصوديوم، على سبيل المثال، والمبينة حزم طاقته في (الشكل 29 – 22). الحزم $1s$، و $2s$ ، و $2p$ مملوءة (تماما كما في ذرة Na) ولا تهمنا هنا. ورغم ذلك، فإنّ الحزمة $3s$ نصف مملوءة. لماذا؟ تذكر أنّ مبدأ الاستبعاد يشترط أنه في ذرة ما، يستطيع إلكترونان فقط أن يكونا في الحالة $3s$، حيث يكون غزل أحدهما إلى الأعلى والآخر إلى الأسفل. وتختلف طاقة هاتين الحالتين عن بعضهما قليلا. ولمادة صلبة مكونة من N ذرة، ستحتوي الحزمة $3s$ على $2N$ حالات طاقة محتملة. إنّ ذرة الصوديوم لها في $3s$ إلكترون وحيد. ولذلك، ففي عينة من فلزّ الصوديوم تحتوي على N من الذرات، هناك N من الإلكترونات في الحزمة $3s$ و N حالات غير مأهولة. وعند تسليط فرق جهد على الفلزّ، تستطيع الإلكترونات أن تتجاوب عن طريق التسارع وزيادة طاقتها؛ بسبب وجود كثير من الحالات غير المأهولة ذات الطاقة المتوافرة الأعلى بقليل. لذا، فإنّ التيار سينساب بسهولة ليكون الصوديوم موصلا جيدًّا. والصفة المميزة للموصلات الجيدة جميعها هي أنّ الحزمة ذات الطاقة الأعلى مملوءة جزئيًّا فقط، أو تتداخل حزمتان لتصبح الحالات غير المأهولة متوافرة . ومثال على الحالة الأخيرة، الماغنيسيوم الذي يمتلك إلكتروني $3s$، فيجعل ذلك الحزمة $3s$ مملوءة. إلّا أنّ الحزمة $3p$ غير المملوءة تتداخل مع الحزمة $3s$ بالطاقة. لذا، هناك كثير من الحالات المتوافرة للإلكترونات لتتحرك إلى داخلها. وبذلك يكون الماغنيسيوم موصلًا جيدًّا أيضًا.

الشكل 29 – 22 حزم الطاقة للصوديوم

عوازل
حزمتا التوصيل والتكافؤ
فجوة طاقة

وفي مادة جيدة **العزل** (عازلة)، على الوجه الآخر، فإنّ أعلى حزمة تحتوي على إلكترونات تكون مملوءة تماما، وتسمى **حزمة التكافؤ**. أمّا حزمة الطاقة الأعلى التالية المسماة **حزمة التوصيل**، فهي مفصولة عن حزمة التكافؤ بواسطة **طاقة فجوة "ممنوعة"** (أو **فجوة الحزمة**)، E_g، وهي في العادة 5 إلى 10 eV. لذا، فعند درجة حرارة الغرفة، (300 K)، حيث الطاقات الحرارية (أي، متوسط الطاقة الحركية — انظر الفصل 13) $\frac{3}{2}kT \approx 0.04\,\text{eV}$، لن يكون هناك أيّ إلكترون يستطيع اكتساب الطاقة (5 eV) الضرورية للوصول إلى حزمة التوصيل تقريبًا. وعند تسليط فرق جهد على المادة، لن يكون هناك أيّ حالات متوافرة تستطيع الإلكترونات الوصول إليها، ولن ينساب أيّ تيار. ولهذا السبب، تعدّ المادة عازلا جيدّا.



الشّكل 29 – 23 حزم الطاقة لـ : (أ) موصل. (ب) عازل، يمتلك فجوة طاقة كبيرة E_g. (جـ) شبه موصل، يمتلك فجوة طاقة صغيرة E_g. التظليل يمثل حالات مأهولة. يمثل التظليل الباهت في (جـ) إلكترونات تستطيع الانتقال من قمة حزمة التكافؤ إلى قاع حزمة التوصيل نتيجة التهيج الحراري عند درجة حرارة الغرفة (مبالغ فيه).

أشباه موصلات (نقية)

يقارن (الشّكل 29 – 23) حزم الطاقة ذات الصلة (أ) للموصلات، (ب) للعوازل، (جـ) للصنف المهمّ من المواد المعروفة **بأشباه الموصلات** أيضًا. إنّ حزم شبه الموصل النقي (أو **الضمني**)، كالسيلكون أو الجرمانيوم، هي كالعوازل، إلا أنّ حزمة التوصيل غير المملوءة تكون مفصولة عن حزمة التكافؤ المملوءة بفجوة طاقة أصغر بكثير، E_g، وعادة ما يكون مقدارها 1 eV. وعند درجة حرارة الغرفة، هناك عدد قليل من الإلكترونات تستطيع الحصول على طاقة حرارية كافية للوصول إلى حزمة التوصيل. ولذلك، فربّما ينساب تيار صغير جدّا عند تسليط فولتية (فرق جهد). وعند درجات الحرارة العالية، سيكون هناك عدد أكبر من الإلكترونات التي تمتلك طاقة كافية لتقفز فوق الفجوة. وغالبا، فإنّ هذا الأثر يستطيع أن يفعل أكثر من موازنة تأثير التصادمات الناجمة عن عدم الترتيب المرتفعة الناتج من درجات الحرارة المتزايدة. ولهذا، فإنّ المقاومة لأشباه الموصلات يمكن أن تقلّ مع ازدياد درجات الحرارة (انظر الجدول 18 – 1). ولكن هذا ليس كلّ شيء عن التوصيل لأشباه الموصلات. فعند تسليط فرق جهد على شبه موصل، تتحرك الإلكترونات القليلة في حزمة التوصيل باتجاه القطب الكهربائي الموجب. وتحاول إلكترونات حزمة التكافؤ أن تفعل الشيء نفسه، ويستطيع عدد قليل منها فعل ذلك لوجود عدد قليل من الحالات غير المأهولة، والتي تركت غير مأهولة بواسطة الإلكترونات الواصلة لحزمة التوصيل. وتُسَمّى هذه الحالات غير المملوءة بالإلكترونات **ثقوبًا**. وكلّ إلكترون في حزمة التكافؤ يملأ ثقبًا بهذه الطريقة خلال حركته باتجاه القطب الكهربائي الموجب يترك خلفه الثقب الخاص به. وبذلك، تنتقل الثقوب باتجاه القطب الكهربائي السالب. وبينما تعمد الإلكترونات على التراكم عند أحد جانبي المادّة، تعمد الثقوب على التراكم عند الجانب المعاكس. وسننظر إلى هذه الظاهرة بتفصيل أكثر في البند التالي.

ثقوب (في شبه موصل)

المثال 4-29 حساب طاقة الفجوة.

لقد وجد أنّ الموصلية لشبه موصل معين تزداد عندما يصطدم به ضوء ذو طول موجي 345 nm أو أقصر، مما يؤدي إلى انتقال عددٍ من الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل. ما مقدار طاقة الفجوة، E_g لشبه الموصل هذا؟

النّهج: إنّ أطول طول موجيّ (أخفض طاقة) لفوتون يسبب زيادة في الموصلية هو $\lambda = 345\,\text{nm}$، وطاقته $(= hf)$ تساوي طاقة الفجوة.

الحلّ: طاقة الفجوة تساوي طاقة الفوتون حيث $\lambda = 345\text{-nm}$:

$$E_g = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^{8}\,\text{m/s})}{(345 \times 10^{-9}\,\text{m})(1.60 \times 10^{-19}\,\text{J/eV})} = 3.6\,\text{eV}$$

المثال المفاهيمي 5-29 أيّ منها شفاف؟

عند درجة حرارة الغرفة، تعادل طاقة فجوة السيلكون 1.14 eV، في حين تعادل لكبريت الخارصين (ZnS) 3.6 eV. أيّ من هاتين المادتين غير منفذة للضوء المرئي، وأيّ منهما شفاف؟

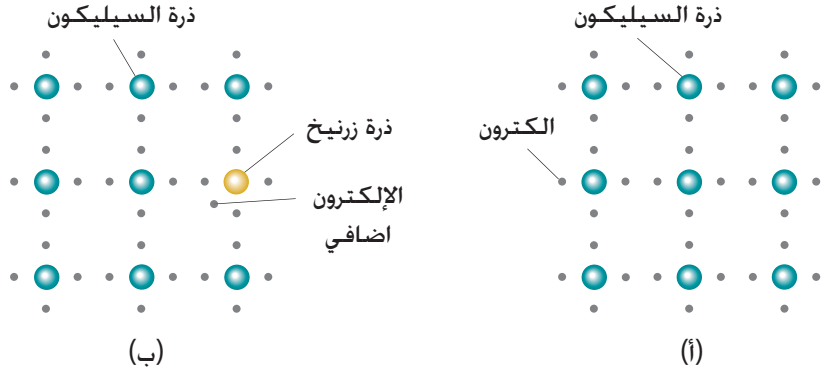
الإجابة: تمتلك فوتونات الضوء المرئي طاقات ما بين من 1.8 eV و 3.2 eV ($E = hf = hc/\lambda$ حيث يتراوح طول الموجة ما بين $\lambda = 400\,\text{nm}$ و $\lambda = 700\,\text{nm}$ وحيث أن أيضًا $1\,\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\,\text{J}$). يُمتص الضوء بواسطة الإلكترونات في المادة. وبما أنّ طاقة فجوة السيلكون صغيرة بدرجة كافية، فلن يتمكن عندها السيلكون من امتصاص هذه الفوتونات. لذا، فإنه يعمل على ضخّ الإلكترونات إلى الأعلى نحو حزمة التوصيل. إذن، فالسيلكون غير شفاف (أكمد). أمّا على الجانب الآخر، فإنّ فجوة طاقة كبريت الخارصين كبيرة جدّا، وقادرة على امتصاص الفوتونات المرئية. لذا، فإنّ الفوتونات ستمر من خلال المادة، ويقال عندئذ بأنّ هذه المادة قد تكون شفافة.

* 7-29 أشباه الموصلات والتّطعيم

تستخدم الأجهزة الإلكترونية جميعها تقريبًا هذه الأيام أشباه الموصلات. وأكثرها شيوعًا السيليكون (Si) والجرمانيوم (Ge). ولكلّ ذرة من السيليكون أو الجرمانيوم أربعة إلكترونات. تعمل على إمساك الذرات في تركيب شبكيّ بلوريّ منتظم. وهذا ما يبينه الرسم التوضيحي في (الشكل 29 – 24 أ). يكتسب كلّ من الجرمانيوم والسيليكون خصائص مفيدة للأجهزة إلكترونية فقط عند إدخال كمية من الشوائب متناهية الصغر داخل التركيب البلوري (ربما جزء واحد من كلّ 10^6 أو 10^7). ويُسمّى هذا **تطعيم** شبه الموصل. وهناك نوعان من أشباه الموصلات يمكن صناعتهما اعتمادًاعلى نوع الشائبة المستخدمة. إذا كانت الشائبة عنصرا فإنّ ذراته تمتلك خمسة إلكترونات خارجية. كالزرنيخ (نعرض حالة ماثلة في الشكل 29 – 24 ب) علما بأنّ مواقع ذرات الزرنيخ في الشبكة البلورية هي مواقع ذرات السيليكون نفسها. تدخل أربعة إلكترونات فقط من الزرنيخ في التركيب الترابطي. أمّا الإلكترون الخامس. فلا يدخل فيه. ويستطيع التحرك بحرية نسبية. ويتصرف بصورة ما كالإلكترونات في الموصل. وبسبب هذا العدد الإضافي الصغير من الإلكترونات. يصبح شبه الموصل المطعم موصلًا تقريبًا. إنّ كثافة إلكترونات التوصيل في شبه الموصل النقي (غير المطعم) عند درجة حرارة الغرفة قليلة جدًّا. وهي في العادة أقلّ من 1 لكلّ 10^9 ذرة. ومع تركيز شوائب مقداره 1 لكلّ 10^6 أو 10^7 عند التطعيم. تصبح الموصلية أكبر بكثير. ويمكن التحكم بها بدقة متناهية. وتسمى بلورة السيليكون المطعمة بالزرنيخ **شبه موصل نوع *n*** لأنّ الشحنات السالبة (الإلكترونات) هي المسؤولة عن التيار الكهربائي.

أشباه موصلات مطعمة

نوع-*n*



الشّكل 29 – 24 تمثيل ثنائي البعد لبلورة سيلكون. (أ) أربعة إلكترونات (خارجية) تحيط بكلّ ذرة سيلكون. (ب) بلورة سيلكون مطعمة بنسبة صغيرة من ذرات الزرنيخ: الإلكترون الإضافي لا يدخل في الشبكة البلورية. ولذلك فهو حرّ الحركة. وهذا شبه موصل من نوع-*n*.

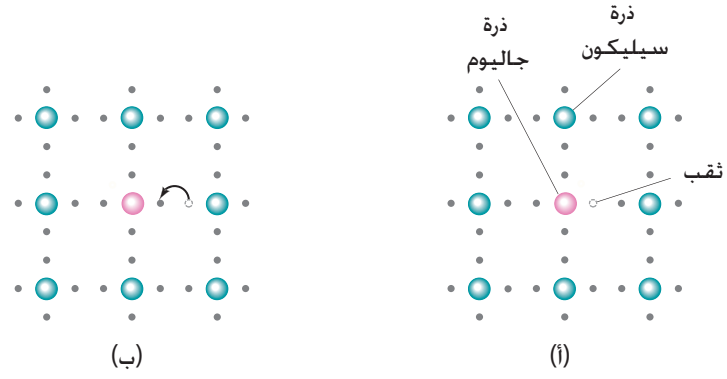
وفي **شبه الموصل نوع *p***. هناك نسبة صغيرة من ذرات ذات ثلاثة إلكترونات خارجية – كالجاليوم-- حلّت مكان العدد نفسه من ذرات شبه الموصل. وكما هو مبين في (الشكل 29 – 25 أ). هناك "ثقب" في تركيب الشبكة قرب ذرة الجاليوم بسبب امتلاكها ثلاثة إلكترونات خارجية فقط . وتستطيع الإلكترونات من ذرات السيليكون المجاورة أن تقفز إلى هذه الثقوب وملئها. ولكن هذا يترك ثقبًا في الموضع الذي كان يشغله الإلكترون أصلًا (الشكل 29 – 25 ب). وبما أنّ الغالبية العظمى من الذرات هي ذرات سيلكون. فإنّ الثقوب موجودة تقريبًا دائمًا بالقرب من ذرة سيلكون. وبما أنّ ذرات السيلكون تتطلب أربعة إلكترونات خارجية لتصبح متعادلة. فهذا يعني وجود شحنة موجبة صافية عند الثقب. وفي أيّ وقت يتحرك الإلكترون فيه ليملأ ثقبًا. يصبح الثقب الموجب حينها عند الموقع السابق لذلك الإلكترون. وهنا. يستطيع إلكترون آخر أن يملأ ذلك الثقب. ويكون الثقب بذلك قد انتقل إلى موقع جديد. وهكذا دواليك. ويدعى هذا النوع من أشباه الموصلات النوع *p* بسبب الثقوب الموجبة التي تبدو وكأنّها تحمل التيار الكهربائي. ومع ذلك. لاحظ أنّ كلًّا من *النوعين n و p من أشباه الموصلات لا يحمل شحنة صافية*.

نوع p

تنويه !

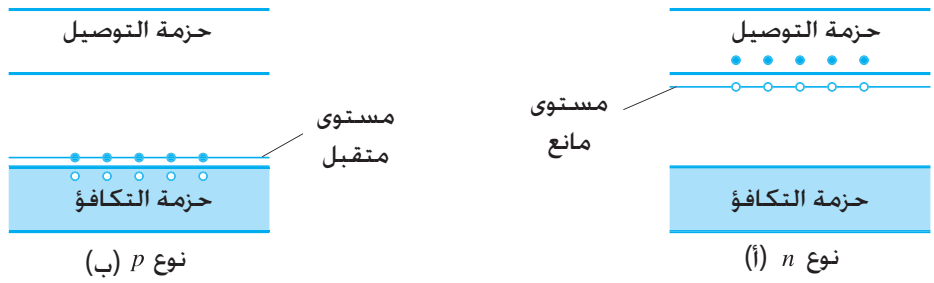
تعمل أشباه الموصلات من نوع p كما لو أنّ الشحنات الموجبة تتحرك، إلا أنّ الإلكترونات هي التي تتحرك.

الثقوب موجبة الشحنة



الشّكل 29 – 25 شبه موصل نوع p، سيلكون مطعم بجاليوم. (أ) هناك ثلاثة إلكترونات خارجية للجاليوم فقط. لذا، فهناك موقع فارغ، أو ثقب في التركيب. (ب) تستطيع الإلكترونات من ذرات السيلكون أن تقفز إلى داخل الثقب لتملأه. ونتيجة لذلك، يتحرك الثقب إلى موقع جديد (إلى اليمين في هذا الشكل)، أي إلى الموقع الأصلي للإلكترون.

حسب نظرية الحزم (البند 29 – 6)، تزود الشائبة في شبه الموصل المطعم بحالات طاقة إضافية بين الحزم كما هو مبين في (الشكل 29 – 26). وفي شبه موصل من نوع n، يقع مستوى طاقة الشائبة أسفل حزمة التوصيل مباشرة (الشكل 29 – 26 أ). وتحتاج الإلكترونات في مستوى الطاقة هذا إلى 0.05 eV فقط في ذرة Si (وهي أقلّ من ذلك في الجرمانيوم) للوصول إلى حزمة التوصيل، ويعادل هذا مقدار الطاقة الحرارية، $\frac{3}{2}kT$ (= 0.04 eV عند 300 K). لذلك تحدث الانتقالات بسهولة عند درجة حرارة الغرفة. ولهذا، يستطيع مستوى الطاقة هذا تزويد حزمة التوصيل بالإلكترونات. وعليه، يُدعى المستوى **مانحًا**. أما في أشباه الموصلات من نوع p، فإنّ مستوى طاقة الشائبة يقع فوق حزمة التكافؤ مباشرة (الشكل 29 – 26 ب). ويُدعى المستوى آخذًا (متقبّلا)؛ لأنّ الإلكترونات من حزمة التكافؤ تستطيع القفز بسهولة إليه. وتمّ ترك الثقوب الموجبة في حزمة **التكافؤ** في الخلف، وعندما تتحرك الإلكترونات الأخرى إلى داخل هذه الثقوب، تتحرك الثقوب من مواضعها كما نوقش سابقًا.



الشكل 29 – 26 مستويات طاقة الشوائب في أشباه الموصلات المطعمة.

29-8 صمامات ثنائيّة (ديود) شبه موصلة

إنّ الصّمّامات الثنائيّة شبه الموصلة، والترانزستورات مكونات أساسيّة في الأجهزة الإلكترونيّة الحديثة. ويسمح التصغير المحقق اليوم لآلاف عديدة من الصّمّامات الثنائيّة، والترانزستورات، والمقاومات، وهكذا دواليك، أن تُوضَعَ على شريحة واحدة لا يزيد طول جانبها على ميليمتر. وسنناقش الآن، باختصار وبنوعية، عمل الصمامات الثنائية والترانزستورات.

وصلة pn لصمام ثنائي

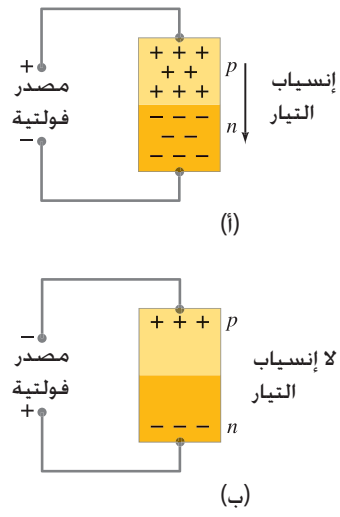
عند توصيل شبه موصل من نوع n مع شبه موصل من نوع p، تتشكّل وصلة **صمّام ثنائيّ** ***pn*** . ويُعدّ كلّ منهما متعادلا كهربائيًا عندما يكونان منفصلين. وعند وصلهما، تنتشر عدة إلكترونات قرب الوصلة من شبه الموصل نوع n إلى شبه الموصل نوع p، فتملأ ثقوبا قليلة. في حين يترك النوع n مع شحنة موجبة. أما النوع p، فيكتسب شحنة سالبة صافية، ويتولد عندئذٍ فرق جهد، ويكون الجانب n موجبا بالنسبة إلى الجانب p، مما يمنع أيّ انتشار لاحق للإلكترونات.

وإذا وُصِلت بطارية بالصمام الثنائي، بحيث يوصل طرفها الموجب بالجانب p، ويوصل طرفها السالب بالجانب n كما في (الشكل 29 – 27 أ)، فإنّ الجهد المسلط الخارجي يعاكس فرق الجهد الداخلي، ليقال عندئذ إنّ الصمام الثنائي منحاز إلى الأمام. وإذا كانت الفولتية كبيرة بما فيه الكفاية (حوالي للجرمانيوم 0.3 V Ge، وللسيلكون 0.6 V Si عند درجة حرارة الغرفة)، فإنّ تيارًا سينساب. تُطرد الثقوب الموجبة في شبه الموصل نوع p بواسطة الطرف الموجب للبطارية، في حين تُطرد الإلكترونات في النوع n بواسطة الطرف السالب للبطارية. وتلتقي الثقوب والإلكترونات عند الوصلة، ثم تعبر الإلكترونات وتملأ الثقوب، وينساب التيار. وفي الوقت نفسه، يسحب الجانب الموجب الإلكترونات باستمرار من الجانب p، مشكلا ثقوبا جديدة، ويتم تزويد الإلكترونات بواسطة الجانب السالب عند النهاية n. وبسبب ذلك ينساب تيارٌ كبيرٌ خلال الصمام الثنائي.

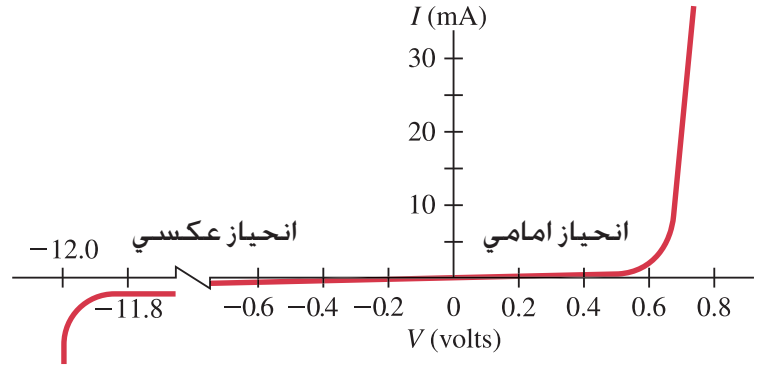
وعندما يكون الصمام الثنائي **منحازًا إلى الخلف**، كما في (الشكل 29 – 27 ب)، فإنّ الثقوب قرب الطرف p تكون منجذبة إلى الجانب السالب للبطارية، ولكن الإلكترونات قرب الطرف n تكون منجذبة إلى الجانب الموجب. ولا تلتقي ناقلات التيار قرب الوصلة، وفي الوضع المثالي، لن ينساب أيّ تيار.

يبين (الشكل 29 – 28) منحنى التيار مقابل الفولتية لصمّام ثنائيّ عاديّ. وكما ترى، فإنّ الصمّام الحقيقيّ يسمح لكمية صغيرة من التيار العكسيّ بالانسياب.* ولمعظم الأسباب العملية، فإنّ هذا مهمل.

الشكل 29 – 27 رسم تخطيطي يظهر كيفية عمل صمام ثنائي شبه موصل، ينساب تيار عند وصل الفولتية في انحياز أمامي ، كما في (أ)، ولكن ليس عندما يوصل في انحياز عكسي ، كما في (ب).



*عند درجة حرارة الغرفة، يشكل هذا التيار μA قليلة في الجرمانيوم، و pA قليلة في السيلكون. يزداد التيار العكسي بسرعة مع درجة الحرارة، ويمكن أن يجعل الصّمّام الثنائي غير فاعل فوق 200°C.



الشكل 29 – 28 تيار خلال الصمام الثنائي كدالة في الفولتية المطبقة.

المثال 29-9 صمام ثنائيّ

الصمّام الثنائيّ المبينة ميزاته في (الشكل 29 – 28)، موصول على التوالي ببطارية 4.0-V ومقاومة . إذا كان لتيار 0.15 mA أن يمُرّ خلال الصمّام الثنائيّ، فما مقدار المقاومة اللازمة؟

النّهج : نستخدم (الشكل 29 – 28). لنتوصل إلى أنّ انخفاض الفولتية خلال الصمام الثنائي حوالي 0.7 V عندما يكون التيار 15 mA. وعندها نستخدم دارة تحليل بسيطة وقانون أوم (الفصلان 18 و 19).

الحلّ: إنّ انخفاض الفولتية خلال المقاومة هو

$$4.0\,\text{V} - 0.7\,\text{V} = 3.3\,\text{V}$$

لذا، فإنّ

$$R = V/I = (3.3\,\text{V})/(1.5 \times 10^{-2}\,\text{A}) = 220\,\Omega.$$

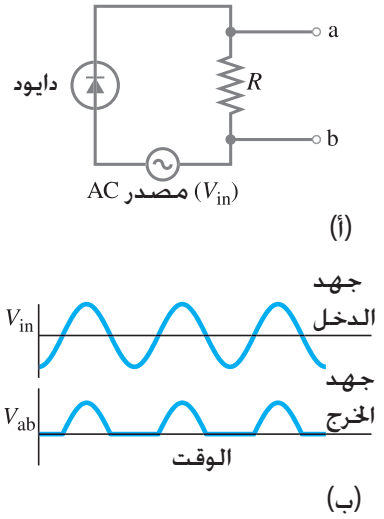
رمز الصمام الثنائي هو

[صمام ثنائي]

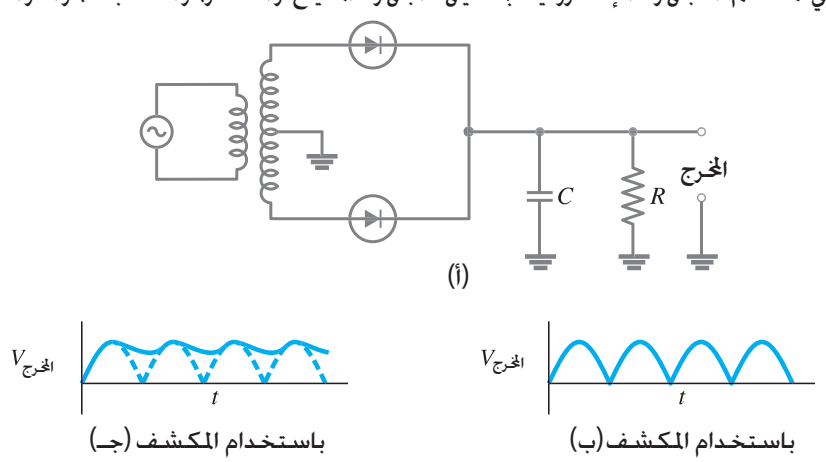
ويمثل السهم الاتجاه الاصطلاحي (+) لانسياب التيار بسهولة.

وبما أنّ وصلة الصمام الثنائي pn تسمح بانسياب التيار باتجاه واحد فقط (طالما أنّ الفولتية ليست مرتفعة)، فإنّها تستطيع أن تخدم **كمقوّم** – لتغيّر ac إلى dc. يبين (الشكل 29 – 29 أ) دارة تقويم بسيطة. يطبق مصدر ac فولتية موجبة وسالبة خلال الصمام الثنائي بالتناوب. وخلال كلّ نصف دورة فقط، سيمرّ التيار خلال الصمام الثنائي، وعندئذ فقط سيمرّ تيارٌ خلال المقاومة R. ولهذا السبب، فإنّ منحنى الفولتية V_{ab} خلال R كدالة في الزمن يظهر كالفولتية الناتجة والمبينة في (الشكل 29 – 29 ب). إنّ **موحّد نصف الموجة** هذا ليس dc تماما، ولكنه أحادي الاتجاه. والأكثر فائدة هي دارة **موحّد (مقوّم) الموجة الكاملة**، والتي تستخدم صمامين ثنائيين (وفي بعض الأحيان أربعة) كما هو مبين في (الشكل 29 – 30أ). وعند أيّ لحظة، سيوصل الصمّام الثنائيّ الأوّل أو الثاني تيارًا إلى اليمين. ولذلك، فإنّ الناتج خلال المقاومة الحمل، R، سيكون كما هو مبين في (الشكل 29 – 30 ب). وحقيقة هذه هي الفولتية إذا لم تكن المكثفة C داخل الدارة. يميل المكثف إلى تخزين الشحنات، وإذا كان الثابت الزمني RC طويلا بما فيه الكفاية، فسيساعد هذا على سلاسة انسياب التيار كما هو مبين في (الشكل 29 – 30 جـ). (التغير في الناتج المبين في (الشكل 29 – 30 جـ) يدعى *الفولتية التّموّجيّة*).

تُعدّ دارات موحّد (مقوّم) الاتجاه مهمة؛ لأنّ معظم خطوط الفولتية في المنشآت هي ac، كما أنّ معظم الأجهزة الإلكترونية تتطلب فولتية dc لعملها. ولهذا السبب، توجد الصمامات الثنائية تقريبا في معظم الأجهزة الإلكترونية بما فيها أجهزة المذياع والتلفاز، والحاسبات، والحواسيب.



الشكل 29 – 29 (أ) دارة موحد (مقوّم) نصف موجة بسيط باستخدام صمام ثنائي شبه موصل. (ب) مصدر ac فولتية مدخلة، وفولتية مخرجة خلال R كدالة في الزمن.



الشكل 29 – 30 (أ) دارة موحّد (مقوّم) موجة كاملة (ومن ضمنها محوّل (مقوّم) يجعل تغيير الفولتية ممكنا). (ب) الفولتية المخرجة بغياب المكثف C. (جـ) فولتية مخرجة بوجود المكثف في الدارة.

تطبيق الفيزياء
LED

وهناك جهاز مفيد آخر هو **الصّمّام الثّنائيّ باعث الضّوء** (LED)، المبتكر في ستينيّات القرن العشرين (1960s). عندما تكون الوصلة *pn* منحازة إلى الأمام، يبدأ تيار بالانسياب. وتعبر الإلكترونات من المنطقة *n* إلى المنطقة *p* وتتحد مع الثقوب. ويمكن أنّ ينبعث فوتون بطاقة تساوي طاقة حزمة الفجوة E_g تقريبا (انظر الشكلين 29 – 23 جـ، و 29 – 26). وغالبا، فإنّ الطاقة، وبالتالي الطول الموجي، الموجودة في المنطقة الحمراء من الطيف المرئي تنتج شاشات LED المعروفة على أجهزة VCRs وقارئات CD، ولوحات التحكم في آلات السيارة، والساعات الرقمية، وهكذا. تستخدم LED الأشعة تحت الحمراء (غير المرئية) في التحكم البعيد في أجهزة التلفاز، و DVDs، والأنظمة الصوتية. وتبعث الأنواع الجديدة من LEDs ألوانا أخرى. وبدأت المصابيح" المعتمدة على تقنية LED باستبدال أنواع أخرى من الإضاءة في التطبيقات المختلفة مثل الكشافات الضوئية، وإشارات المرور، ومصابيح كوابح السيارة، وإشارات الأبواب الخارجية، وألواح المرساة، وأنوار المسارح، والشّاشات. ومع أنّ مصابيح LED- والمسماة أحيانا بإضاءة الحالة الصلبة - مكلفة، إلا أنّ لها كثيرًا من الإيجابيات؛ فهي تعيش طويلا، وفاعلة، ومتينة. وعلى سبيل المثال، فإنّ إشارات المرور المحتوية على LED تدوم من 5 إلى 10 مرات أطول من المصابيح التقليدية المتوهجة، وتستخدم 20% فقط من الطاقة للضوء الناتج نفسه. وبالنسبة إلى أضواء كوابح السيارة، فهي تضيء أسرع بمقدار جزء قليل من الثانية، ممّا يتيح مسافة توقف إضافية للسائق تمتد من 5 – 6 أمتار (15 – 20 قدما) عند السرعات المستخدمة على الطّرق السّريعة.

خلايا ضوئية
وصمامات ثنائية ضوئية

تُعدّ الخلايا الضوئية والصمامات الثنائية الضوئية (البند 27 – 3) وصلات من *pn* تستخدم في الاتجاه المعاكس. تمتص الفوتونات، فتنشأ ثنائيات "إلكترون – ثقب" عندما تكون طاقة الفوتون أكبر من طاقة حزمة الفجوة، E_g. وتنتج الإلكترونات والثقوب المتكونة تيارًا يصبح مصدرًا للقدرة و *emf* عند وصله بدارة خارجية. وتعمل كاشفات الجسيمات (البند 30 – 13) بطريقة مماثلة. ويسمى الصمام الثنائي جهازا لا خطيّ لعدم تناسب التيار مع الفولتية. أي أنّ منحنى التيار مقابل الفولتية (الشكل 29 – 28) لا يشكل خطّا مستقيما، كما هو للمقاومة (المستقيم نموذجيا). كما أنّ الترانزستورات أجهزة لا خطية أيضا.

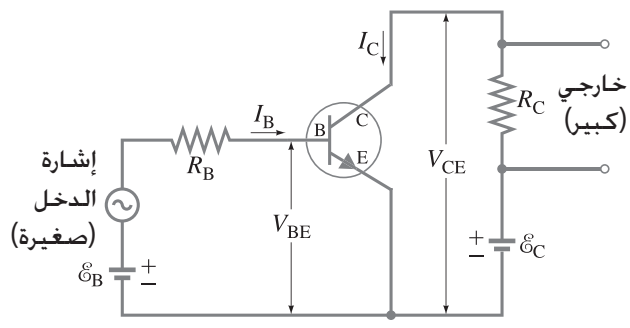
* 9-29 الترانزستورات والدّارات المتكاملة

ترانزستورات

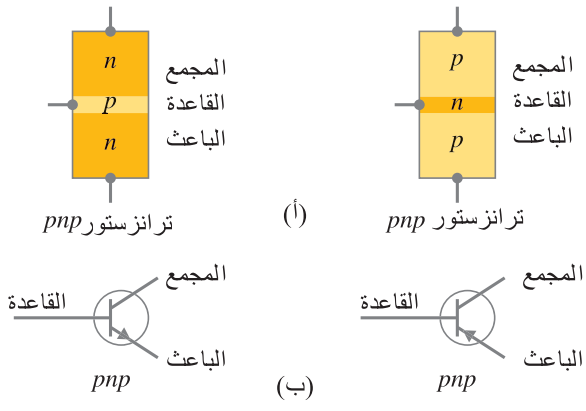
تتكوّن وصلة الترانزستور البسيطة من بلورة من نوع واحد من شبه موصل مطعم موضوعة بين بلورتين من النوع الآخر. وتمّت صناعة كلا الترانزستورين *npn* و *pnp*، وهما مبينان بالرسم التوضيحي في (الشكل 29 – 31 أ). لقد أعطيت أشباه الموصلات الثلاثة الأسماء الآتية: المجمع، والقاعدة، والباعث. وتُبيّنُ رموز الترانزستورات *npn* و *pnp* في (الشكل 29 – 31 ب). ويوضع السهم دائما على الباعث ليدُلّ على اتجاه (التقليدي) انسياب التيار في العمليات الطبيعية.

ويمكن تحليل عمل الترانزستور نوعيّا – باختصار شديد – كالتالي: افرض أنّ *npn* ترانزستور موصل كما هو مبين في (الشكل 29 – 32). وأُبْقِيَ على فرق جهد V_{CE} بين المجمع والباعث بواسطة بطارية $\mathscr{E}_C$. تدعى الفوليتة المسلطة على القاعدة الفولتية القاعدة المنحازة، V_{BE}. وعندما تكون V_{BE} موجبة، تنجذب إلكترونات التوصيل في الباعث إلى القاعدة. وبما أنّ منطقة القاعدة رفيعة جدّا (ربما 1 μm)، فإنّ معظم هذه الإلكترونات تنساب خلال القاعدة إلى داخل المجمع، والذي أبقِيَ عند فولتية موجبة. وينساب تيار كبير I_C بين المجمع والباعث، وتيار أصغر من ذلك بكثير I_B خلال القاعدة.

الشكل 29 – 32 *npn* ترانزستور استخدم كمكبر.



الشكل 29 – 31 (أ) رسم توضيحي لترانزستورات *npn* و *pnp*. (ب) الرموز للترانزستورات *npn* و *pnp*.



وتغيرات صغيرة في فولتية القاعدة ناتجة من إشارة مدخلة تسبب تغيّراً كبيراً في تيار المجمع، ممّا يسبّبُ تغيّرًا كبيرًا أيضًا في انخفاض فرق الجهد خلال المقاومة الناتجة R_C. لذا، فإنّ الترانزستور يستطيع أن يكبّر إشارة صغيرة إلى أخرى كبيرة.

مضخمات

تُعدّ الترانزستورات عناصر رئيسة في **المكبرات** الإلكترونية الحديثة بجميع أنواعها. وفي **الدّارات الرّقمية**، حيث إنّ "وصل" و "قطع" (أو "صفر" و "واحد") هي أساسية، فإنّ الترانزستورات تستطيع أن تعمل كمفتاح أو "بوابة"؛ أي أنّها تسمح للتيار بالمرور ("وصل") أو تمنعه ("قطع"). ويعمل *pnp* ترانزستور كعمل *npn*، إلا أنّ الثقوب هي التي تتحرك في الأول بدلا من الإلكترونات. كما أنّ فرق جهد المجمع سالب، وكذلك الحال بالنسبة إلى جهد القاعدة في التشغيل الطبيعي.

الدارات الرقمية والبوابات

شكلت الترانزستورات تقدمًا هائلًا في تصغير الدارات الإلكترونية. وبالرغم من أنّ الترانزستورات بنوعيها صغيرة جدًّا مقارنةً مع أنابيب التفريغ التي كانت تستخدم سابقًا، إلا أنّها تُعدّ رائعةً مقارنةً مع **الدّارات التّكامليّة** أو **الشّرائح** (انظر الصورة عند بداية هذا الفصل). يمكن وضع كميّاتٍ ضئيلة من الشوائب عند مواضع معيّنة داخل بلّورة سيلكون نقية. ويمكن أن ترتب هذه البلورات لتشكيل صمّامات ثنائيّة، وترانزستورات، ومقاومات (أشباه موصلات غير مطعمة). ويمكن أيضًا تشكيل مواسعات ومحاثّات، بالرغم من أنّه يتمّ توصيلها منفردة. إنّ شريحة ضئيلة لا يتجاوز طول جانبها عدة ميليمترات، يمكن أن تحتوي على الملايين من الترانزستورات وعناصر الدارة الأخرى. وتُعدّ الدارات التكاملية قلب الحواسيب، وأجهزة التلفاز، والحاسبات، وآلات التصوير، والآلات الإلكترونية التي تتحكم بالطائرة، ومركبات الفضاء، والسيارات. إنّ "التصغير" المنتج بواسطة الدارات التكاملية لن يسمح للدارات المعقدة بدرجةٍ هائلةٍ أن توضع في حيّزٍ صغيرٍ فقط، بل سمح كذلك بازدياد هائل في سرعة العمليات أيضًا، ولنقل، في الحواسيب، بسبب المسافات الضئيلة جدًّا التي تقطعها الإشارات الإلكترونية.

* ملخص

تفسّر الميكانيكا الكمية ترابط الذرات مع بعضها لتتشكل **الجزيئات**.
وفي **الرابطة التساهمية**، تتداخل السّحب الإلكترونية لذرتين أو أكثر بسبب التداخل البناء بين الموجات الإلكترونية. وتنجذب الأنوية الموجبة إلى هذا التركيز من الشحنات السالبة بينها، لتتشكل الرابطة.
أمّا **الرابطة الأيونية** فتعدّ حالة متطرفة من الرابطة التساهمية التي يقضي خلالها إلكترون أو أكثر من ذرة ما وقتًا أكثر بكثير حول ذرة أخرى مقارنة بذرته. وبناء على هذا، تتصرف الذرات في حينها كأيونات مشحونة بشحنتين متعاكستين يجذب كلّ منهما الآخر، ليشكلا الرابطة.
إنّ **الروابط القوية** تمسك الجزيئات مع بعضها، كما أنها تمسك الذرات والجزيئات معا في المواد الصلبة. و**الروابط الضعيفة** (**روابط فان دير فالز**)، مهمة كذلك، وتربط الجزيئات بعضها ببعض.
وعندما تتحد الذرات مع بعضها لتتشكل الجزيئات، فإنّ مستويات الطاقة للإلكترونات الخارجية تتغير لأنها تتفاعل مع بعضها بعضا. وتصبح مستويات طاقة أخرى ممكنة بسبب قابلية الذرات للاهتزاز بالنسبة إلى بعضها، ولاستطاعة الجزيء ككل على الدوران أيضا.
إنّ مستويات الطاقة للحركتين الاهتزازية والدورانية مكماة، وهي قريبة جدّا من بعضها (عادة، تبعد عن بعضها 10^{-1} eV إلى 10^{-3} eV). وبسبب ذلك، يصبح كلّ مستوى طاقة ذري مجموعة من المستويات القريبة من بعضها بسبب الحركات الاهتزازية والدورانية. و تبدو الانتقالات من مستوى إلى آخر كخطوط كثيرة قريبة جدّا من بعضها. وتدعى الأطياف الناتجة **الأطيافَ الحزميّةَ**.
وتعطى مستويات الطاقة الدورانية المكماة كالتالي:

$$E_{\text{rot}} = L(L+1)\frac{\hbar^2}{2I}, \qquad L = 0, 1, 2, \cdots \qquad \textbf{(1 – 29)}$$

حيث I هو عزم القصور (أو الاستمرارية) الذاتي للجزيء.

وتعطى مستويات الطاقة للحركة الاهتزازية كالتالي:

$$E_{\text{vib}} = (\nu + \tfrac{1}{2})hf, \qquad \nu = 0, 1, 2, \cdots \qquad \textbf{(3-29)}$$

حيث تمثل f التردد الطبيعي التقليدي لاهتزاز الجزيء. وتخضع الانتقالات بين مستويات الطاقة لقواعد الانتقاء $\Delta L = \pm 1$، و $\Delta\nu = \pm 1$.
إنّ بعض **المواد الصلبة** مرتبطة ببعضها بروابط تساهمية وأيونية، كالجزيئات تمامًا. أمّا في الفلزّات، فإنّ القوة الكهربائية الساكنة بين الإلكترونات الحرة والأيونات الموجبة تساعد على تشكّل **الرابطة الفلزّيّة**.
وفي المواد الصلبة البلورية، تترتب حالات الطاقة الممكنة في حُزَم. وتكون المستويات في كلّ حزمة قريبة من بعضها. ولكن، قد تكون هناك فجوات طاقة ممنوعة بين الحزم. تتميز الموصلات الجيدة بأنّ أعلى حزمة مأهولة (**حزمة التوصيل**) تكون مملوءة جزئيّا. ولذلك، هناك حالات كثيرة يمكن الوصول إليها ستكون متوافرة للإلكترونات لتتحرك بينها، وتتسارع عند تسليط فرق جهد. وفي العوازل الجيدة، تكون أعلى حزمة طاقة مأهولة (**حزمة التكافؤ**) مملوءة تماما . وتكون هناك طاقة فجوة كبيرة (5 eV إلى 10 eV) تفصلها عن الحزمة الأعلى التالية، **حزمة التوصيل**.وعند درجة حرارة الغرفة، تكون الطاقة الحركية الجزيئية (الطاقة الحرارية) المتوافرة نتيجة التصادمات حوالي 0.04 eV فقط. وبسبب ذلك، لن يستطيع أيّ إلكترون (تقريبا) القفز من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل. وفي شبه الموصل، تكون الفجوة بين حزمتي التكافؤ والتوصيل أصغر من ذلك بكثير، وهي بمستوى 1 eV. وعليه، فإنّ عدة إلكترونات فقط يمكنها الانتقال من حزمة التكافؤ المملوءة الرئيسة إلى حزمة التوصيل القريبة الفارغة تقريبا.
وفي شبه **الموصل المطعم**، تحلّ نسبة صغيرة من الذرات الشوائب ذات خمسة أو ثلاثة إلكترونات محلّ عدة ذرات سيلكون طبيعية مع إلكترونات تكافؤها الأربعة. وتنتج الشائبة ذات الإلكترونات الخمسة شبه موصل من نوع n لتكون الإلكترونات السالبة حاملات للتيار. وتنتج الشائبة ذات

الإلكترونات الثلاثة شبه موصل من **نوع** ***p*** لتكون **الثقوب** الموجبة فيه حاملات التيار. إنّ مستوى الطاقة للذرات الشائبة يركد قليلا أسفل حزمة التوصيل في شبه الموصل نوع *n*، ويعمل **كمانح** تنتقل منه الإلكترونات بسهولة إلى حزمة التوصيل. أما مستوى طاقة الذرات الشائبة في شبه موصل نوع *p* فيركد أعلى حزمة التكافؤ بقليل، ويعمل كمستوى **متقبّل**؛ لأنّ الإلكترونات من حزمة التكافؤ تستطيع الوصول إليه بسهولة، تاركة ثقوبًا خلفها حاملات للشحنة.

ويتكون **الصمّام الثنائي** شبه الموصل من **وصلة** ***p***، ويسمح للتيار بالانسياب في اتّجاه واحد فقط. ويمكن استخدامه كموحّد (مقوّم) لتغيير ac إلى dc.

تتكون الترانزستورات المألوفة من ثلاثة مقاطع شبه موصلة: إمّا ***pnp*** أو ***npn***. وتستطيع الترانزستورات تكبير الإشارات الكهربائية، كما أنّ لها استخدامات أخرى عديدة. وتتكون الدارة التكاملية من بلورة شبه موصلة ضئيلة جدًّا، أو شريحة. وقد بني الكثير من الترانزستورات والصمّامات الثنائية والمقاومات وعناصر دارة أخرى عليها عن طريق تطعيمها بالشوائب، وبمنتهى الدّقة والحرص.

أسئلة

***1.** ما نوع الرابطة التي تتوقعها لـ : (أ) جزي N_2 ؟ (ب) جزيء HCl؟ (جـ) ذرات F في مادة صلبة ما؟

***2.** صِفْ كيفية تشكّل الجزيء $CaCl_2$.

***3.** هل يمتلك أيّ من الجزيئات H_2 ، أو O_2، أو H_2O عزمًا ثناقطبيًّا دائمًا؟ فسّر.

***4.** بالرغم من أنّ الجزيء H_3 غير متزن، فإنّ H_3^+ متزن. فسّر مستخدمًا مبدأ باولي للاستبعاد.

***5.** ما أصناف طاقة الجزيء الأربع؟

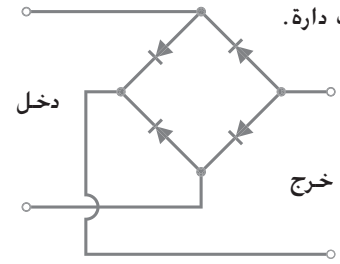
***6.** هل تتوقع أن يكون الجزيء H_2^+ متزنا؟ وإذا كان كذلك، أين يمكن للإلكترون الوحيد أن يقضي معظم وقته؟

***7.** فسّر لماذا تشكّل ذرة الكربون $(Z = 6)$ عادة أربع روابط مثل ذرات الهيدروجين.

***8.** إذا كانت إلكترونات التوصيل حرة الحركة في الفلز، فلِمَ لا تترك الفلزّ كليّا؟

***9.** فسّر لماذا تزداد مقاومة الفلزات مع درجة الحرارة، في حين أنّ مقاومة أشباه الموصلات ربما تقلّ مع ازدياد درجة الحرارة.

***10.** يبين (الشكل 29 – 33) موحد (مقوّم) موجه كاملة " نوع – جسر". فسّر كيف يوحّد اتجاه سريان التيار؟ وكيف ينساب التيار خلال كلّ نصف دارة.



الشّكل 29 – 33
(السّؤال 10)

***11.** قارن بين مقاومة وصلة صمام ثنائي *pn* موصول بطريقة الانحياز الأمامي من جهة، ومقاومته عندما يتمّ توصيله بالانحياز الخلفي.

***12.** فسّر كيف يمكن استخدام الترانزستور كمفتاح.

***13.** ما الفرق الرئيس في أشباه الموصلات من نوعي *n* و *p*؟

***14.** صِفْ كيف يمكن أن يعمل ترانزستور *pnp* كمكبّر.

***15.** في الترانزستور، يمكن اعتبار وصلة القاعدة – الباعث ووصلة القاعدة – المجمع صمامين ثنائيين أساسيين. فهل هاتان الوصلتان منحازتان إلى الأمام أم إلى الخلف في التطبيق المبين في (الشكل 29 – 32)؟

***16.** يمكن لترانزستور أن يكبر الإشارة الإلكترونية، أي زيادة قدرة الإشارة المدخلة . من أين يأتي بالطاقة لزيادة القدرة؟

***17.** طعّم شبه موصل من السيلكون بواسطة الفوسفور. فهل تُعدّ هذه الذرات مانحة أم متقبلة؟ ما النوع الذي سيصبح عليه شبه الموصل هذا؟

***18.** هل تتبع الصمّامات الثنائية والترانزستورات قانون أوم؟ فسّر.

***19.** هل يمكن استخدام الصمام الثنائي لتكبير إشارة ؟ فسّر.

مسائل

*29 - 1 إلى 29 – 3 الروابط الجزيئية

***1.** (I) قدّر طاقة ربط الجزيء KCl عن طريق حساب طاقة الوضع الكهربائية الساكنة إذا كانت المسافة الفاصلة بين الأيونين K^+ و Cl^- في حالته المستقرة 0.28 nm. افرض مقدار شحنة كلّ منهما $1.0e$.

***2.** (II) طاقة الربط المقيسة لـ KCl تساوي 4.43 eV. ومن نتيجة مسألة 1، قدّر المساهمة لطاقة الربط من السّحب الإلكترونية الطاردة عند مسافة الاتزان $r_0 = 0.28$ nm.

***3.** (II) قدّر طاقة الربط لجزيء H_2، مفترضًا أنّ نواتي الهيدروجين H تفصلهما مسافة 0.074 nm وأنّ الإلكترونين يقضيان 33% من وقتهما في منتصف المسافة بينهما.

***4.** (II) غالبًا، تقاس طاقات الربط عمليًّا بدلالة كيلو سعر/مول، وبعد ذلك تحسب طاقة الربط بدلالة eV/ مول من هذه النتيجة. ما معامل التحويل من كيلو سعر/مول إلى eV/مول؟ وما طاقة ربط (= 4.43 eV) KCl بدلالة كيلو سعر/مول؟

***5.** (III) (أ) طبّق منطقًا مشابهًا لما جاء في النّصّ للحالتين $S = 0$ و $S = 1$ عند تشكيل جزيء H_2 لتثبت سبب عدم تشكّل جزيء He_2. (ب) فسّر سبب تمكّن الجزيء الأيوني He_2^+ من التشكّل. (تظهر التجربة أنّ له طاقة ربط مقدارها 3.1 eV عند $r_0 = 0.11$ nm).

* 29 – 4 أطياف جزيئية

***6.** (I) أثبت أنّ للكمية $\hbar^2/I$ وحدات طاقة.

***7.** (II) ما يُسَمّى "الطاقة الدورانية المميزة" $\hbar^2/2I$ لـ N_2، هي 2.48×10^{-4} eV. احسب طول رابطة $N2$.

***8.** (II) (أ) احسب الطاقة الدورانية المميزة، $\hbar^2/2I$، لجزيء O_2 طول رابطته 0.121 nm. (ب) ما طاقات وأطوال أمواج الفوتونات المنبعثة من الانتقال $L = 2$ إلى $L = 1$؟

***9.** (II) إذا كانت مسافة الاتزان الفاصلة بين ذرتي H في جزيء H_2 هي 0.074 nm (الشكل 29 – 8)، فاحسب طاقات وأطوال أمواج الفوتونات للانتقالات الدورانية (أ) $L = 1$ إلى $L = 0$. (ب) $L = 2$ إلى $L = 1$. (جـ) $L = 3$ إلى $L = 2$.

*10. (II) احسب طول رابطة الجزيء NaCl إذا علمت أنّ ثلاثة أطوال أمواج متتالية لانتقالات دورانية هي كالتالي: 23.1 mm، و 11.6 mm، و 7.71 mm.

*11. (III) (أ) استخدم المنحنى في (الشكل 29 – 17) لتقدر ثابت الصلابة k لجزيء H_2. (تذكر أنّ $PE = \frac{1}{2}kx^2$). (ب) قدّر الطول الموجي الطبيعي للانتقالات الاهتزازية باستخدام الصيغة التقليدية (الفصل 11)، باستعمال $\frac{1}{2}$ كتلة ذرة هيدروجين فقط (لأنّ ذرتي H تتحركان).

* 29 – 5 الرّوابط في المواد الصّلبة

*12. (II) المسافة الفاصلة بين "الجارين" أيوني Na و Cl في بلورة NaCl تعادل 0.24 nm. ما المسافة الفاصلة بين أقرب جارين لأيونات الصوديوم؟

*13. (II) للملح الشائع، NaCl، كثافة مقدارها $2.165\ g/cm^3$، ووزن جزيئي 58.44. قدّر المسافة بين أقرب جارين (أيوني Na و Cl). [مساعدة: يمكن اعتبار كلّ أيون "كمكعّب" واحد أو "خليّة" واحدة طول ضلعها s (المجهول) يمتد نحو الخارج من عنده .

*14. (II) أعد حلّ المسألة 13 لـ KCl ذي الكثافة $1.99\ g/cm^3$.

* 29 – 6 نظرية الحزم للمواد الصّلبة

*15. (I) بناء على حزم الطاقة، فسّر سبب كون بلورة كلوريد الصوديوم عازلا جيدًا. [مساعدة : افترض قشور الأيونين Na^+ و Cl^-].

*16. (I) شبه موصل، يُقْصَفُ بضوء يتزايد تردده ببطء، فيبدأ بالتوصيل عندما يصل طول موجة الضوء إلى 640 nm. قدّر طاقة الفجوة E_g.

*17. (II) احسب أطول موجة لفوتون يستطيع أن يرغم إلكترونًا في السيلكون ($E_g = 1.4\ eV$) على القفز من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل.

*18. (II) تعادل طاقة الفجوة بين حزمتي التكافؤ والتوصيل في الجرمانيوم 0.72 eV. ما مدى أطوال الأمواج التي يمكن أن يمتلكها فوتون لإثارة إلكترون من قمة حزمة التكافؤ إلى داخل حزمة التوصيل؟

*19. (II) طاقة الفجوة E_g في الجرمانيوم تعادل 0.72 eV. عند استخدامه مكاشف فوتوني. تقريبا، ما عدد الإلكترونات التي يمكن إرغامها على القفز من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل الناجم عن تمرير فوتون طاقته 760-keV على أن يفقد طاقته كلّها بهذه الطريقة؟

*20. (III) لقد رأينا أنّ هناك $2N$ حالات إلكترونية ممكنة في حزمة $3s$ في الصوديوم Na، في حين N هو العدد الكلي للذرات. كم عدد حالات الإلكترون الممكنة في: (أ) حزمة $2s$؟ (ب) حزمة $2p$؟ (جـ) حزمة $3p$؟ واذكر صيغة عامة للعدد الكلي للحالات الممكنة في أيّ حزمة إلكترونية معطاة.

*29 – 7 أشباه الموصلات والتطعيم

*21. (III) افرض أنّ شبه موصل من السيلكون قد طعِّمَ بفسفور بحيث حَلَّ ذرّةُ فوسفور محلَّ ذرة سيلكون واحدة من 10^6 افرض أنّ الإلكترون "الإضافي" من كلّ ذرة فوسفور قد تمّ التبرع به لحزمة التوصيل. ما معامل ازدياد كثافة إلكترونات التوصيل؟ كثافة السيلكون $2330\ kg/m^3$، وكثافة إلكترونات التوصيل في السيلكون النقي $10^{16}\ m^{-3}$ عند درجة حرارة الغرفة.

*29 – 8 الصّمّامات الثّنائيّة

*22. (I) عند أي طول موجيّ سيشعّ LED إذا كانت طاقة فجوتها $E_g = 1.4\ eV$؟

*23. (I) إذ بعث LED ضوءًا طوله الموجي $\lambda = 650\ nm$، فما طاقة الفجوة (بدلالة eV) بين حزمتي التكافؤ والتوصيل؟

*24. (II) صمام ثنائي من السيلكون، ميزته (العلاقة) للتيار والفولتية مبينة في (الشكل 29 – 28)، وصل على التوالي مع بطارية ومقاومة 960-Ω. ما فرق جهد البطارية الضروري لإنتاج تيار مقداره 12-mA؟

*25. (II) افرض أنّ الصمام الثنائي في (الشكل 29 – 28) وصل على التوالي مع 100-Ω مقاومة و 2.0-V بطارية. ما التيار المنساب في هذه الدارة؟ [مساعدة : ارسم خطًّا على (الشكل 29 – 28) يمثل التيار المار في المقاومة كدالة في الفولتية خلال الصمام الثنائي. تقاطع هذا الخط مع المنحنى المميز سيعطي الحل].

*26. (II) ارسم المقاومة كدالة في التيار عند $V > 0$، للصمام الثنائي المبين في (الشكل 29 – 28).

*27. (II) فرق جهد متردد ac مقداره 120 V rms يجب أن يوحّد (يقوّم). قدّر بالتقريب التيار المتوسط في مقاومة الناخ R $(25\ k\Omega)$ لـ : (أ) موحّد نصف موجة (الشكل 29 – 29). (ب) موحّد موجة كاملة (الشكل 29 – 29). (ج) موحّد موجة كاملة (الشكل 29 – 30) بلا مواسع.

*28. (III) يسمح صمام ثنائي من السيلكون بمرور تيار كبير فقط إذا زاد فرق جهد الانحياز الأمامي عن 0.6 V. قدّر – على نحو تقريبي- التيار المتوسط في مقاومة الناخ R لـ: (أ) موحد (مقوّم) نصف موجة (شكل 29 – 29). (ب) موحد موجة كاملة (الشكل 29 – 29). (ج) موحّد موجة كاملة (الشكل 29 – 30) بلا مواسع. افرض أنّ $R = 150\ \Omega$ في كلّ حالة، وأنّ فرق الجهد المتردد ac هو 12.0V rms في كلّ حالة.

*29. (III) فرق جهد مقداره 120-V rms عند 60-Hz يجب أن يوحد (يقوّم) باستخدام موحد (مقوّم) موجة كاملة (الشكل 29 – 30)، حيث $R = 21\ k\Omega$ و $C = 25\ \mu F$. (أ) قدر بالتقريب التيار المتوسط. (ب) ماذا يحدث إذا كانت $C = 0.10\ \mu F$؟ [مساعدة: انظر البند 19 – 6].

*29 – 9 ترانزستورات

*30. (II) في (الشكل 29 – 32)، اكتب معادلة للعلاقة بين تيار كلّ من: القاعدة (I_B)، و المجمع (I_C)، و الباعث (I_E، غير معلّم في الشّكل).

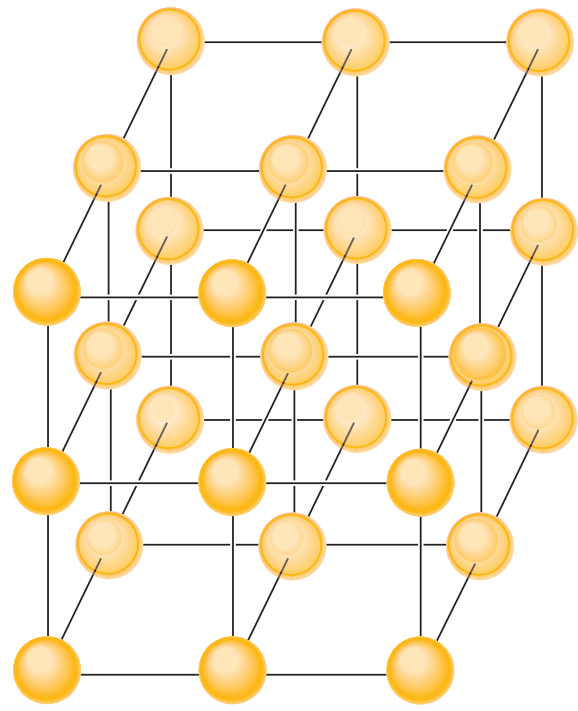
مسائل عامة

*31. قدِّر طاقة الربط لجزيء H_2 عن طريق حساب الفرق في طاقة حركة الإلكترونات بين الحالتين عندما تكون في ذرات منفصلة، وعندما توجد داخل الجزيء، باستخدام مبدأ عدم اليقين. خذ بالحسبان Δx للإلكترونات في الذرات المنفصلة ليكون نصف قطر فلك بور الأول، 0.053 nm، وخذ Δx للجزيء افترض المسافة الفاصلة بين النواتين، 0.074 nm. [مساعدة: افرض $p \approx \Delta p_x$].

*32. متوسط الطاقة الحركية الانتقالية لذرة أو جزيء هو حوالي $\overline{KE} = \frac{3}{2}kT$ (المعادلة 13 – 8)، و $k = 1.38 \times 10^{-23}\ J/K$ وهو ثابت بولتزمان $\overline{KE}$. عند أيّ درجة حرارة T ستكون بمقدار طاقة الرابطة (وبسبب ذلك يمكن أن تنكسر الرابطة نتيجة للحركة الحرارية) (أ) رابطة تساهمية طاقة ربطها 4.5 eV (لنقل H_2). (ب) رابطة هيدروجينية "ضعيفة" طاقة ربطها 0.15 eV؟

*33. في الملح الأيوني KF، المسافة الفاصلة بين الأيونات 0.27 nm تقريبا. (أ) قدّر طاقة الوضع الكهربائية الساكنة (الكهروسكونية) بين الأيونات على افتراض أنها شحنات نقطية (قيمتها $1e$). (ب) من المعلوم أنّ F تطلق 4.07 eVمن الطاقة عندما "تمسك" إلكترونا، و 4.34 eVضرورية لتأيين K. أوجد طاقة ربط KF نسبة إلى ذرات K و F الحرة مع إهمال طاقة التنافر.

*34. افترض مادة صلبة أحادية الذرة ذات شبكة بلورية ضعيفة الارتباط، حيث كلّ ذرة مرتبطة بستة من جيرانها، وطاقة كلّ رابطة 3.9×10^{-3} eV. عندما تنصهر هذه المادة الصلبة، تذهب حرارة الانصهار الكامنة مباشرة إلى كسر الروابط بين الذرات. قدِّر قيمة حرارة الانصهار الكامنة لهذه المادة الصلبة بوحدة J/kg. [مساعدة : أثبت أنّ عدد الروابط في الشبكة المكعبة البسيطة (الشكل 29 – 34) يعادل ثلاثة أضعاف عدد الذرات إذا كان عدد الذرات كبيرًا].



(الشكل 29 – 34) (المسألة 34).

*35. ما عزم القصور (أو الاستمرارية) الذاتي حول مركز الثقل لجزيء O_2 إذا كان طول رابطته 0.121 nm؟

*36. وُجِدَ أنّ طاقة التنشيط لجزيء ثنائي الذرة تساوي 1.4 eV. وعند تفكك الجزيء أطلقت طاقة مقدارها 1.6 eV. ارسم منحنى طاقة كامنة لهذا الجزيء.

*37. عند سقوط أشعة EM على الماس، وُجدَ أنّ ضوءًا طوله الموجي أقصر من 226 nm يجعل الماس موصلا. ما طاقة الفجوة بين حزمتي التكافؤ و التوصيل للماس؟

*38. يبعث جهاز التحكم البعيد في جهاز التلفاز ضوء IR. إذا كان للمكاشف على جهاز التلفاز ألّا يتجاوب مع الضوء المرئي، فهل يمكن أن يستخدم السيلكون "كنافذة" حيث طاقة فجوته $E_g = 1.14$ eV؟ ما أقصر طول موجة ضوء يستطيع أن يصطدم بالسيلكون دون أن تسبّب في قفز الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل؟

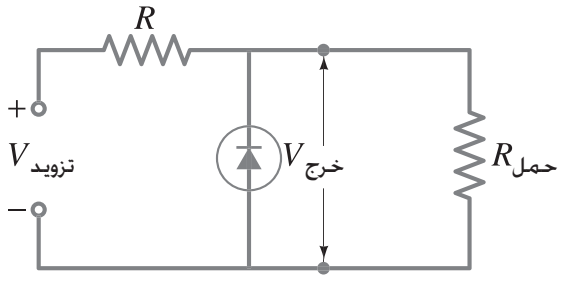
*39. لذرَّةِ زرنيخ مانحة في شبه الموصل السيلكون المطعّم، افرض أنّ الإلكترون "الإضافي" يتحرك في فلك بور حول أيون الزرنيخ. ولهذا الإلكترون في الحالة الأرضية، خذ بالحسبان ثابت العازل $K = 12$ لشبكة السيلكون (تمثل الضعف في قوة كولوم الناجم عن الذرات أو الأيونات الأخرى في الشبكة) وقدّر: (أ) طاقة الربط. (ب) نصف قطر فلك هذا الإلكترون الإضافي. [مساعدة: عوض عن $\epsilon = K\epsilon_0$ في قانون كولوم، انظر البند 17 – 8].

*40. معظم إشعاعات الشمس تمتلك أطوال أمواج أقصر من 1000 nm. ولكي تمتص خلية شمسية ، ما طاقة الفجوة التي يجب أن تمتلكها هذه المادة؟

*41. لشبه موصل معين، أطول طول موجة إشعاعات يمكن امتصاصها تعادل 1.92 mm. فما طاقة الفجوة في شبه الموصل هذا؟

*42. أصبح LED الأخضر والأزرق متوافرًا بعد سنوات عديدة من تطوير أوّل LED أحمر. ما طاقة الفجوات التي تتوقع إيجادها لِـ LEDs أخضر (525 nm)، و LEDs أزرق (465 nm) تقريبًا؟

*43. منظم فولتية صمام زنر الثنائي مبين في (الشكل 29 – 35). افرض أنّ $R = 1.80$ kΩ، وأنّ الصمام الثنائي سينهار عند الجهد العكسي 130 V. (يزداد التيار باضطراد عند تلك النقطة، كما هو مبين أقصى يسار (الشكل 29 – 28) عند فرق جهد مقداره 12 V – على ذلك الرسم التخطيطي). صُنّف الصمّام الثنائي عند أقصى تيار 120 mA. (أ) إذا كان الحمل $R_{load} = 15.0$ kΩ، ما مدى فرق الجهد المزود الذي ستحافظ عنده الدارة على فولتية ناتجة مقدارها 130 V؟ (ب) إذا كان فرق الجهد المزود 200 V، ما مدى مقاومة الحمل الذي سينظم عنده فرق الجهد؟



الشكل 29 – 35 (المسألة 43).

إجابات التمارين

أ : 1.30 mm ، 0.87 mm ، 0.85 mm .

ب : 0.81 eV.