



كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : حالة صلبة 1

المحاضرة : الخامسة / نظري /

{{ مكتبة A to Z }}

مكتبة A to Z Facebook Group :

كلية العلوم

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر (What's app-Telegram) على الرقم 0931497960

2026

9

الباب الرابع  
العيوب التركيبية فى البلورات

**Structural Defects in  
Crystals**



## الباب الرابع العيوب التركيبية في البلورات Structural Defects in Crystals

### المحتوى

- 1-4 مقدمة  
2-4 العيوب النقطية.  
3-4 العيوب النقطية في البلورات الأيونية.  
4-4 أنواع أخرى من العيوب النقطية.  
4-5 العيوب الخطية.  
4-6 العيوب المستوية.  
4-7 تعيين تركيز وطاقة التنشيط لتكوين الفراغ.  
4-8 تعيين طاقة تكوين الفراغ عمليا

### الأهداف

بعد استكمال دراسة هذا الباب يجب أن يكون الدارس قادراً على:-

- وصف الأنواع المختلفة للعيوب التركيبية النقطية منها والخطية.
- معرفة أنواع وكيفية تكوين الإنخلاعات في الشبكة البلورية.
- التمييز بين الإنخلاع اللولبي وإنخلاع الحافة وخصائص كل منهما.
- تعريف كل من متجه ودائرة بيرجر للإنخلاعات المختلفة.
- معرفة الأنواع المختلفة من العيوب المستوية.
- المقارنة بين الأسطح الحرة وحدود الحبيبة والحدود الطورية.
- فهم منشأ عيوب التعبئة (الرص).
- استنتاج الصيغة النظرية لتركيز و الفراغات نظريا وكيفية تعيين طاقة التنشيط عمليات.

## 1-4 مقدمة

يعتبر التنظيم الدوري للذرات في البناء البلوري من أهم الخصائص البلورية، ولذلك، فإنه عند دراسة التركيب الذري لبلورات المواد فإننا نهتم بمواضع الذرات في البلورة ونتأكد من وجود هذه الذرات في أماكنها الدورية. وبالرغم من أن وجود العيوب البلورية في كثير من المواد الصلبة يؤدي إلى تحسين بعض خصائصها الفيزيائية إلا أنه كثيراً ما راود العلماء حلم الحصول على بلورة تامة لدرجة الكمال المطلق في دوريتها ودقة وانتظام تركيبها وتأتي صعوبة ذلك بسبب الكثير من الصعوبات التي تحدث أثناء التحضير. تؤدي هذه الصعوبات إلى الإخلال في الدورية وعدم تكامل التناسق وإنتاج بلورة تحتوي على عيوب في التركيب. تتعدد أنواع العيوب البلورية طبقاً لمنشئها، فمثلاً وكما ذكرنا من قبل، يعتبر سطح البلورة نوعاً من أنواع التشوه وذلك بسبب تعطل التكرار والدورية عند السطح، حيث ترى الذرات القريبة من السطح بيئةً محيطةً مختلفةً عما تراه الذرات الموجودة في عمق البلورة وبالتالي تسلك سلوكاً مختلفاً. وكذلك، يسبب الاهتزاز الحراري للذرات، حول مواضع اتزانها عند درجة حرارة أكبر من الصفر المطلق، تشوهاً للبلورة بدرجة تعتمد على درجة الحرارة. كما يؤدي وجود ذرات غريبة في التركيب البلوري إلى خلق عيوباً تسمى بالشوائب. وبالرغم من تقنيات التحضير المتقدمة إلا أنه غالباً ما تحتوي البلورة المحضرة على بعض الذرات الغريبة وحتى عند تحضيرها بواسطة أفضل وسائل النمو البلوري فإنه تبقى بعض الشوائب (بتركيز  $10^{12} \text{ cm}^{-3} \sim$ )

داخل البلورة وتجعل من الصعب تعيين التركيب البلوري الصحيح. وبناء على ما سبق، لا يكون للبلورات الحقيقية تركيب بنائي تام الانتظام وذلك بسبب وجود عيوب تختلف باختلاف أنواع وأبعاد البلورة. تتعدد العيوب البلورية فمنها: العيوب النقطية والعيوب الخطية والعيوب السطحية. العيوب النقطية هي عبارة عن وجود نقص في بعض نقط الشبكة البلورية على شكل فراغات تمثل عدم وجود ذرة أو جزئ أو مجموعة من الذرات في نقطة ما بالشبكة.

من المدهش أن وجود العيوب في البلورات يؤدي، في كثير من الأحيان، إلى تحسين الكثير من الخصائص الفيزيائية لبعض المواد حيث يمكن الحصول على سبائك معدنية جديدة تتميز بمقاومة عالية للأحمال المؤثرة. كما تعود خاصية التوصيل الكهربائي في بعض أشباه الموصلات إلى وجود كمية ضئيلة من الذرات الشائبة، وكذلك تسبب هذه العيوب مراكز لونية (color centers) في بعض المواد مما يجعلها مناسبة للعديد من التطبيقات التكنولوجية هذا بالإضافة إلى ارتباط التآلق الضوئي (photo-luminescence) بهذه الشوائب.

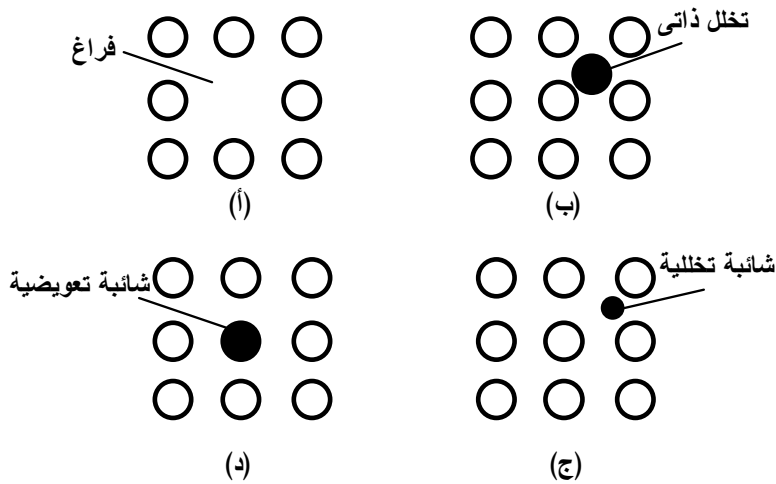
تنقسم العيوب البلورية على عدة أقسام: 1- عيوب ساكنة، وهي العيوب الدائمة نتيجة تشوه التركيب البلوري، 2- عيوب مؤقتة يمكن التخلص منها بالمعالجة المناسبة و 3- عيوب الإثارة وتحدث نتيجة وجود مؤثر خارجي مثل المجال الكهربائي، المجال المغناطيسي أو خلفه وتزول هذه العيوب بزوال المؤثر. كما يمكن أيضا تصنيف العيوب

البلورية طبقاً لنوع التشوه التي تسببه هذه العيوب، على النحو الآتي: 1- عيوب تتسبب في تشويه المنطقة المجاورة لها فقط من الشبكة البلورية تشوهاً موضعياً محدوداً لا يتعدى بضعة خلايا وحدة وتسمى هذه العيوب بالعيوب النقطية (point defects). 2- عيوب تؤثر في صف بأكمله من صفوف الذرات الشبكة البلورية، وتسمى هذه العيوب بالعيوب الخطية (line defects) أو الإنخلاعات (dislocations). 3- عيوب مستوية وتتشترك فيها ذرات مستوى بلوري كامل. سنتعرض في هذا الباب بالتفصيل لدراسة الأنواع المختلفة من هذه العيوب البلورية وتأثيرها على خصائص البلورة الفيزيائية.

#### 2-4 العيوب النقطية POINT DEFECTS

العيوب النقطية هي عيوب موضعية تنشأ من غياب ذرة عن مكانها في الشبكة البلورية أو عن وجود ذرة زائدة في غير مكانها. يوجد نوعان من العيوب النقطية تكون متأصلة في المادة، بمعنى أنها تنشأ أثناء نمو البلورة ومن دون أي تدخل خارجي هما الفراغ (vacancy) والذرة المتخللة (interstitial)، كما هو مبين بالشكل 1-4. ينشأ الفراغ عندما تغيب الذرة عن مكانها في الترتيب الدوري للشبكة البلورية، كما هو مبين بالشكل 1-4(أ). يكون النوع الثاني من العيوب النقطية عبارة عن وجود ذرة زائدة متخللة في التركيب البلوري، أي تحتل ذرة ما مكاناً بين الذرات الأصلية، سواء كانت هذه الذرة أصلية (من نفس نوع ذرات البلورة) ويسمى العيب في هذه الحالة تخلل ذاتي (self interstitial)، كما هو مبين بالشكل 1-4(ب) أو كانت ذرة غريبة وتسمى الشائبة. في

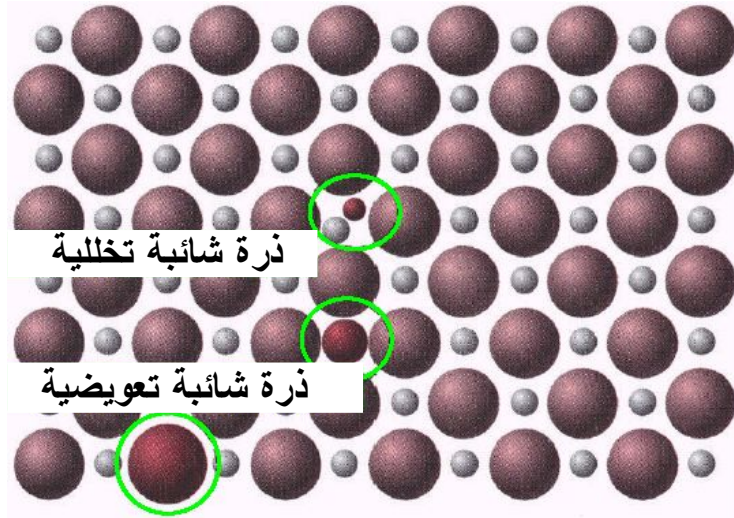
الحالة الأخيرة، تحتل الذرة الشائبة مكانا بين الذرات الأصلية (بين المستويات البلورية)، ويسمى العيب النقطي في هذه الحالة بالشائبة المتخللة (interstitial impurity)، كما هو مبين بالشكل 1-4(ج). غالبا ما تكون مثل هذه الشوائب عبارة عن ذرات ذات حجم أصغر من الذرات الأم ويمكنها من شغل مكان بين المستويات الذرية للبلورة من دون إخلال ملحوظ في أبعاد البلورة، كما في حالة الهيدروجين في بلورة الكربون. عندما تحل الذرة الغريبة محل ذرة أصلية في الترتيب البلوري يسمى العيب، في هذه الحالة، بشائبة تعويضية (substitutional)، كما هو مبين بالشكل 1-4(د). يحدث هذا النوع من العيوب عندما تكون حجم الذرة الشائبة كبير ويقارب حجم ذرات البلورة الأصلية، كما في حالة ذرة النيكل في بلورة الحديد. في هذه الحالة لا يضطرب الترتيب البلوري ولكن فقط نوع الذرات في الشبكة البلورية يكون مختلف.



الشكل 1-4 أنواع مختلفة من العيوب النقطية في بلورة أساسية.

الشكل 2-4 يلخص ويجمع بين أنواع العيوب الناشئة عن وجود ذرات الشوائب

في التركيب البلوري بقصد المقارنة.

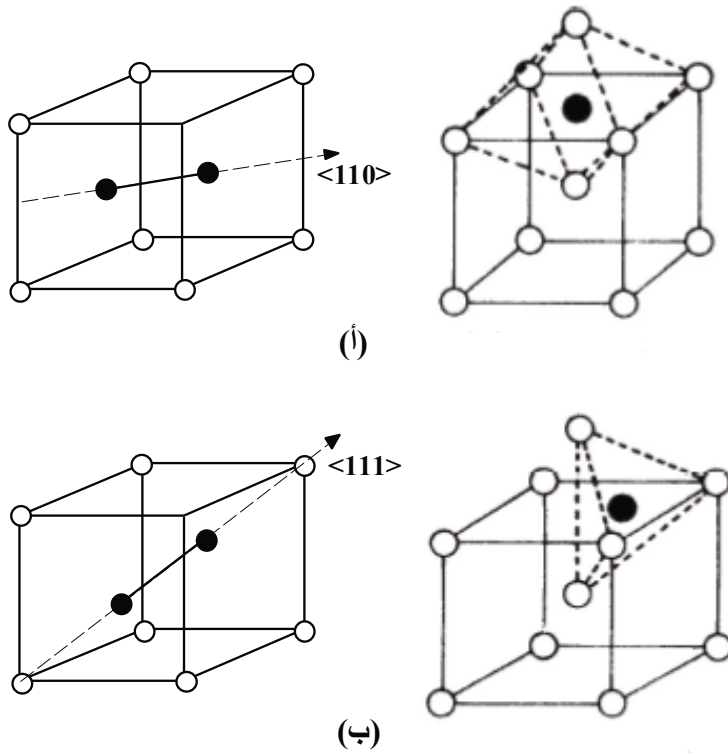


الشكل 4-2 مقارنة العيوب النقطية الناتجة عن الشوائب.

بالإضافة إلى تطابقها مع الذرات المضيفة (الأم) فإن الشوائب التخللية والذرات التخللية الذاتية تختلف في الطريقة التي تكمن بها في الشبكة. يبين الشكل 4-3، بلورة متمركزة الجسم، على سبيل المثال، تحتوي على ذرة متخللة. لكي تحتل الذرة المتخللة ذاتيا هذا المكان فإنها تزيح الذرة المضيفة عن مكانها الطبيعي في البلورة مكونة معها ما يسمى بزوج من الذرات على شكل الدمبل (dumbbell-shaped pair) (الدمبل هو كرتان حديديتان بينهما قضيب معدني)، كما هو مبين في يسار الشكل 4-3. يتعين كل من اتجاه الدمبل المتكون والمسافة بين الذرتين بواسطة الحالة التي معها تكون طاقة وضع الشبكة نهائية صغرى.

على الجانب الآخر، تحتل ذرات الشوائب المتخللة، أحيانا، مواضع محددة دون إحداث تشوه في البلورة المضيفة. يمكن تسمية هذه المواضع طبقا للشكل المتعدد الأسطح المتكون من التوصيل بين الذرات المضيفة التي تحيط بالذرة المتخللة. يبين الشكل كيف

أن الذرات المتخللة، في البلورة المتمركزة الجسم، تحتل مركز شكل سداسي الأسطح (كما في الجزء (أ)) أو تحتل مركز شكل رباعي الأسطح (كما في الجزء (ب)). يوفر أحد هذين الشكلين (سداسي الأسطح أو رباعي الأسطح) معظم الفراغ لكي تكمن فيه الذرة الشائبة. يعتمد نوع متعدد الأسطح المتكون على طاقة التفاعل بين الذرة الشائبة والذرات المضيفة اعتمادا أساسيا وبشكل حساس.



الشكل 3-4 الشوائب المتخللة في بلورة متمركزة الجسم.

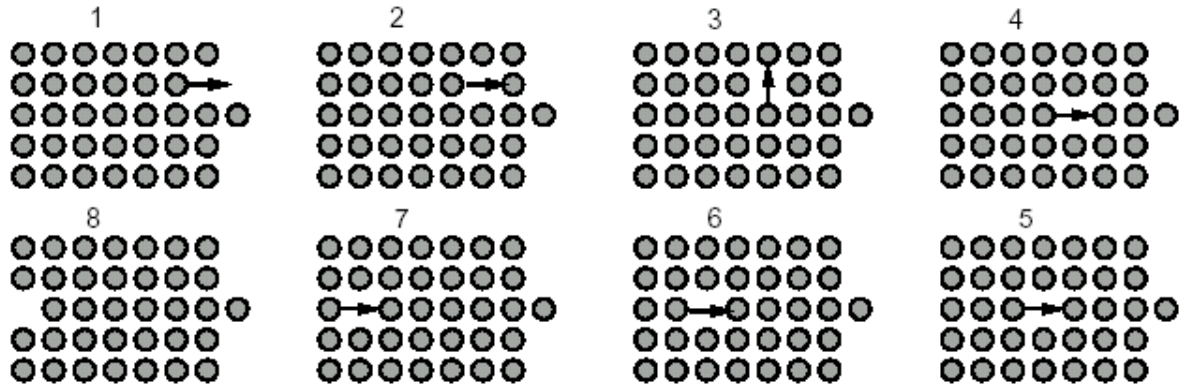
### 3-4 العيوب النقطية في البلورات الأيونية POINT DEFECTS IN IONIC CRYSTALS

تتكون الشوائب المتخللة والفراغات بشكل طبيعي في البلورات الأيونية كما تحدث في بلورات العناصر الصلبة. ومن ناحية أخرى، بسبب أن الكاتيونات والأنيونات في البلورات الأيونية تحمل شحنات كهربية، فإن عمليات تكون الفراغات أو التخللات هي

عمليات غير مستقلة، نظرا لأن القوى الكولومية (Columbic forces) بين الأيونات في هذه البلورات تكون كبيرة جدا. لذلك، لكي يتكون فراغ أنيون، عن طريق تحريكه إلى السطح، مثلا، فإن السطح سوف تظهر عليه شحنة سالبة، بينما تظهر شحنة موجبة حول الفراغ المتكون داخل البلورة، وذلك للمحافظة على التعادل الكهربائي للبلورة. يمكن تطبيق نفس المفهوم على فراغات كاتيون الذرة المتخللة ذاتيا.

يكون تركيز الفراغات في المواد النقية صغيرا جدا (حوالي فراغ لكل  $10^8$  ذرة) ويزداد هذا التركيز بارتفاع درجة الحرارة (حوالي فراغ لكل  $10^3$  ذرة بالقرب من درجة الانصهار). تعتبر الفراغات مهمة لأنها تحكم معدل الانتشار (أو الإحلال) الذري في الهيكل البنائي للمادة، بمعنى أن مقدرة الذرات على الحركة في الجسم الصلب يرجع، في المقام الأول، إلى وجود الفراغات. تكون حركة الفراغ داخل المادة عن طريق الإزاحة والإحلال محل الذرات المجاورة. يبين الشكل 4-4 ديناميكية حركة الفراغ داخل بلورة جسم صلب ذو عيوب متراسة (لتبسيط المفهوم، يمكن تشبيه حركة الفراغ بحركة فراغ في جراج سيارات مزدحم).

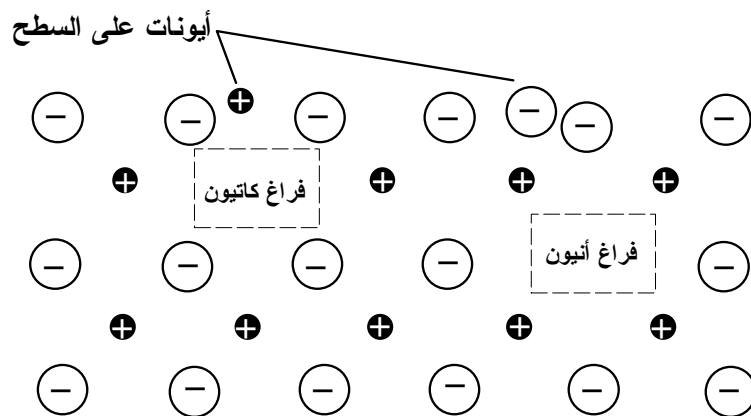
يوجد نوعان من العيوب الفراغية في البلورات الأيونية هما عيب شوتكي (Schottky defect) وعيب فرنكل (Frenkel defect). فيما يلي سندرس بشئ من التفصيل كل نوع من هذه العيوب وذلك بقصد ترسيخ المفهوم وتسهيل المقارنة بينهما.



الشكل 4-4 ديناميكية حركة الفراغ داخل بلورة جسم صلب ذو عبوة مترابطة.

### 1-3-4 فراغات شوتكي SCHOTTKY VACANCIES

يتكون فراغ شوتكي في المركبات الكيميائية ذات النظام البلوري الأيوني والذي يتطلب فيه اتزان الشحنة بين الأيونات المتجاورة. ينشأ فراغ شوتكي عندما تترك الذرة مكانها وتنتقل بخطوات متتابعة حتى تستقر في النهاية على سطح البلورة تاركة خلفها مكان شاغرا، كما هو موضح في الشكل 4-5، وكنتيجة لذلك يتكون زوج من فراغات الأيونات إحداهما سالب الشحنة والأخر موجب الشحنة للحفاظ على هذا الاتزان الكهربائي.



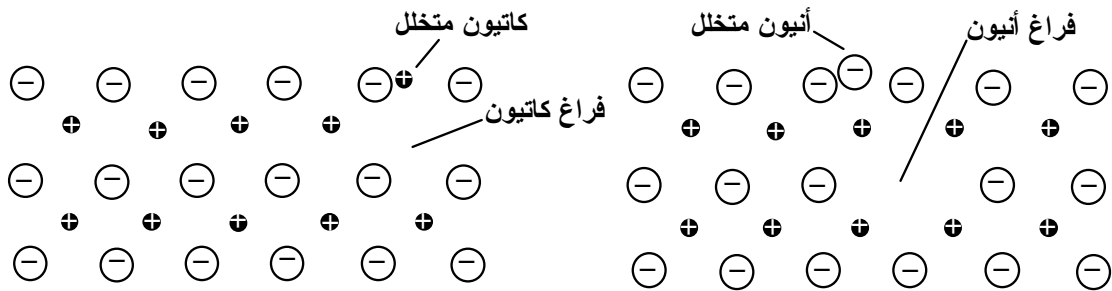
الشكل 4-5 أنواع فراغات شوتكي.

ونظرا لمخالفة شحنة الفراغ المتكون لشحنة الايون الذي ترك مكانه وتحركه إلى

السطح فإن ذلك يكافئ زوج من الأيونات المختلفة الشحنة ولذلك يسمى عيب شوتكى، أحيانا، بعيب الزوج الأيوني. يلعب هذا النوع من العيوب دورا كبيرا في تغير بعض الخصائص الفيزيائية للمادة وخاصة سرعة انتشار (diffusion) الذرات داخل البلورة.

#### 2-3-4 فراغات فرنكل FRENKEL VACANCIES

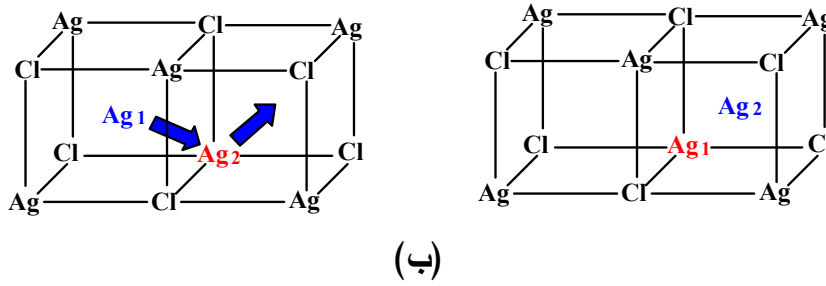
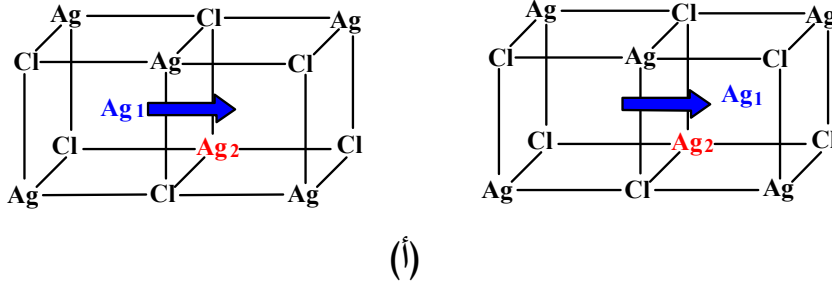
تنشأ عيوب فرنكل في المركبات الكيميائية ذات الرابطة الأيونية ويوجد نوعان من هذه العيوب تحدث في نفس الوقت: النوع الأول هو أن تترك الذرة مكانها الطبيعي في الترتيب الدوري وتتحشر بين الذرات الأخرى، أي تستقر بين المستويات الذرية مكونة ذرة تخليلية. بينما يكون النوع الثاني عبارة عن الفراغ الناتج عن ترك الذرة لمكانها في الترتيب. يحمل الفراغ المتكون دائما شحنة مشابهة للشحنات المحيطة به، كما هو مبين في الشكل 4-6. يسمى عيب فرنكل، أحيانا، بعيب الأيون المزاح.



الشكل 4-6 أنواع فراغات فرنكل.

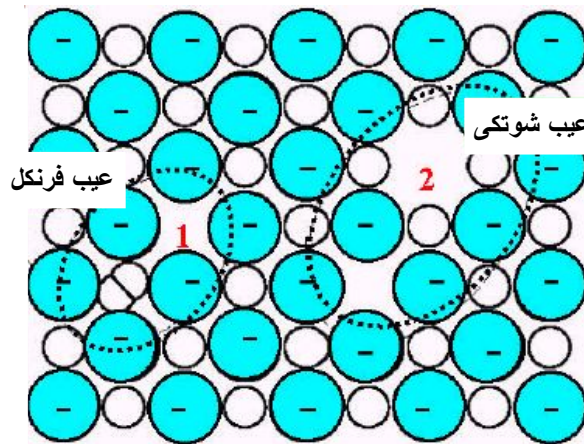
من الممكن أن يتحد الفراغ مع الذرة المتخللة ويختفي العيبان معا، كما إنه من الممكن أن يتحد فراغين لتكوين فراغ ثنائي (divacancy) وتكون حركته أسهل من الفراغ المفرد، كما يمكن أن يتجمع عدد كبير من الفراغات معا وينشأ عن ذلك فجوة. تتحرك

عيوب فرنكل في البلورة الأيونية بأحد طريقتين: بالقفز المباشر للذرة المتخللة، كما هو مبين بالشكل 7-4 (أ)، أو بميكانيكية التخلل، كما هو مبين في الشكل 7-4 (ب).



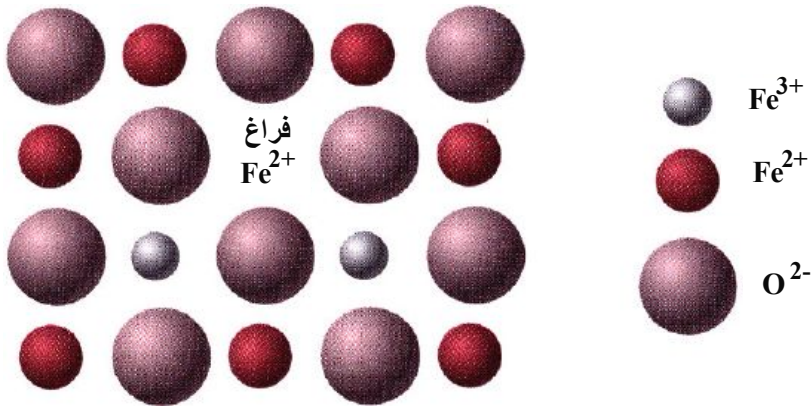
الشكل 7-4 حركة عيوب فرنكل في بلورة كلوريد الفضة

عادة تتكون الفراغات بالقرب من الأسطح الحرة (free surfaces) وبالقرب من حدود الحبيبات (grain boundaries) وأيضاً بالقرب من الإنخلاعات. يمكن المقارنة بين عيوب شوتكى وعيوب فرنكل بالرجوع إلى الشكل 8-4.



الشكل 8-4 مقارنة بين عيوب شوتكى وفرنكل.

لا تغير عيوب شوتكى وفرنكل النسبة بين الأنيونات والكاتيونات في المواد الأيونية معروفة الصيغة الكيميائية (stoichiometric compounds)، بينما من الممكن أن تؤدي إلى تغيير التركيب الكيميائي في المواد غير المعروفة الصيغة الكيميائية (non-stoichiometric compounds). تحتوي المواد غير المعروفة الصيغة الكيميائية على عناصر انتقالية، مثل الحديد والذي يمكن أن يوجد على إحدى الحالتين:  $Fe^{2+}$  أو  $Fe^{3+}$  ولذلك فهي غير معروفة الصيغة الكيميائية. على سبيل المثال، في بلورة أكسيد الحديد، FeO، يكون تكافؤ الحديد +2. فإذا تحول زوج من أيونات الحديد ذو تكافؤ +2 إلى حديد ذو تكافؤ +3، فإن ذلك يتطلب وجود فراغ للمحافظة على تعادل الشحنة، وبذلك يتغير التركيب الكيميائي، كما يتضح في الشكل 4-9.



الشكل 4-9 تكون الفراغ في بلورة أكسيد الحديدوز.

#### 4-4 أنواع أخرى من العيوب النقطية OTHER TYPES OF POINT DEFECTS

بالإضافة إلى الأنواع السابقة توجد أنواع أخرى من العيوب النقطية، حيث تترك ذرة أصلية مكانها في الترتيب المنتظم وتتحشر بين الذرات الأصلية الأخرى وتسمى في

هذه الحالة ذرة تخلليه ذاتية. يحدث هذا النوع من العيوب في المواد البلورية التي لها كثافة تعبئة ذرية منخفضة. تحتاج هذه العملية إلى طاقة كبيرة لكي تحدث ولذلك فهي تتم فقط عند درجات الحرارة العالية أو عند التأثير على المادة الصلبة بشعاع من الطاقة مثل شعاع النيوترونات.

#### 5-4 العيوب الخطية LINE DEFECTS

يعتبر الإنخلاع أكثر العيوب الخطية شيوعا. والانخلاع هو عبارة عن خط منتظم من الذرات التي غابت عن مكانها (misplaced atoms) في الشبكة البلورية. غالبا، يمتد هذا الخط مسافة كبيرة نسبيا داخل الشبكة. يمكن تقسيم الإنخلاعات إلى إنخلاع الحافة و الإنخلاع اللولبي. سنشرح هذه الأنواع بشئ من التفصيل في الفصل التالي.

يوجد العديد من الشواهد العملية على وجود العيوب الخطية في المواد البلورية منها:

1- اختلاف الخصائص الميكانيكية للمواد الصلبة عما هو متوقع، حيث وجد أن قيم العديد من الخصائص الميكانيكية للمواد الصلبة أقل بآلاف المرات من القيم المتوقعة بالنسبة للبلورات المثالية.

2- في تجارب تشتت الأشعة السينية وجد أن شدة الحيود في البلورات الحقيقية يختلف كثيرا عن شدة الحيود المحسوبة على أساس افتراض أن التركيب البلوري مثالي أي لا يتضمن عيوب خطية.

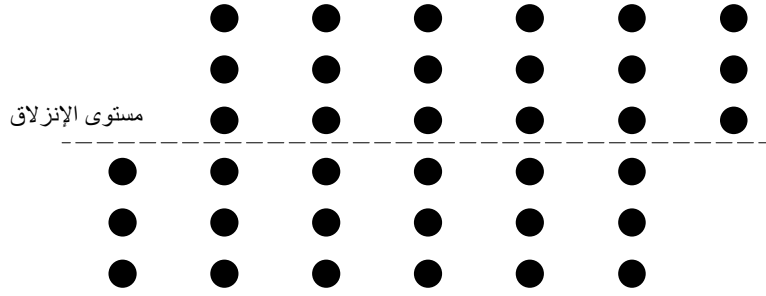
---

3- وجد أن بعض المحاليل الكيميائية تؤثر على مناطق معينة من سطح البلورة (على صورة تآكل) أكثر من تأثيرها على المناطق الأخرى، حيث وجد أن المناطق التي تتأثر أكثر هي تلك التي تتجمع عندها العيوب الخطية.

4- وجد اختلافا كبيرا بين معدل نمو البلورة المقاس ومعدل النمو المحسوب على أساس افتراض وجود بلورة مثالية.

5- يمكن باستخدام الميكروسكوب الالكتروني رؤية العيوب الموجودة في العينة مباشرة حيث تظهر الإنخلاعات كخطوط معتمة على شاشة فلورسينية.

الإنخلاع، كما ذكرنا من قبل، هو عيب خطي يوجد في البلورة ويتضمن عدد كبير من الذرات مرتبة حول خط. عند التأثير بقوة خارجية على بلورة فإنها تتعرض لإجهاد يحدث تشوها من الممكن أن يكون هذا التشوه مرنا أو غير مرن. في حالة التشوه المرن تعود البلورة إلى شكلها الأصلي بعد إزالة القوة المؤثرة. ولكن عند تعريض البلورة لإجهاد أكبر فإنه يحدث للبلورة تشوها غير مرن (دائم) عن طريق الانزلاق. يؤدي الإجهاد إلى حدوث انفعال في الشبكة البلورية ينتج عنه إزاحة للذرات عن مواضع اتزانها الأصلية وعندما يكون الإجهاد كبيرا فإن الانفعال يكون على صورة زحفا ملموسا لعدد كبير من الذرات مكونا تشوها غير مرن يسمى بالإنخلاع. يبين الشكل 4-10 عملية انزلاق للمستويات البلورية بمقدار خطوة مقدارها ذرة واحدة.

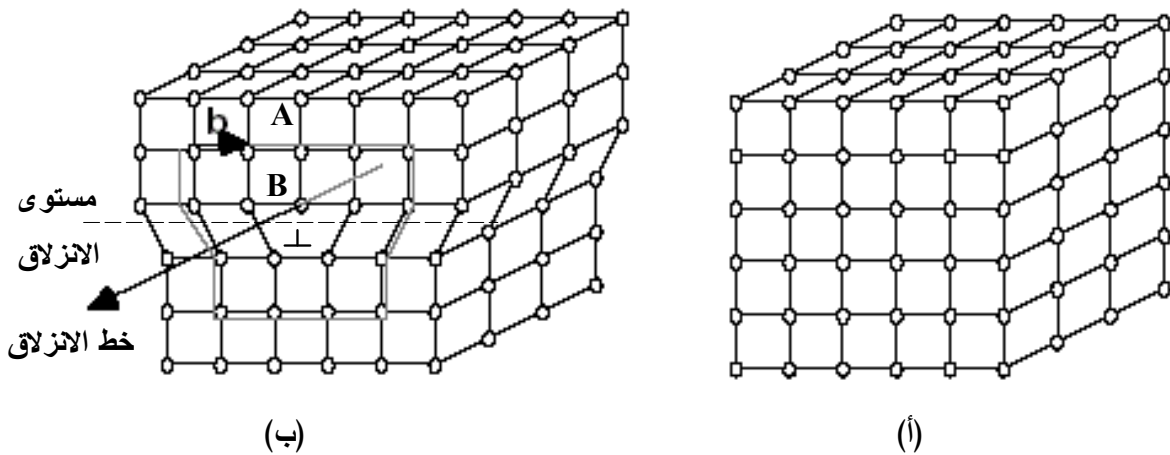


الشكل 4-10 عملية انزلاق للمستويات البلورية بمقدار ذرة واحدة.

عادة تتكون الفراغات الناتجة عن الإنخلاع بالقرب من الأسطح الحرة وبالقرب من حدود الحبيبات وأيضا بالقرب من الإنخلاعات. فيما يلي سنناقش النوعين الأساسيين من الإنخلاعات وهما: إنخلاع الحافة أو النهاية والإنخلاع اللولبي (Screw dislocation).

#### 1-5-4 إنخلاع الحافة EDGE DISLOCATION

يجمع الشكل 4-11 رسم تخطيطي لبلورة غير مشوهه بمعنى لا تحتوي على عيوب (الجزء (أ)) وبلورة مشوهة يوجد بداخلها إنخلاع حافة (الجزء (ب) من الشكل) بقصد توضيح المفهوم وتسهيل المقارنة.



الشكل 4-11 إنخلاع الحافة داخل الشبكة البلورية.

يمكن تفسير إنخلاع الحافة على أساس أن هناك جزء من مستوى زائد محشور

داخل البلورة (الجزء AB في الشكل 4-11(ب)). ينتج عن هذا الجزء تولد إجهاد ضغط على بعض مناطق الجوار وإجهاد شد على المناطق الأخرى وهذا يؤدي إلى زيادة طاقة الوضع على امتداد خط الإنخلاع. يلاحظ أن جزء البلورة الذي يوجد فيه جزء المستوى الزائد يحدث له ضغط، أي تكون ذراته مضغوطة بعضها مع بعض ، بينما يحدث للجزء السفلي تمدد بسبب غياب جزء من المستوى. يرمز لإنخلاع الحافة بالرمز  $\perp$ .

ينزلق الإنخلاع على المستويات الواقع عليها خط الإنخلاع أثناء عملية تشكيل المواد البلورية عند التأثير عليها بإجهادات قص، وبذلك يمكن تخفيض سمك أو أقطار المواد المعدنية عند تشكيلها. يوصف الإنخلاع بمقدار الانزلاق الحادث وذلك بواسطة متجه يعرف بمتجه بيرجر (Burger vector) أو متجه الانزلاق (slip vector). يعرف هذا المتجه بأنه الخطوة التي يخطوها الإنخلاع عند الانزلاق.

يرمز لمتجه الانزلاق بالرمز  $\bar{b}$ ، ويكون مقداره هو المسافة التي ينزاحها الإنخلاع في الخطوة الواحدة وتحدد بدلالة البعد الذري، فعلى سبيل المثال في البلورة المكعبة من الممكن أن تكون الإزاحة عبارة عن مضاعفات صحيحة لمتجهات انتقال الشبكة، أي خطوة واحدة ( $a$ ) أو خطوتين ( $2a$ ) أو ثلاث خطوات ( $3a$ ).... وهكذا، حيث  $a$  هي المسافة البينية للذرات (طول ضلع المكعب). يكون اتجاه حركة الإنخلاع أو متجه الانزلاق عموديا على خط الإنخلاع.

يبين الشكل 4-12 حركة إنخلاع حافة بمقدار خطوة واحدة وذلك عند التأثير علي