Semiconductors
أشباه الموصلات
المرحلة الثالثة

مدرس المادة : د. فتحي محمد جاسم البدراني

المصادر

1. نبائط أشباه الموصلات، فيزياء و تقنية، تاليف أس. أم. زي، ترجمة د. فهد غالب حياتي و د. حسين علي أحمد، دار الحكمة للطباعة و النشر- الموصل، 1990
2. فيزياء الحالة الصلبة، الجزء الاول، تأليف د. مؤيد جبرائيل يوسف، مطبعة بيت الحكمة
3. مقدمة في فيزياء أشباه الموصلات، تأليف .د. يسري مصطفى و د. الحسيني الطاهر، 2017
4. Basic Semiconductor Physics, 3rd edition, Chihiro Hamaguchi, Springer International Publishing, Switzerland, 2017.
5. Fundamentals of Semiconductors, physics and materials properties, 4th edition, Peter Y. Yu and Manuel Cardona, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
6. The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Nanophysics and Applications, 3rd edition, Marius Grundmann, Springer International Publishing Switzerland, 2016.

المحاضرة الأولى

التآصر، الهياكل البلورية، وعلوم المواد

Bonding, Crystal Structures, and Materials Science

شبه الموصل مادة صلبة بلورية فيها تشكل الذرات المنفردة شبيكة دورية معامل توصيلها الكهربائي اقل بكثير من معامل التوصيل الكهربائي للفلزات. تختلف عن البلورات الايونية الصلبة الستخدمة في ليزر الحالة الصلبة في طريقة تمثيل مستويات الطاقة وبالتالي ميكانيكية الضخ وعملية الانبعاث الضوئي. تمثل مستويات الطاقة في شبه الموصل صفة عامة من الصفات الداخلية للشبيكة البلورية ككل ولايمكن التكلم عن مستوى طاقة لذرة اوجزيئة منفردة او ايون منفرد في شبه الموصل او ايون مطعم في بلورته. هذا بالاضافة الى ان ليزر شبه الموصل يختلف عن ليزر الحالة الصلبة في اغلب الصفات الفيزيائية والهندسية وابرزها الاختلاف في الحجم، فلا يتجاوز اكبر بعد في ليزر شبه الموصل عن 1 mm كذلك ان الخصائص الفيزيائية لشبه الموصل ذات العلاقة بعمل الليزر والتي تتغير مع الظروف الخارجية كالضغط ودرجة الحرارة تختلف عن تلك الخصائص وظروف تغيرها للبلورات الايونية او الزجاج في ليزر الحالة الصلبة.

يمكن تصنيف المواد الصلبة بناءا على خواصها الكهربائية و البصرية و الحرارية الى

1. **المعادن Metals**

الكهربائية: تعتبر المعادن موصلة (conductor) جيدة للكهرباء في درجة حرارة الغرف، و يستمر المعدن في التوصيل بشكل جيد حتى مع انخفاض درجة الحرارة.

البصرية: يمتص الضوء في المدى المرئي ويزداد الامتصاص مع زيادة الطول الموجي (λ).

الحرارية: تعتبر موصلة في جميع درجات الحرارة.

امثلة: الفضة و النحاس و الالمنيوم و البلاتين.

2. **أشباه الموصلات Semiconductors**

الكهربائية: رديئة التوصيل الكهربائي بدرجة الحرارة الغرفة، ولكن يمكن التحكم في التوصيل و زيادتها باضافة نسب قليلة من الشوائب (dopants). تنخفض توصيلية اشباه الموصلات مع انخفاض درجات الحرارة. لا توصل في درجات الحرارة المنخفضة اي تعتبر عازل كهربائي.

البصرية: تمتص أشباه الموصلات الضوء المرئ (Visible) باطوال موجية محددة، و تمتص الأشعة تحت الحمراء القريبة (near-IR)، كما و تمتص أشباه الموصلات الضوء بشكل ضعيف الاطوال موجية الاطول من الأشعة تحت الحمراء القريبة ($\lambda >$ near-IR).

الحرارية: ضعيفة التوصيل في درجات حرارة الغرفة وغير موصلة في درجات الحرارة المنخفضة.

امثلة: عناصر مثل السلسكون و الجرمانيوم، مركبات مثل $Cu(In,Ga)_3Se_5$ or (CIGS), CdTe, GaAs, GaP, CdS

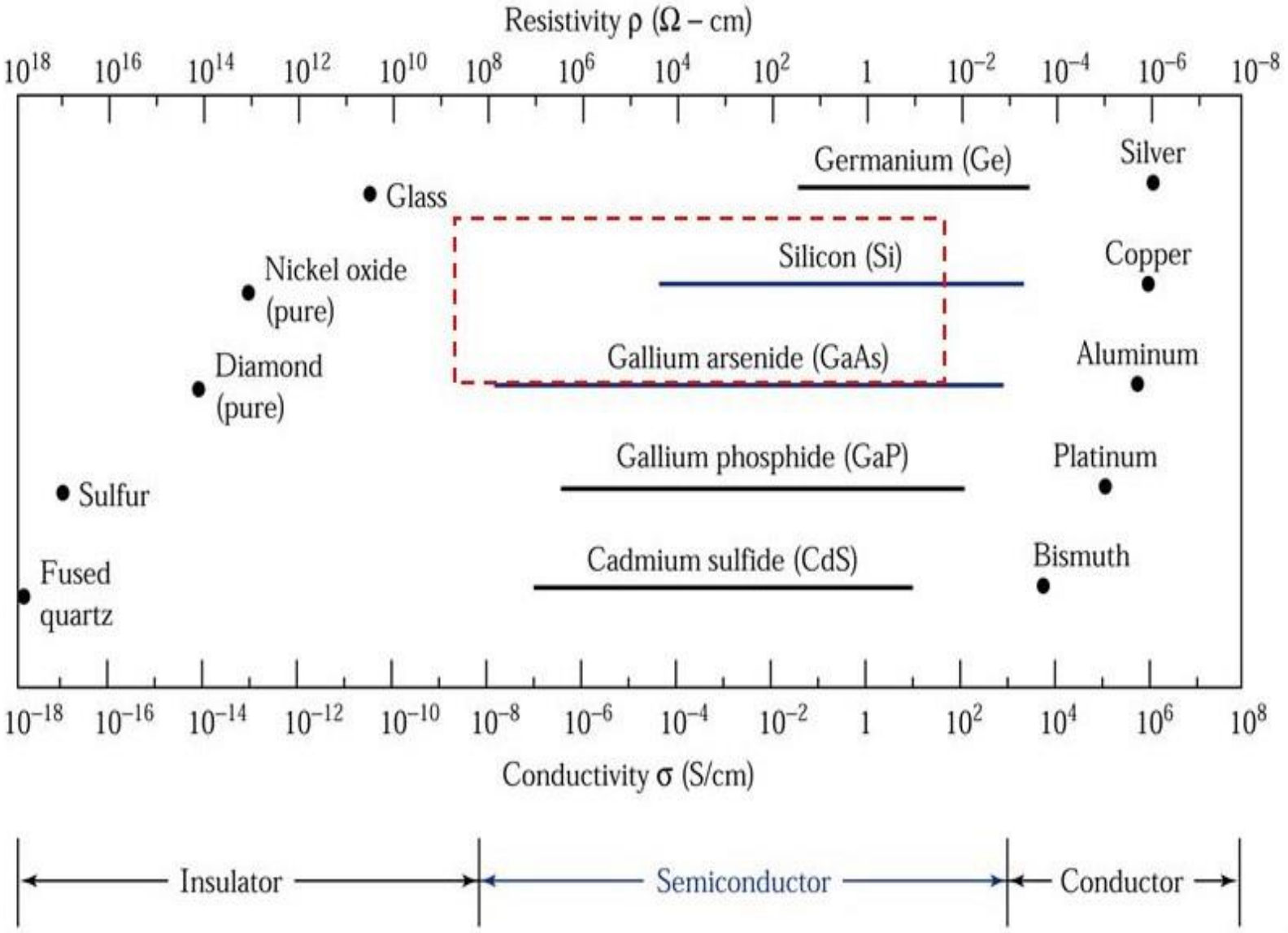
3. العوازل Dielectrics

الكهربائية: غير موصلة للكهربائية او عازلة (insulator) في درجة حرارة الغرفة. و بالأخذ بعين الاعتبار بانه لا يوجد عازل مثالي، حيث يمكن تنشيط التوصيل عند ارتفاع درجة الحرارة بشكل كافٍ، على افتراض أن المادة تبقى مستقرة عند درجة الحرارة العالية.

البصرية: لا تمتص الضوء المرئي أو تمتصه بشكل ضعيف جدا، و قد تمتص الاشعة فوق البنفسجية (ultraviolet, UV) باطوال موجية معينة.

الحرارية: غير موصلة في درجات حرارة الغرفة.

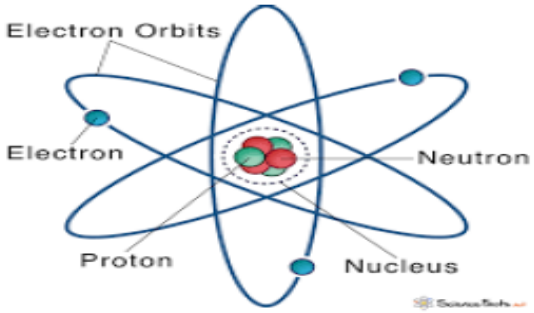
امثلة: الورق و الزجاج و الميكا و البلاستك و الكوارتز.


Resistivity ρ (Ω – cm)
10^18 10^16 10^14 10^12 10^10 10^8 10^6 10^4 10^2 1 10^-2 10^-4 10^-6 10^-8
Germanium (Ge)
Silver
Glass
Silicon (Si)
Copper
Nickel oxide (pure)
Gallium arsenide (GaAs)
Aluminum
Diamond (pure)
Gallium phosphide (GaP)
Platinum
Sulfur
Cadmium sulfide (CdS)
Bismuth
Fused quartz
10^-18 10^-16 10^-14 10^-12 10^-10 10^-8 10^-6 10^-4 10^-2 1 10^2 10^4 10^6 10^8
Conductivity σ (S/cm)
Insulator
Semiconductor
Conductor

المحاضرة الثانية

البنية الذرية Atomic Structure

البنية الذرية Atomic Structure



من المعروف أن جميع المواد تتكون من ذرات (atoms) مكونة من نواة (nucleus) تحوي نوعين من الأجسام, أحدهما موجب الشحنة ويطلق عليها بروتونات (p) والثاني متعادل الشحنة يطلق عليها نيوترونات (n)، ويدور حول النواة، وفي مدارات ثابته، الكترونات سالبة الشحنة .(e^-) وتعتمد مقدرة مادة معينة على إيصال التيار الكهربائي على مقدار ارتباط إلكترونات المدار الخارجي، والتي تسمى الكترونات التكافؤ (valence elections) ، مع نواة الذرة.

و حسب نموذج بور الذري (atomic shell model of the Bohr atom)، تهيمن كتلة النواة على كتلة الذرة التي يها والتي يمكن اعتبارها مصدر الشحنة (q) و الكتلة (m)

شحنة النواة $q = +Ze$

كتلة النواة $m = Zm_p + Nm_n$

m_n كتلة النيترون

m_p كتلة البروتون

Z العدد الذري (atomic number) او عدد البروتونات

N العدد النيترونات

شحنة الالكترون e و التي تساوي 1.6×10^{-19} كولوم.

علما ان عدد الكتلة الذرية (atomic mass number) أو عدد النوكليون A nucleon number يعبر عنه بالعلاقة $A = Z + N$. يتحكم العدد الذري Z في السلوك الكيميائي للذرة و التي تولد سحابة كثيفة الالكترونات السالبة الشحنة تتمحور حول النواة.

لتبسيط وصف البنية الالكترونية، سنأخذ بعين الاعتبار ذرة الهيدروجين التي تحتوي على الكترون واحد. اما بالنسبة للذرة المتعددة الالكترونات، فيوصف توزيع كثافة الشحنة بواسطة دالة موجة ذرية (atomic wavefunction) وهي دالة معقدة ذات أجزاء حقيقية و تخيلية و التي يمكن حلها بواسطة معادلات

شرودنكر Schrödinger equation. و لتسهيل وصف و حل الدالة الذرية، يمكننا اعتبار ان كل إلكترون يدور في مداره الخاص. وبالنظر لوجود إلكترون واحد في هذا المدار، فيُفترض أن السحابة الالكترونية المتكونة من $Z-1$ من إلكترونات ستحجب شحنة النواة تمامًا بحيث تكون الشحنة النووية الظاهرة هي +e كما في ذرة الهيدروجين. تبعاً لمبدأ استبعاد باولي (Pauli exclusion principle)، فإن لكل إلكترون في الذرة متعددة الإلكترونات مجموعة من الأرقام الكمية (quantum numbers) التي تصف حركة الإلكترون في حالته الأرضية (ground state) و المثارة (excited state) و التي تميزه عن باقي الإلكترونات هذه الأعداد الكمية هي

1. **عدد الكم الرئيسي principal quantum number** و يرمز له ب **n**، و هو عدد صحيح $n = 1, 2, 3, 4, \ldots$ ، و التي يمكن التعبير عنها برمز القشرة shell $K, L, M, N, \ldots$.
2. **عدد الكم المداري orbital angular momentum quantum number** و يرمز له ب ℓ، و هو ايضا عدد صحيح، حيث ان $l = 0, 1, 2, 3, \ldots l \ (l < n)$ و التي يمكن التعبير عنها برمز القشرة الثانوية sub-shell $s, p, d, f, g, h, i \ldots$. يرتبط هذا العدد الكمي بـ "شكل" الدالة الموجية أي بمعنى شكل المدار.
3. **عدد الكم المغناطيسي magnetic quantum number** و يرمز له ب m_ℓ، و هو ايضا عدد صحيح قيمته بين $+l, \ldots 0 \ldots, -l$ و الذي يساوي

$$m_l = -l, -(l-1), \ldots (l-1), +l$$

4. **عدد الكم البرمي spin quantum number** و يرمز له ب m_s وقيمته تساوي $\pm 1/2$

المحاضرة الثالثة
العيوب البلورية

تتشكل البنية البلورية بسبب الحد الأدنى من الطاقة الكامنة الكهروستاتيكية electrostatic potential energy لمجموعة من الذرات المكونة لتلك البنية البلورية او البلورة. يعد التوازن بين عملية إنماء السطح البلوري ومصدر المادة الصلبة (على سبيل المثال ، بخار أو سائل) مهم جدا لإنماء بلورة مثالية و خالية من العيوب. على سبيل المثال، يجب أن تكون حرارة الصهارة متجانسة أثناء عملية التصلب وذلك من أجل إنتاج بلورة خالية من العيوب. يمكن أن تؤدي عمليات النمو باتجاه بعيد عن التوازن إلى تكوين تشوهات بلورية و عيوب و أشكال وتراكيب غير مستقرة. تنطبق مبادئ الديناميك الحرارية الكلاسيكية Principles of classical thermodynamics على البلورات بسبب العدد الكبير من الذرات المكونة لها، و نتيجة لذلك، وحتى في ظل أفضل الظروف الممكنة للنمو، فلا توجد بلورات مثالية. ففي ظل التوازن الحراري في درجة حرارة معينة، تتولد العيوب باستمرار أثناء النمو والتي يتم تلدينها و انتشارها وتوزيعها في البلورة إلى أن تتوازن تراكيز العيوب، وهذا التوازن يعتمد على درجة الحرارة. حتى العيوب الموجودة بتركيزات منخفضة جدًا يمكن أن تكون مهمة وتتحكم في الخصائص التركيبية و الإلكترونية للمواد الصلبة.

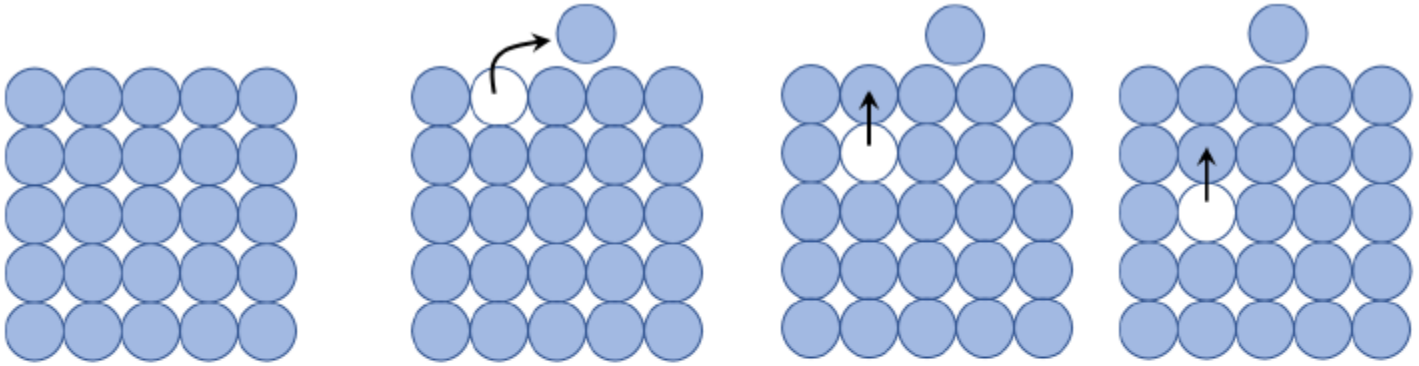
تصنف العيوب الى:

1. عيوب نقطية Point defects مثل الفجوات و الذرات الإضافية و عيوب شوتكي و عيوب فرنكل.
2. عيوب ذات البعد الواحد One dimensional (1D) defects، العيوب خطية Linear defects، مثل الانخلاع الحافي و برمي.
3. عيوب ذات البعدين Two dimensional (2D) defects، العيوب المستوية Planner defects، مثل عيوب الرص و حدود الحبيبات و التوائم.
4. عيوب ذات الثلاث ابعاد Three dimensional (3D) defects، العيوب الحجمية Volume defects، مثل عناقيد كبيرة لعيوب نقطية.

العيوب النقطية: الفجوات والشوائب Point Defects: Vacancies and Impurities

الفجوات Vacancies

قد تحتوي البلورات على فجوات (فراغات) ذرية عند درجة حرارة أعلى من الصفر المطلق، أي مواقع ذرات اصلية في شبيكة بلورية تفتقد إلى الذرات. تتكون هذه الفجوات لتحقيق شرط للتوازن الحراري، وبالتالي يسمى هذا النوع من العيوب البلورية بالعيوب الحرارية الديناميكية Thermodynamic defect. تهتز الذرات في البلورة حول مواضع توازنها، وجزء صغير جدًا من الذرات الموجودة على سطح البلورة يمكن أن يمتلك طاقة اهتزازية كافية للقفز إلى الوضع غير مستقر على السطح. يمكن للفجوة السطحية المتكونة أن تنتشر داخل المادة كما هو موضح في ادناه.



يتسبب الانتشار الذري في انتشار الفجوة الى مواقع اكثر عمقا داخل البلورة.

انتشار ذرة في وسط البلورة لملئ الفراغ/الفجوة مخلفة مكان الفجوة اخرى في مكان اعمق داخل البلورة.

ذرة نشطة على السطح تمتلك طاقة كافية لتكسير الاواصروالقفز إلى موضع جديد مجاور على السطح تاركة فجوة خلفها.

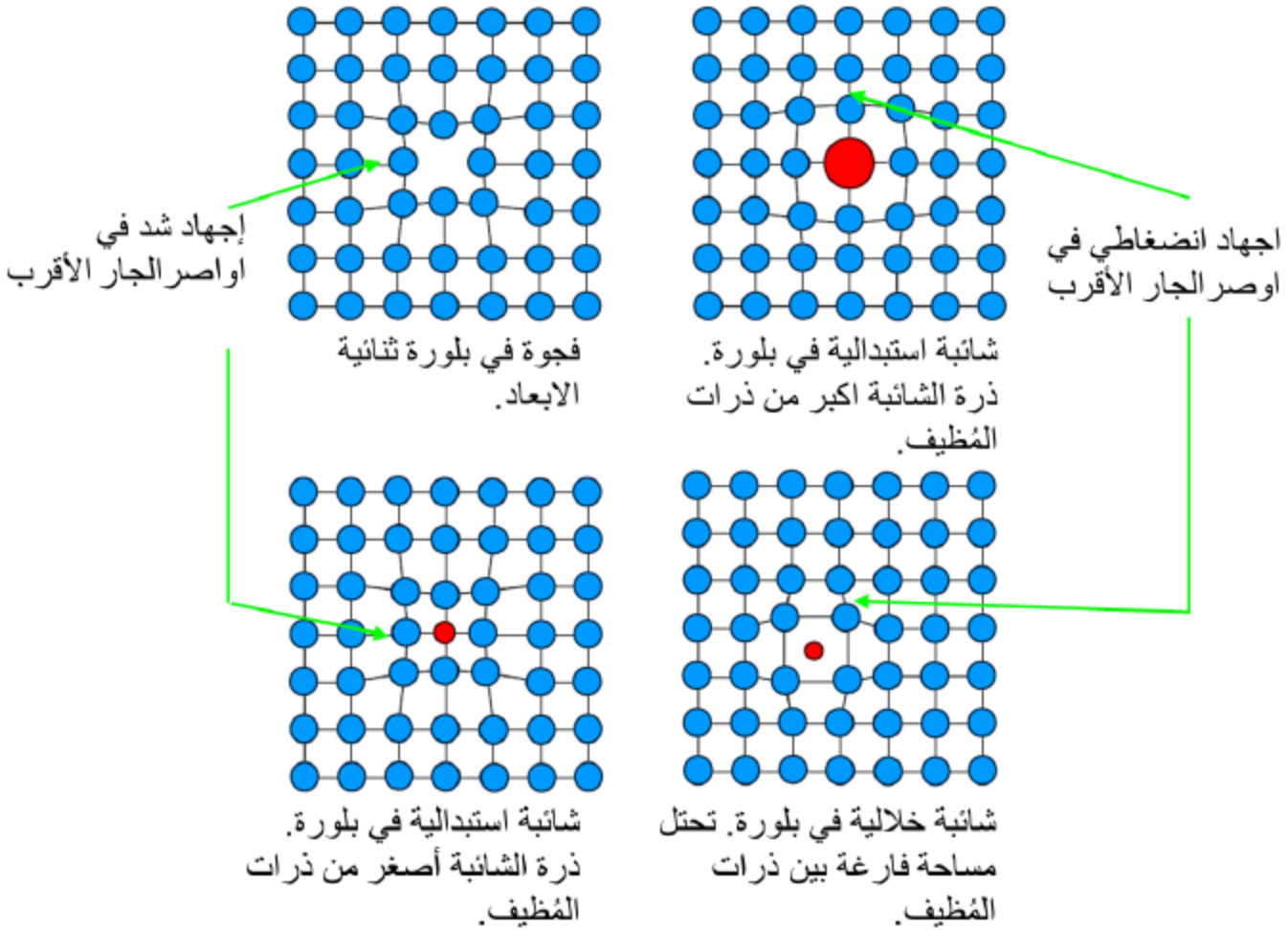
بلورة مثالية خالية من الشوائب

تولید الفجوات عن طریق انتشار الذرة على السطح والانتشار اللاحق للفجوات باتجاه عمیق داخل البلورة Crystal bulk.

الشوائب Impurities

أما الشوائب (ذرات إضافية غريبة) فهي أيضًا تولد عيوبًا نقطية في المواد البلورية الصلبة، وقد تكون موجودة عن غير قصد unintentionally أو نتيجة للتطعيم المتعمد Intentional doping. فإذا استبدلت ذرة الشوائب بذرة البلورة المُظيفة host atom مباشرة، أي أن تحتل الذرة الشائبة لموقع أصلي في البلورة خالي من الذرات فإن الذرة الشائبة تسمى ذرة شائبة الاستبدالية أو تعويضية Substitutional impurity.

مثال على ذلك P في Si و الذي يكتب بالشكل Si: P. أما إذا احتلت الذرة الشائبة موقع بيني في الشبيكة البلورية فإن الذرة الشائبة تسمى ذرة شائبة بينية Interstitial impurity. مثال C في Fe الذي يكتب بالشكل Fe: C. كما موضح بالشكل ادناه.



العيوب النقطية في التركيب البلوري ثنائي الأبعاد. نلاحظ أن المناطق المحيطة بالعيوب النقطية تتشوه و بذلك تصبح الشبيكة البلورية تحت تأثير الإجهاد.

المحاضرة الرابعة

الامتصاص والانبعاث المحفز في شبه الموصل

عند ربط الصمام بفرق جهد امامي (V) يساوي تقريباً E/e فان المجال الكهربائي كما هو مبين في الشكل (1) سيعمل على ازاحة موضع مستوى فيرمي في كل نوعي البلورة بمقدار يعطى بلعلاقة:

$\Delta F = eV$ .....(2)

كما يسبب استخدام الجهد الامامي في حقن حاملات التيار (الالكترونات في منطقة التوصيل في نوع n-، والفجوات في منطقة التكافؤ في النوع – p) وباتجاهين متعاكسيننحو منطقة الملتقى وبهذا يتم التحامهما في طبقة ضيقة تدعى (بطبقة النضوب) تنبعث عنها الاشعة الطلوبة.

ان مستويات الطاقة والمبينة في النوعين n & p والتي هي ليست في حالة توازن حراري مع بعضها البعض يمكن ان تفسر كالتالي: يحدث في كل نطاق وبصورة سريعة وضعالتوازن الحراري النسبي فيمكن عندئذ وصف التوزيع الالكتروني لمستويات الطاقة في كل نطاق بحالة يطلق عليها (شبه مستويات فيرمي) ويعبر عنها بدالة فيرمي-ديراك وكالاتي:

$$f_v=(1+e^{(((E-F_v))/KT)})^{(-1)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$
$$f_c=(1+e^{(((E-F_c))/KT)})^{(-1)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

اما الملتقى سيكون في هذه الحالة بعيداً عن حالة التوازن ولايمكن معاملته كمستوى فيرمي للانتقال المحفز. عند التحام الكترون مع فجوة موجبة فان الطاقة الكلية تتحرر كفوتون يعطي تردده وفق معادلة بلانك، اي ان:

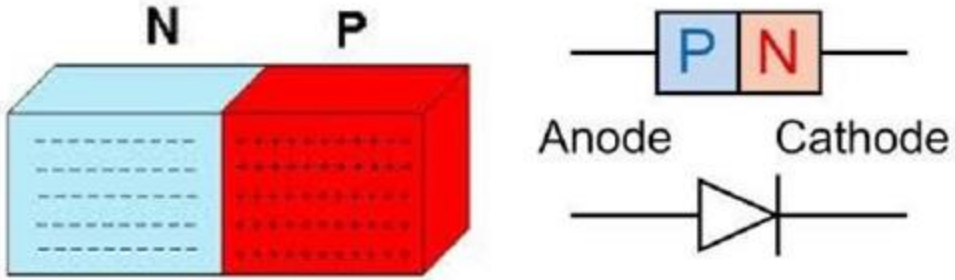
$$h\nu=E2-E1 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

ويمثل $E2$ & $E1$ طاقة الالكترون في الحالة الابتدائية والنهائية على التوالي

المحاضرة الخامسة

p-n junction مفرق الثنائي

يتكون ثنائي الوصلة p-n عند التقاء شبه موصل من النوعين السالب والموجب مع بعضهما. ويتم هذا الجمع بتصنيع الثنائي على بلورة واحدة من مادة شبه موصلة بحيث يصبح احد نصفيها سالب والاخر موجب وذلك عن طريق ادخال المادة الشائبة المناسبة الى نصفي البلورة. وتدعى البلورة عندئذ بالبلورة الثنائية اوا لثنائي البلوري وقد اشتهر استعمال نوعين من الثنائيات البلورية هما ثنائي السليكون وثنائي الجرمانيوم.



الشكل يوضح شكل ورمز الثنائي البلوري.

منطقة الاستنزاف The depletion region

عند جمع نصفي مفرق الـ p-n، و لكون أن تركيز الإلكترونات في النوع السالب (لوجود المانحات Nd) والفجوات (لوجود القابلات Na) في النوع الموجب هو أكبر بكثير مما هو في النوع الآخر، سيتسبب بحدوث انحدار في تركيز الإلكترونات dn/dx في المنطقة السالبة وكذلك انحدار في تركيز الفجوات dp/dx في المنطقة الموجبة، ذلك سيؤدي الى انتقال أو انتشار بعض الالكترونات الى المنطقة الموجبة عبر المفرق وكذلك انتقال بعض الفجوات إلى المنطقة السالبة.

إن عبور الالكترونات الى المنطقة (p) سوف يجعل منه حاملاً أقلية لوجود الأعداد الكبيرة من الفجوات حوله يكون زمن بقائه قصيراً في حال دخوله المنطقة (p) يسقط في فجوة وعندما يتم هذا فإن الفجوة تختفي ويصبح الإلكترون الحر الكتروناً تكافؤياً، كذلك هو الحال بالنسبة للفجوات العابرة إلى المنطقة (n) حيث تقوم باقتناص إلكترون حر من بين الأعداد الكبيرة المحيطة بها. حيث تتعادل حاملات الشحنة مع

بعضها ويحصل ما يسمى بالتحام الالكترون- فجوة (electron – hole recombination) فتصبح المنطقة القريبة من المفرق خالية من ناقلات الشحنة الحرة من الجهتين n و p كما في الشكل ادناه، إذ تبقى الشحنات مقيدة على جهتي المفرق وتدعى هذه المنطقة بمنطقة الاستنزاف depletion region أو طبقة الاستنزاف depletion layer. كما و تسمى أحيانا بـ منطقة شحنة الفضاء space charge region.

إن انتشار الحاملات وانتقالها من جهة إلى أخرى لا يعني انتقال الذرات الام التابعة لها، ذلك لأن الذرات الام تكون مرتبطة مع مثيلاتها من الذرات الأخرى بأواصر تساهمية يصعب كسرها، وانما يؤدي الى تكوين شحنتين مختلفتين الاشارة على جانبي الحد الفاصل في للمفرق p-n. ويسبب تخلف الأيونات الموجبة في المنطقة (n) والأيونات السالبة في المنطقة (p) كما في شكل ادناه. ان كل زوج متكون من الأيون الموجب والسالب يدعى بثنائي القطب (dipole)، وان وجود مثل هذا الثنائي القطب يعني أن الكتروناً واحداً من الكترونات حزمة التوصيل وفجوة واحدة قد توقفتا عن الحركة، وبتزايد أعداد هذه الثنائيات القطبية ستخلي المنطقة القريبة من الحد الفاصل بين وصلتي p-n من الشحنات المتحركة مكونة منطقة الاستنزاف التي تم توضيحها سابقاً. ومن الجدير بالذكر أن معظم مقاومة وصلة p-n تتركز في منطقة الاستنزاف حيث تكون مقاومتها كبيرة مقارنة مع بقية أجزاء شبه الموصلين السالب و الموجب. شكل ادناه يوضح انتشار الحاملات خلال وصلة الثنائي وتوين منطقة الاستنزاف.