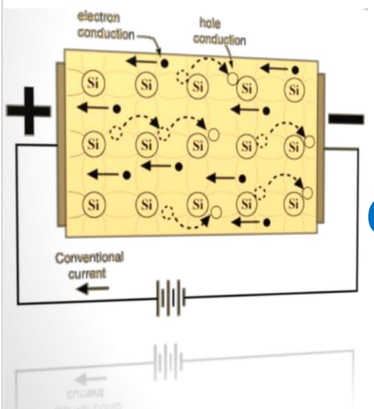
Unit 1:

Introduction to electronics



Lecture 1:

Current in semiconductors

Electronics 1 – Electronic Devices (Floyd)

ملخّص المحاضرة ١

المحاضرة الأولى: التيار في أشباه الموصلات

Lecture 1 – Current in Semiconductors

الوحدة الأولى: مقدمة في الإلكترونيات — ملخّص مراجعة شامل للاختبار

مرجع مراجعة بالعربية — تعريفات ومقارنات وأمثلة

إعداد وشرح

Eng. Emad Mahdy

دوائر كهربية • إلكترونيات • إشارات وأنظمة • معالجات دقيقة

WhatsApp: +20 12 7148 2006

YouTube: si-manual (Eng. Emad Mahdy)

https://si-manual.com

لمزيد من الملخّصات والشروح تابع القناة والموقع

فهرس المحتويات

Objectives

TAIF UNIVERSITY

The way a material conducts electrical current is important in understanding how electronic devices operate.

- Understand the basic structure of semiconductors and how they conduct current.
- Describe the properties of *n*-type and *p*-type semiconductors
- Describe how a *pn* junction is formed
- Describe the characteristics and biasing of a pn junction diode.

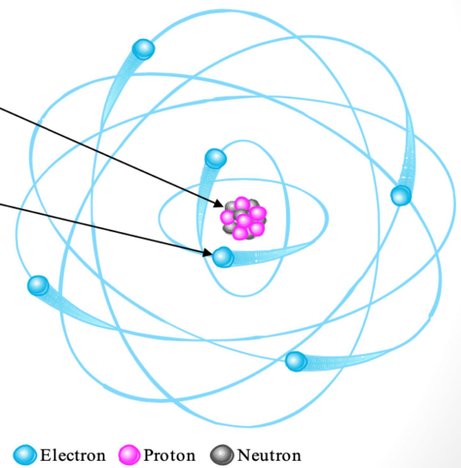
فهرس المحتويات

1) نموذج بور للذرة – The Bohr Atom
2) غلاف التكافؤ – The Valence Shell
3) اتجاه التيار الاصطلاحي والحقيقي – Conventional vs Electron Flow
4) خواص الذرة – The Atom Properties
5) أنواع المواد الثلاثة – Insulators Conductors Semiconductors
6) مخططات الطاقة – Energy Diagrams
7) نطاقات الطاقة في أشباه الموصلات – Energy Bands in Semiconductors
8) السليكون والجرمانيوم – Silicon and Germanium
9) الروابط التساهمية في بلورة السليكون – Covalent Bonds in Silicon
10) التيار في أشباه الموصلات – Current in Semiconductors
11) إلكترونات التوصيل والثقوب – Conduction Electrons and Holes
12) تيار الإلكترونات وتيار الثقوب – Electron Current and Hole Current
13) الخلاصة وأسئلة المحاضرة – Summary and Lecture Questions

The Bohr atom

The Bohr atom is useful for visualizing atomic structure.

- The nucleus is positively charged and has the protons and neutrons.
- Electrons are negatively charged and in discrete shells.
- The atomic number is the number of protons and determines the particular element.
- In the neutral atom, the number of electrons is equal to the number of protons.



TAIF UNIVERSITY

1) نموذج بور للذرة – The Bohr Atom

The Bohr atom is useful for visualizing atomic structure.

نموذج بور تصوّر مبسّط للذرة يساعدنا على تخيّل تركيبها: نواة في المركز، وإلكترونات تدور حولها في أغلفة محدّدة.

The nucleus is positively charged and has the protons and neutrons.

النواة موجبة الشحنة، وتحتوي على البروتونات الموجبة والنيوترونات المتعادلة.

Electrons are negatively charged and in discrete shells.

الإلكترونات سالبة الشحنة، وتدور في أغلفة منفصلة لكل غلاف منها مستوى طاقة خاص به.

The atomic number is the number of protons and determines the particular element.

العدد الذري هو عدد البروتونات في النواة، وهو الذي يحدّد نوع العنصر.

In the neutral atom, the number of electrons is equal to the number of protons.

في الذرة المتعادلة يتساوى عدد الإلكترونات مع عدد البروتونات، فتلغي الشحنتان إحداهما الأخرى.

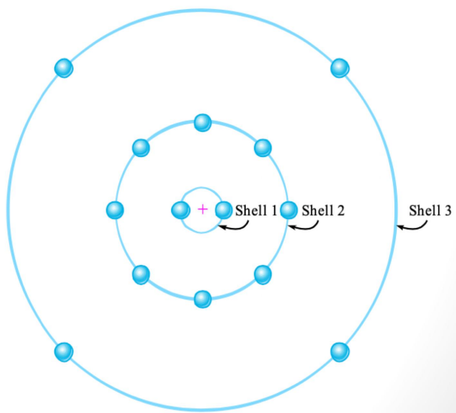
The valence shell

The outer shell is called the *valence shell*. Electrons in this shell are involved in chemical reactions and they account for electrical and thermal conductivity in metals.

A neutral Si atom is shown. There are 4 electrons in the valence shell.

Metals have one, two or three electrons in the valence shell. The atom illustrated here is a sodium atom (Na), with only one electron in its outer shell.

Non-metals have either complete or nearly compete outer shells, so they make poor electrical conductors.



2) غلاف التكافؤ – The Valence Shell

The outer shell is called the valence shell.

الغلاف الخارجي للذرة اسمه غلاف التكافؤ، والإلكترونات التي فيه اسمها إلكترونات التكافؤ.

Electrons in this shell are involved in chemical reactions and they account for electrical and thermal conductivity in metals.

إلكترونات هذا الغلاف هي التي تدخل في التفاعلات الكيميائية، وهي المسؤولة عن التوصيل الكهربي والحراري في الفلزات.

A neutral Si atom is shown. There are 4 electrons in the valence shell.

الشكل يبيّن ذرة سليكون متعادلة، غلافها الخارجي فيه أربعة إلكترونات.

Metals have one, two or three electrons in the valence shell.

الفلزات يحمل غلاف تكافئها إلكترونًا واحدًا أو اثنين أو ثلاثة، فيسهل تحرّرها وتصبح موصلات جيدة.

Non-metals have either complete or nearly compete outer shells, so they make poor electrical conductors.

اللافلزات يكون غلافها الخارجي ممتلئًا أو قريبًا من الامتلاء، فلا تجد إلكترونات حرة تحمل التيار وتضعف موصليتها.

3) اتجاه التيار الاصطلاحي والحقيقي – Conventional vs Electron Flow

Conventional Flow: By convention, current flows from the positive to negative terminals.

الاتجاه الاصطلاحي للتيار هو من الطرف الموجب إلى الطرف السالب، وهو الاتجاه المتفق عليه في الرسم وفي حلّ المسائل.

Electron Flow: Current follows electron flow, from the negative to positive terminals.

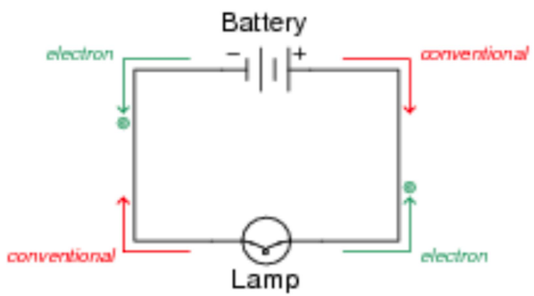
الاتجاه الحقيقي يتبع حركة الإلكترونات داخل الموصل، من الطرف السالب إلى الطرف الموجب.

وجه المقارنة	Conventional Flow الاتجاه الاصطلاحي	Electron Flow اتجاه الإلكترونات
الاتجاه	من الطرف الموجب إلى السالب	من الطرف السالب إلى الموجب
أساس التسمية	اتفاق قديم يفترض أن حاملات الشحنة موجبة	الحركة الفعلية للإلكترونات داخل الموصل
أين نستعمله	في حلّ المسائل وفي رموز العناصر والدوائر	في شرح ما يحدث فيزيائيًا داخل المادة

الاتجاهان متعاكسان دائمًا. استعمل الاتجاه الاصطلاحي في حلّ المسائل، واحتفظ بالاتجاه الحقيقي لفهم ما يجري داخل المادة.

Conventional Current vs. Electron Flow

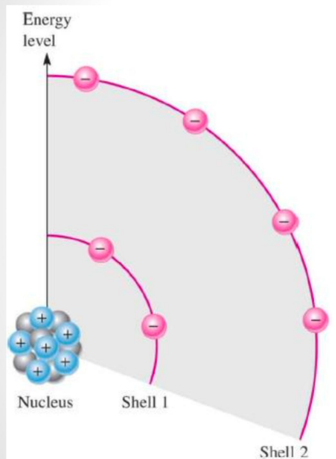
TAIF UNIVERSITY



Conventional Flow: By convention, current flows from the positive to negative terminals.

Electron Flow: Current follows electron flow, from the negative to positive terminals.

The Atom Properties



Energy increases as the distance from the nucleus increases.

- Electrons with the highest energy levels exists in the outermost shell of an atom and are loosely bound to the atom.
- This outermost shell is known as the valence shell and electrons in the shell are called valence electrons.
- When an electron gains a certain amount of energy, it moves to an orbit farther from the nucleus.
- The process of losing an electron is called ionization.
- The escaped valence electron is called a free electron.

TAIF UNIVERSITY

4) خواص الذرة – The Atom Properties

Electrons with the highest energy levels exists in the outermost shell of an atom and are loosely bound to the atom.

إلكترونات الغلاف الخارجي هي صاحبة أعلى طاقة، وارتباطها بالذرة ضعيف.

Energy increases as the distance from the nucleus increases.

طاقة الإلكترون تزيد كلّما ابتعد غلافه عن النواة.

When an electron gains a certain amount of energy, it moves to an orbit farther from the nucleus.

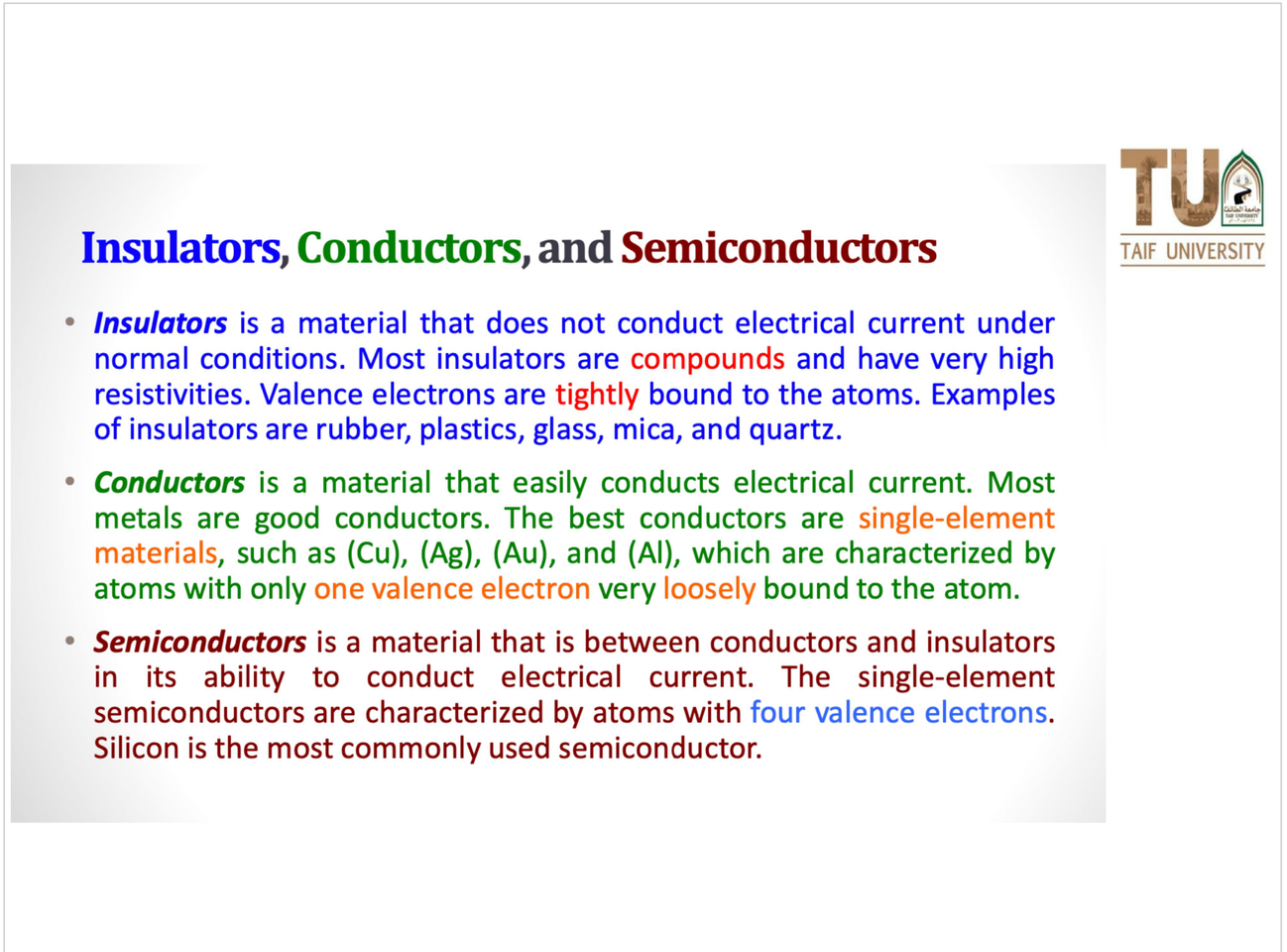
إذا اكتسب الإلكترون قدرًا كافيًا من الطاقة انتقل إلى مدار أبعد عن النواة.

The process of losing an electron is called ionization.

خروج الإلكترون من الذرة نهائيًا اسمه التأيّن، وتصبح الذرة بعده أيونًا موجبًا.

The escaped valence electron is called a free electron.

إلكترون التكافؤ الذي يفلت من الذرة اسمه الإلكترون الحر، وهو الذي يحمل التيار داخل المادة.



5) أنواع المواد الثلاثة – Insulators Conductors Semiconductors

Insulators is a material that does not conduct electrical current under normal conditions.

العازل مادة لا تمرّر التيار الكهربي في الظروف العادية، لأن إلكترونات تكافئها مرتبطة بذرّاتها ارتباطًا قويًا.

Most insulators are compounds and have very high resistivities. Examples of insulators are rubber, plastics, glass, mica, and quartz.

معظم العوازل مركّبات كيميائية ومقاوميتها عالية جدًا، ومنها المطاط واللدائن والزجاج والميكا والكوارتز.

Conductors is a material that easily conducts electrical current. Most metals are good conductors.

الموصل مادة تمرّر التيار بسهولة، ومعظم الفلزات موصلات جيدة.

The best conductors are single-element materials, such as (Cu), (Ag), (Au), and (Al), which are characterized by atoms with only one valence electron very loosely bound to the atom.

أفضل الموصلات عناصر نقية مثل النحاس والفضة والذهب، وذرّاتها تحمل إلكترون تكافؤ واحدًا ضعيف الارتباط.
أما الألومنيوم فموصل جيد أيضًا، لكن ذرّته تحمل ثلاثة إلكترونات تكافؤ لا واحدًا.

Semiconductors is a material that is between conductors and insulators in its ability to conduct electrical current.

شبه الموصل مادة تقع في قدرتها على التوصيل بين الموصل والعازل.

The single-element semiconductors are characterized by atoms with four valence electrons. Silicon is the most commonly used semiconductor.

أشباه الموصلات ذات العنصر الواحد تحمل ذرّاتها أربعة إلكترونات تكافؤ، وأكثرها استعمالًا السليكون.

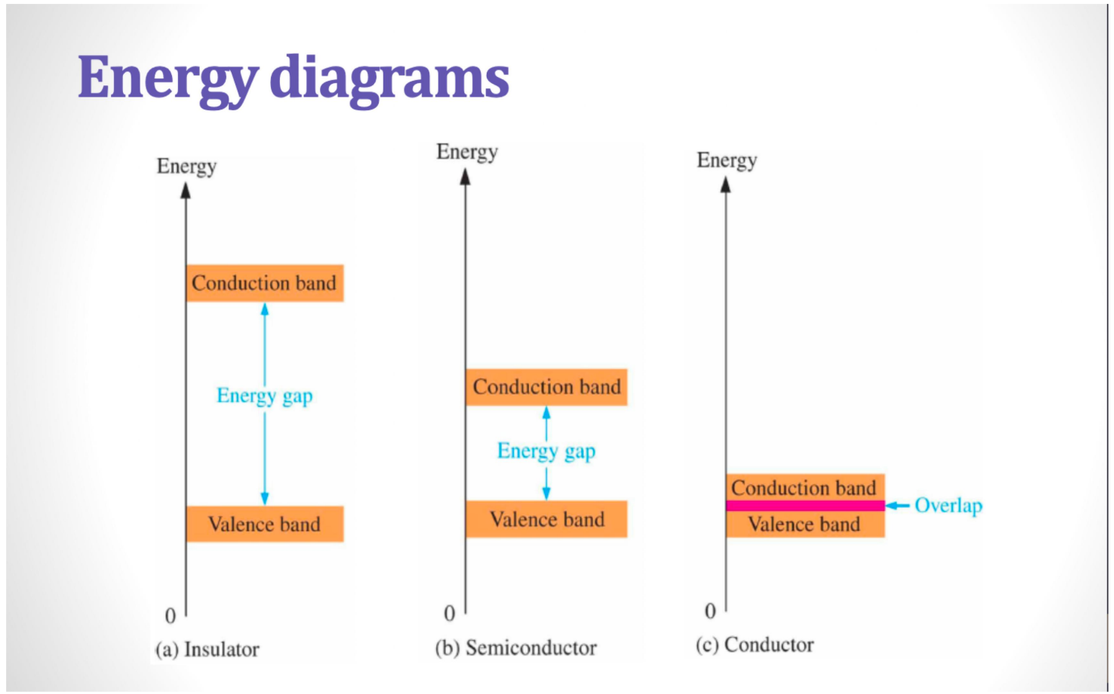
وجه المقارنة	Insulator عازل	Semiconductor شبه موصل	Conductor موصل
غلاف التكافؤ	ممتلئ أو قريب من الامتلاء	أربعة إلكترونات	من ١ إلى ٣ (أفضلها واحد)
ارتباط إلكترون التكافؤ	قوي جدًا	متوسط	ضعيف جدًا
الإلكترونات الحرة	لا توجد	قليلة	كثيرة
أمثلة	مطاط، زجاج، ميكا	سليكون، جرمانيوم	نحاس، فضة، ذهب

6) مخططات الطاقة – Energy Diagrams

يقارن الشكل بين المواد الثلاث من ناحية نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل والفجوة بينهما.

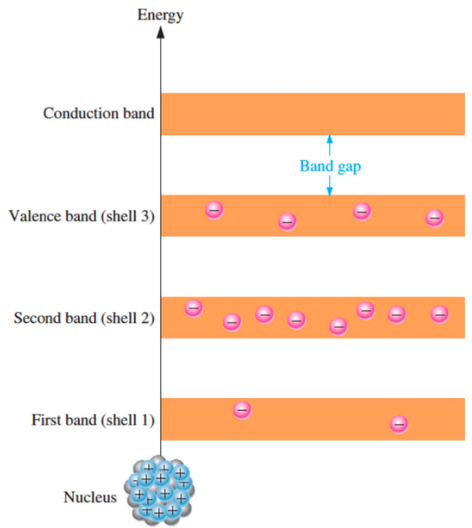
المادة	وضع النطاقين	دلالته
Insulator عازل	فجوة طاقة كبيرة جدًا	الإلكترون يحتاج طاقة ضخمة ليعبر الفجوة، فلا يسري تيار
Semiconductor شبه موصل	فجوة طاقة صغيرة	حرارة الغرفة تكفي لعبور بعض الإلكترونات، فيسري تيار محدود
Conductor موصل	النطاقان متداخلان	لا توجد فجوة يعبرها الإلكترون، والإلكترونات حرة أصلًا فيسري التيار بسهولة

الفرق بين المواد الثلاث في هذا الشكل هو عرض فجوة الطاقة وحده: تكبر في العازل، وتصغر في شبه الموصل، وتختفي بالتداخل في الموصل.



Semiconductors

- Semiconductors are crystalline materials that are characterized by specific energy bands for electrons.
- Between the bands are gaps; these gaps represent energies that electrons cannot have.
- The last energy band is the **conduction band,** where electrons are mobile.
- The next to the last band is the **valence band**, which is the energy level associated with electrons involved in bonding.



7) نطاقات الطاقة في أشباه الموصلات – Energy Bands in Semiconductors

Semiconductors are crystalline materials that are characterized by specific energy bands for electrons.

أشباه الموصلات مواد بلورية، وإلكتروناتها موزّعة على نطاقات طاقة محدّدة.

Between the bands are gaps; these gaps represent energies that electrons cannot have.

بين كل نطاقين فجوة، وهي مستويات طاقة ممنوعة لا يستقرّ فيها أي إلكترون.

The last energy band is the conduction band, where electrons are mobile.

النطاق الأخير اسمه نطاق التوصيل، والإلكترون الذي يصل إليه يتحرّك بحرية داخل البلورة.

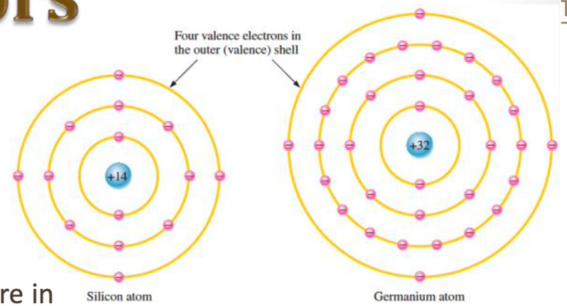
The next to the last band is the valence band, which is the energy level associated with electrons involved in bonding.

النطاق الذي قبله اسمه نطاق التكافؤ، وفيه الإلكترونات الداخلة في الروابط بين الذرّات.

النطاقان المهمّان في المسائل هما نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل، والفجوة بينهما هي الطاقة التي يجب أن يكتسبها الإلكترون ليصبح حرًّا.

Semiconductors

- Both the **silicon** and **germanium** atoms have four valence electrons.
- These atoms differ in that silicon has 14 protons in its nucleus and germanium has 32.
- The valence electrons in germanium are in the **fourth shell** while the ones in silicon are in the **third shell** closer to the nucleus.



- This means that the germanium valence electrons are at a higher energy levels than those in silicon and therefore requires a small amount of additional energy to escape from the atom.
- This property makes germanium more unstable than silicon at high temperatures.

8) السليكون والجرمانيوم – Silicon and Germanium

Both the silicon and germanium atoms have four valence electrons.

ذرّة السليكون وذرّة الجرمانيوم تحمل كل منهما أربعة إلكترونات تكافؤ، ولهذا يعمل الاثنان كأشباه موصلات.

These atoms differ in that silicon has 14 protons in its nucleus and germanium has 32.

الفرق بينهما في عدد البروتونات: السليكون له أربعة عشر بروتونًا، والجرمانيوم اثنان وثلاثون.

The valence electrons in germanium are in the fourth shell while the ones in silicon are in the third shell closer to the nucleus.

إلكترونات تكافؤ الجرمانيوم في الغلاف الرابع، وإلكترونات السليكون في الغلاف الثالث الأقرب إلى النواة.

This means that the germanium valence electrons are at a higher energy levels than those in silicon and therefore requires a small amount of additional energy to escape from the atom.

لأن إلكترونات الجرمانيوم أبعد عن النواة فطاقتها أعلى، وتحتاج طاقة إضافية أقلّ لتفلت من الذرة.

This property makes germanium more unstable than silicon at high temperatures.

ولهذا يتأثّر الجرمانيوم بالحرارة أكثر من السليكون ويصبح أقلّ استقرارًا عند درجات الحرارة المرتفعة.

وجه المقارنة	Silicon سليكون	Germanium جرمانيوم
عدد البروتونات	١٤	٣٢
غلاف التكافؤ	الغلاف الثالث	الغلاف الرابع
عدد إلكترونات التكافؤ	٤	٤
الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون	أعلى	أقلّ
الاستقرار مع ارتفاع الحرارة	أعلى	أقلّ

9) الروابط التساهمية في بلورة السليكون – Covalent Bonds in Silicon

Covalent bonds in an intrinsic silicon crystal.

السليكون النقي بلورة كل ذرّاتها سليكون بلا أي شوائب مضافة، وذرّاتها مرتبطة بروابط تساهمية.

The center silicon atom shares an electron with each of the four surrounding silicon atoms, creating a covalent bond with each.

ذرّة السليكون تشارك كل إلكترون من إلكتروناتها الأربعة مع ذرّة مجاورة، فتنشأ حولها أربع روابط تساهمية.

The surrounding atoms are in turn bonded to other atoms, and so on.

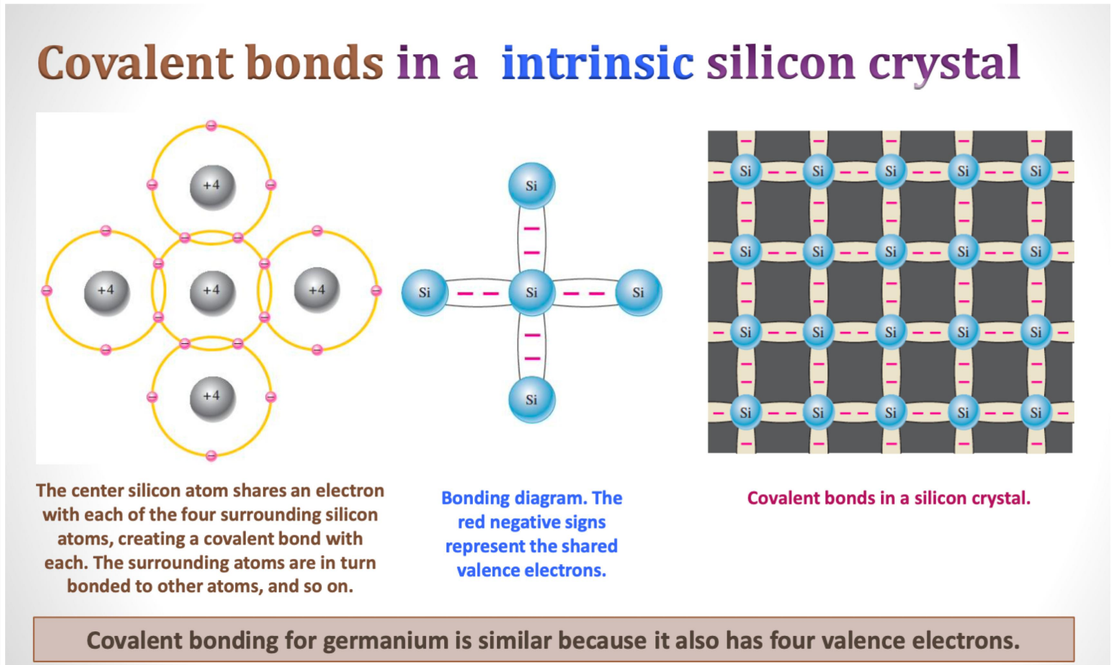
والذرّات المجاورة ترتبط بدورها بذرّات أخرى، فتتكوّن بلورة منتظمة ممتدّة.

Bonding diagram. The red negative signs represent the shared valence electrons.

في مخطط الترابط تمثّل الإشارات السالبة الحمراء إلكترونات التكافؤ المشتركة بين كل ذرّتين.

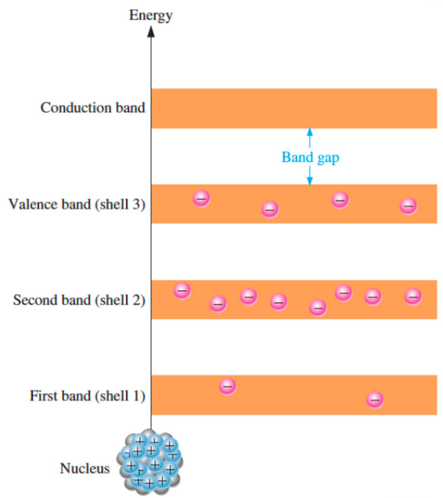
Covalent bonding for germanium is similar because it also has four valence electrons.

الترابط التساهمي في الجرمانيوم مثله في السليكون، لأن عدد إلكترونات التكافؤ واحد في الاثنين.



Current in semiconductors

- Each shell around the nucleus corresponds to a certain energy band and is separated from adjacent shells by band gaps, in which no electrons can exist.
- The Figure shows the energy band diagram for an unexcited (no external energy such as heat) atom in a pure (intrinsic) silicon crystal.
- **This condition occurs *only* at a temperature of absolute 0 Kelvin.**



TAIF UNIVERSITY

10) التيار في أشباه الموصلات – Current in Semiconductors

Each shell around the nucleus corresponds to a certain energy band and is separated from adjacent shells by band gaps, in which no electrons can exist.

كل غلاف حول النواة يقابله نطاق طاقة، ويفصل بين النطاقات فجوات لا يستقرّ فيها أي إلكترون.

The Figure shows the energy band diagram for an unexcited (no external energy such as heat) atom in a pure (intrinsic) silicon crystal.

الذرّة غير المثارة هي التي لم تصلها طاقة خارجية كالحرارة، ومخطط نطاقات طاقتها هو الذي رأيناه في القسم السابق.

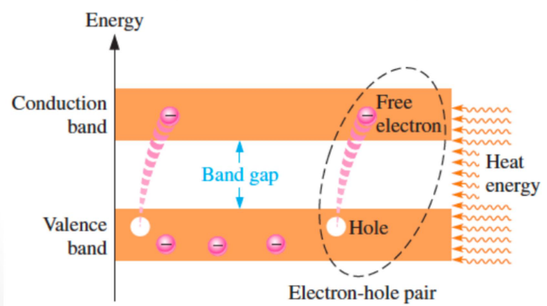
This condition occurs only at a temperature of absolute 0 Kelvin.

هذه الحالة لا تحدث إلا عند درجة الصفر المطلق.

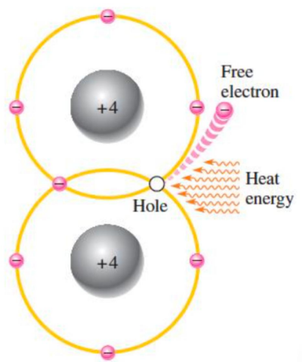
عند الصفر المطلق تكون كل إلكترونات التكافؤ مرتبطة في روابطها ونطاق التوصيل فارغًا تمامًا، فلا يسري تيار مهما كان الجهد المسلّط. وهذا يعني أن السليكون النقي عند هذه الدرجة يسلك سلوك العازل.

Conduction Electrons and Holes

- An intrinsic (pure) silicon crystal at room temperature has sufficient heat (thermal) energy for some valence electrons to jump the gap from the valence band into the conduction band, becoming free electrons. Free electrons are also called **conduction electrons.**



Energy diagram



Bonding diagram

11) إلكترونات التوصيل والثقوب – Conduction Electrons and Holes

An intrinsic (pure) silicon crystal at room temperature has sufficient heat (thermal) energy for some valence electrons to jump the gap from the valence band into the conduction band, becoming free electrons.

عند حرارة الغرفة تكفي الطاقة الحرارية لأن يقفز بعض إلكترونات التكافؤ عبر الفجوة إلى نطاق التوصيل، فتصبح إلكترونات حرة.

Free electrons are also called conduction electrons.

الإلكترون الحر اسمه أيضًا إلكترون توصيل.

When an electron jumps to the conduction band, a vacancy is left in the valence band. This vacancy is called a hole.

الثقب هو المكان الشاغر الذي يتركه الإلكترون في نطاق التكافؤ بعد قفزه إلى نطاق التوصيل.

For every electron raised to the conduction band by external energy, there is one hole left in the valence band, creating what is called an electron-hole pair.

كل إلكترون يصعد إلى نطاق التوصيل يترك خلفه ثقبًا واحدًا، ويسمّى الاثنان معًا زوج إلكترون-ثقب.

Recombination occurs when a conduction-band electron loses energy and falls back into a hole in the valence band.

إعادة الاتحاد تحدث عندما يفقد إلكترون في نطاق التوصيل طاقته ويعود ليملأ ثقبًا في نطاق التكافؤ.

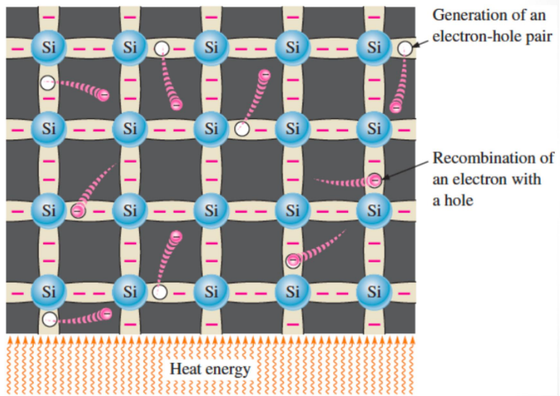
العمليتان تجريان معًا باستمرار داخل البلورة: أزواج جديدة تتولّد بالطاقة الحرارية، وأزواج أخرى تختفي بإعادة الاتحاد.

Conduction Electrons and Holes

When an **electron jumps** to the conduction band, a **vacancy** is left in the valence band within the crystal.

This vacancy is called a **hole**. For every electron raised to the conduction band by external energy, there is one hole left in the valence band, creating what is called an **electron-hole pair.**

Recombination occurs when a conduction-band electron loses energy and falls back into a hole in the valence band.

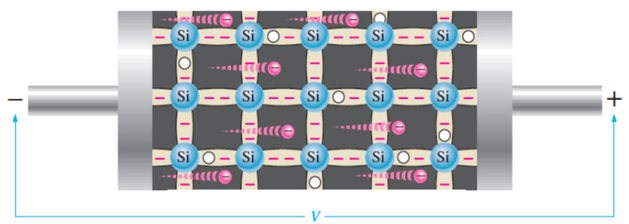


Electron-hole pairs in a silicon crystal. Free electrons are being generated continuously while some recombine with holes.

Conduction Electrons and Holes

When a **voltage** is applied across a piece of intrinsic silicon, the thermally generated free electrons in the conduction band, which are free to move randomly in the crystal structure, are now easily attracted toward the positive end.

This movement of free electrons is one type of **current** in a semiconductive material and is called ***electron current***.



Electron current in intrinsic silicon is produced by the movement of thermally generated free electrons.

When a voltage is applied across a piece of intrinsic silicon, the thermally generated free electrons in the conduction band, which are free to move randomly in the crystal structure, are now easily attracted toward the positive end.

عند تسليط جهد على قطعة سليكون نقي تنجذب الإلكترونات الحرة نحو الطرف الموجب بعد أن كانت حركتها عشوائية.

This movement of free electrons is one type of current in a semiconductive material and is called electron current.

حركة الإلكترونات الحرة هذه نوع من التيار داخل شبه الموصل، واسمها تيار الإلكترونات.

Conduction Electrons and Holes

Another type of current occurs in the valence band, where the **holes** created by the free electrons exist.

Electrons remaining in the valence band are still attached to their atoms and are not free to move randomly in the crystal structure as are the free electrons. However, a valence electron can move into a nearby hole, thus leaving another hole where it came from.

Effectively the hole has moved from one place to another in the crystal structure, as illustrated in Figure.

Although current in the valence band is produced by valence electrons, it is called ***hole current*** to distinguish it from electron current in the conduction band.

Hole Current – تيار الثقوب

Another type of current occurs in the valence band, where the holes created by the free electrons exist.

ويوجد نوع ثانٍ من التيار داخل نطاق التكافؤ نفسه، حيث الثقوب التي خلّفتها الإلكترونات الحرة.

Electrons remaining in the valence band are still attached to their atoms and are not free to move randomly in the crystal structure, as are the free electrons. However, a valence electron can move into a nearby hole, thus leaving another hole where it came from.

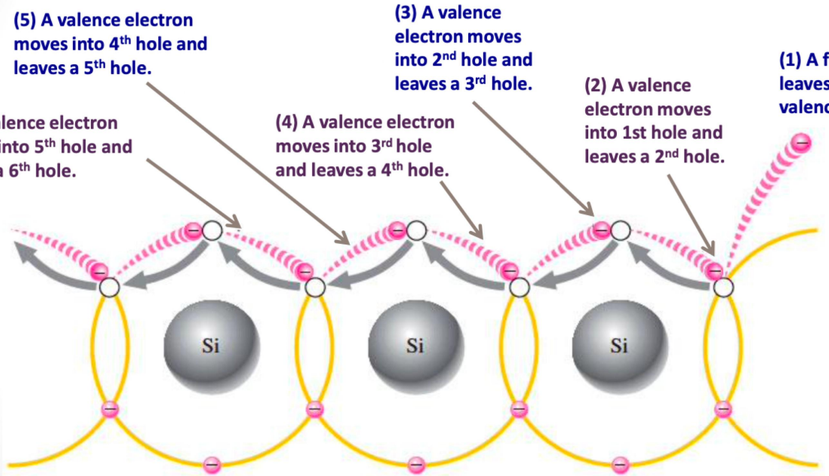
إلكترونات نطاق التكافؤ ما زالت مرتبطة بذرّاتها ولا تتحرّك بحرية، لكن الإلكترون منها ينتقل إلى ثقب مجاور فيترك ثقبًا جديدًا في موضعه.

Effectively the hole has moved from one place to another in the crystal structure.

والنتيجة أن الثقب انتقل من موضع إلى آخر داخل البلورة.

يبيّن الشكل ست خطوات متتابعة: إلكترون تكافؤ يملأ ثقبًا ويترك ثقبًا خلفه، ثم يكرّر الإلكترون التالي الأمر نفسه.

Holes Current



When a valence electron moves left to right to fill a hole while leaving another hole behind, the hole has effectively moved from right to left. Gray arrows indicate effective movement of a hole.

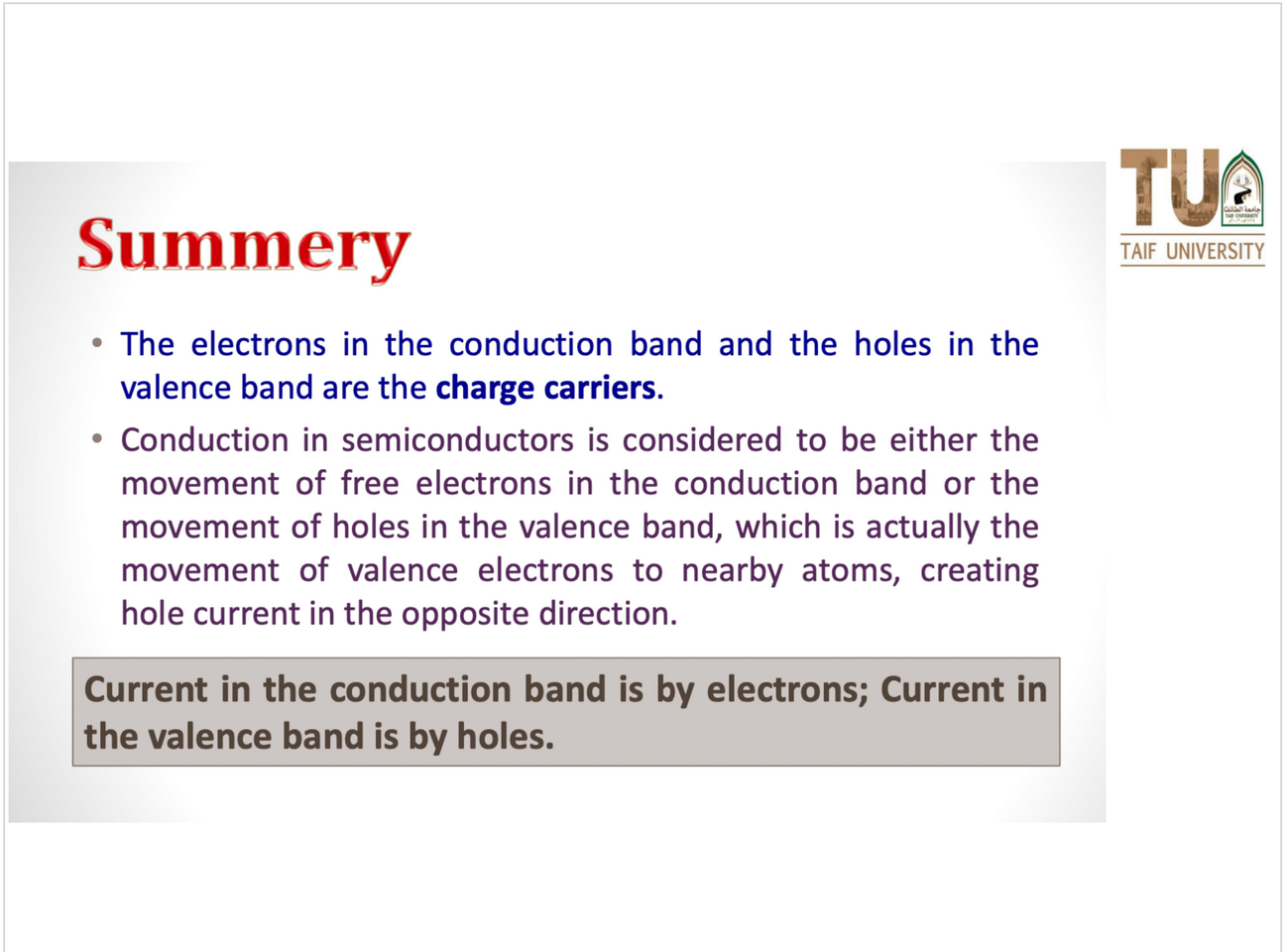
When a valence electron moves left to right to fill a hole while leaving another hole behind, the hole has effectively moved from right to left.

انتقال الإلكترون من اليسار إلى اليمين يعني انتقال الثقب من اليمين إلى اليسار، فاتجاه الثقب عكس اتجاه إلكترون التكافؤ دائمًا.

Although current in the valence band is produced by valence electrons, it is called hole current to distinguish it from electron current in the conduction band.

التيار في نطاق التكافؤ تصنعه إلكترونات التكافؤ، لكن اسمه تيار الثقوب للتفرقة بينه وبين تيار الإلكترونات في نطاق التوصيل.

وجه المقارنة	Electron Current تيار الإلكترونات	Hole Current تيار الثقوب
أين يحدث	في نطاق التوصيل	في نطاق التكافؤ
الحامل المتحرّك	إلكترون حر	ثقب ينشأ عن انتقال إلكترون تكافؤ
حالة الإلكترون	منفصل عن ذرّته ويتحرّك بحرية	ما زال مرتبطًا وينتقل إلى ثقب مجاور
الاتجاه	نحو الطرف الموجب	عكس اتجاه حركة إلكترونات التكافؤ



13) الخلاصة وأسئلة المحاضرة – Summary and Lecture Questions

The electrons in the conduction band and the holes in the valence band are the charge carriers.

حاملات الشحنة في شبه الموصل نوعان: الإلكترونات في نطاق التوصيل، والثقوب في نطاق التكافؤ.

Conduction in semiconductors is considered to be either the movement of free electrons in the conduction band or the movement of holes in the valence band, which is actually the movement of valence electrons to nearby atoms, creating hole current in the opposite direction.

التوصيل في أشباه الموصلات يحدث بطريقتين: حركة الإلكترونات الحرة في نطاق التوصيل، وحركة الثقوب في نطاق التكافؤ الناتجة عن انتقال إلكترونات التكافؤ إلى الذرّات المجاورة.

Current in the conduction band is by electrons; Current in the valence band is by holes.

التيار في نطاق التوصيل تصنعه الإلكترونات، والتيار في نطاق التكافؤ تصنعه الثقوب.

Questions

1. What is the basic difference between conductors and insulators?
2. How do semiconductors differ from conductors and insulators?
3. Why does a semiconductor have fewer free electrons than a conductor?
4. How are covalent bonds formed?
5. What is meant by the term intrinsic ?
6. Are free electrons in the valence band or in the conduction band?
7. Which electrons are responsible for electron current in silicon?
8. What is a hole?
9. At what energy level does hole current occur?

TAIF UNIVERSITY

Lecture Questions – أسئلة المحاضرة

السؤال	الإجابة المختصرة
1. What is the basic difference between conductors and insulators?	ارتباط إلكترون التكافؤ: ضعيف جدًا في الموصل فتوجد إلكترونات حرة كثيرة، وقوي جدًا في العازل فلا توجد.
2. How do semiconductors differ from conductors and insulators?	شبه الموصل في المنتصف: فجوة طاقته أصغر من العازل وأكبر من الموصل، وذرّته تحمل أربعة إلكترونات تكافؤ.
3. Why does a semiconductor have fewer free electrons than a conductor?	لأن إلكترونات تكافئه مرتبطة في روابط تساهمية، ولا يتحرّر منها إلا القليل بالطاقة الحرارية.
4. How are covalent bonds formed?	بمشاركة كل ذرّة إلكترونات تكافئها الأربعة مع الذرّات الأربع المجاورة لها.
5. What is meant by the term intrinsic?	أن البلورة نقية، كل ذرّاتها من عنصر واحد بلا شوائب مضافة.
6. Are free electrons in the valence band or in the conduction band?	في نطاق التوصيل.
7. Which electrons are responsible for electron current in silicon?	الإلكترونات الحرة التي قفزت إلى نطاق التوصيل.

السؤال	الإجابة المختصرة
8. What is a hole?	المكان الشاغر الذي يتركه الإلكترون في نطاق التكافؤ بعد قفزه إلى نطاق التوصيل.
9. At what energy level does hole current occur?	في نطاق التكافؤ.