Electrical and Magnetic Properties of Materials

الخواص الكهربائية والمغناطيسيه للمواد

➢ Electrical Properties of Materials الخواص الكهربائية للمواد

Electrical properties describe how a material responds to an applied electric field. Based on their ability to conduct electricity, materials are classified into conductors, semiconductors, and insulators.

تشير الخواص الكهربائية إلى كيفية استجابة المادة للمجال الكهربائي المطبق عليها. بناءً على قدرتها على توصيل الكهرباء، تُصنّف المواد إلى موصلات، وأشباه موصلات، وعوازل.

1. Conductors الموصلات

Definition: Materials that allow the easy flow of electric current due to a high number of free electrons.

التعريف: هي المواد التي تسمح بتدفق التيار الكهربائي بسهولة بسبب احتوائها على عدد كبير من الإلكترونات الحرة.

Characteristics: **الخصائص**

- Low electrical resistivity (ρ) and high conductivity ($\sigma = 1/\rho$)

مقاومة كهربائية منخفضة (ρ) وموصلية عالية(معكوس المقاومه).($\sigma = 1/\rho$)

- *Electron movement*: Free electrons in the conduction band move easily under an electric field.

حركة الإلكترونات: تتحرك الإلكترونات الحرة في نطاق التوصيل بسهولة تحت تأثير المجال الكهربائي.

- *Temperature effect*: Resistance increases with temperature due to increased electron scattering.

تأثير درجة الحرارة: تزداد المقاومة مع ارتفاع درجة الحرارة بسبب زيادة تصادمات الإلكترونات.

Examples:

Metals: Copper (Cu), Silver (Ag), Gold (Au), Aluminum (Al)

المعادن: النحاس(Cu) ، الفضة(Ag) ، الذهب(Au) ، الألمنيوم.(Al)

Graphene and Carbon Nanotubes مواد أخرى: الجرافين وأنابيب الكربون النانوية

Applications:**التطبيقات**

- Electrical wiring (copper, aluminum) الأسلاك الكهربائية (النحاس، الألمنيوم)
- Circuit components مكونات الدوائر الكهربائية
- Busbars in power distribution خطوط نقل الكهرباء

2. Semiconductors. أشباه الموصلات

Definition: Materials with electrical conductivity between conductors and insulators, which can be controlled by impurities (doping), temperature, or external fields.

التعريف: مواد تتمتع بموصلية كهربائية تقع بين الموصلات والعوازل، ويمكن التحكم بها من خلال الشوائب (التطعيم)، أو درجة الحرارة، أو المجالات الكهربائية الخارجية.

Characteristics: **الخصائص**

- Moderate resistivity مقاومة متوسطة
- *Band gap:* Small (~0.1 to 3 eV), allowing electrons to jump from the valence band to the conduction band with external energy.

- فجوة طاقة صغيرة (~0.1 إلى 3 إلكترون فولت)، مما يسمح للإلكترونات بالقفز من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل عند تزويدها بطاقة خارجية.

- *Doping effect*: Can be altered by adding impurities (n-type and p-type doping).
- **تأثير التطعيم** :(Doping) يمكن تعديل التوصيلية بإضافة شوائب (مثل التطعيم من النوع n أو p)
- *Temperature effect*: Conductivity increases with temperature due to increased carrier generation.

تأثير درجة الحرارة: تزداد الموصلية مع ارتفاع درجة الحرارة بسبب زيادة عدد الإلكترونات الحرة.

Examples:

Silicon السيليكون (Si), Germanium الجرمانيوم (Ge)

Applications:**التطبيقات**

- *Electronics*: Transistors, diodes, microchips **الإلكترونيات**: الترانزستورات، الديودات، المعالجات الدقيقة
- *Solar cells*: Photovoltaic energy conversion **الخلايا الشمسية**: تحويل الطاقة الضوئية إلى كهربائية
- *Sensors* أجهزة الاستشعار

3. Insulators العوازل

Definition: Materials that do not conduct electricity easily due to a large band gap (>3 eV), preventing electron flow.

التعريف: مواد لا تسمح بتوصيل الكهرباء بسهولة بسبب فجوة الطاقة الكبيرة (تحدد قدرة الماده على التوصيل)(>3 إلكترون فولت)، مما يمنع تدفق الإلكترونات.

Characteristics: **الخصائص**

- High electrical resistivity مقاومة كهربائية عالية
- No free electrons in the conduction band لا تحتوي على إلكترونات حرة في نطاق التوصيل

- *Temperature effect:* At very high temperatures, some insulators can become conductive (breakdown effect).

تأثير درجة الحرارة: عند درجات الحرارة المرتفعة جدًا، قد تصبح بعض العوازل موصلة (ظاهرة الانهيار الكهربائي).

Examples:

Ceramics: Alumina (Al_2O_3), Glass السيراميك: =الألومينا , الزجاج

Polymers: Rubber, Teflon البوليمرات: المطاط، التفلون

Mica and Quartz مواد أخرى: الميكا، الكوارتز

Applications: **التطبيقات**

- Electrical insulation in power lines and transformers العزل الكهربائي في خطوط الطاقة والمحولات
- Capacitors and dielectric materials المواد العازلة في المكثفات والدوائر الكهربائية
- Protective coatings for electronic circuits الطلاءات العازلة لحماية المكونات الإلكترونية

- ***Band Theory and Its Role in Electrical Conductivity***
- **نظرية النطاقات ودورها في التوصيلية الكهربائية**

Band Theory explains why materials differ in electrical conductivity by analyzing the distribution of electrons in a solid. This theory is based on the concept of energy bands, which determine a material's ability to conduct electricity.

نظرية النطاقات تفسر سبب اختلاف المواد في توصيل الكهرباء، من خلال تحليل توزيع الإلكترونات في المادة. تعتمد هذه النظرية على مفهوم نطاقات الطاقة(Energy Bands) ، والتي تحدد قدرة المادة على نقل التيار الكهربائي.

1. Fundamentals of Band Theory أساسيات نظرية النطاقات

In isolated atoms, electrons occupy discrete energy levels. However, when atoms combine to form a solid, these energy levels overlap and form bands:

في الذرات المنفردة، تمتلك الإلكترونات مستويات طاقة منفصلة، لكن عندما تتجمع الذرات لتكوين مادة صلبة، تتداخل مستويات الطاقة مكونة نطاقات:

Valence Band: Contains electrons bound to atoms that do not move freely.

نطاق التكافؤ :(Valence Band) يحتوي على الإلكترونات المرتبطة بالذرات والتي لا تتحرك بحرية.

Conduction Band: Contains free electrons that can move and contribute to electrical conduction.

نطاق التوصيل :(Conduction Band) يحتوي على الإلكترونات الحرة القادرة على التحرك والمشاركة في التوصيل الكهربائي.

Band Gap: The energy difference between the valence and conduction bands, which determines whether electrons can transition to the conduction band.

فجوة الطاقة :(Band Gap) المسافة الطاقية بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل، والتي تحدد ما إذا كان الإلكترون يستطيع الانتقال من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل.

2. Role of Band Theory in Electrical Conductivity دور نظرية النطاقات في التوصيلية الكهربائية

Based on the band gap, materials are classified as conductors, semiconductors, and insulators:

بناءً على فجوة الطاقة، يمكن تصنيف المواد إلى موصلات، أشباه موصلات، وعوازل:

A. *Conductors* الموصلات

Example: Metals like copper and silver. مثال: المعادن مثل النحاس والفضة

No significant band gap (or overlapping bands), allowing electrons to move freely.

لا توجد فجوة طاقة تقريبًا (أو تتداخل النطاقات)، مما يسمح للإلكترونات الحرة بالتنقل بسهولة.

When an electric field is applied, electrons in the conduction band move, generating an electric current.

عند تطبيق مجال كهربائي، تتحرك الإلكترونات في نطاق التوصيل، مما يؤدي إلى تيار كهربائي.

B. *Semiconductors* أشباه الموصلات

Example: Silicon (Si) and Germanium (Ge) . مثال: السيليكون(Si) والجرمانيوم (Ge)

- Small band gap (~0.1 to 3 eV). . تمتلك فجوة طاقة صغيرة (~0.1 إلى 3 إلكترون فولت)

At room temperature, some electrons gain enough energy to jump into the conduction band, allowing conductivity.

عند درجة حرارة الغرفة، تمتلك بعض الإلكترونات طاقة كافية للانتقال إلى نطاق التوصيل، مما يسمح بتوصيل الكهرباء.

Conductivity can be enhanced through doping, by adding impurities such as phosphorus or boron.

يمكن تحسين التوصيلية عن طريق التطعيم (Doping) بإضافة شوائب مثل الفوسفور أو البورون.

C. *Insulators* العوازل

Example: Glass, rubber, plastics مثال: الزجاج، المطاط، البلاستيك.

- Large band gap (>3 eV), preventing electrons from reaching the conduction band.
- تمتلك فجوة طاقة كبيرة (>3 إلكترون فولت)، مما يمنع الإلكترونات من القفز إلى نطاق التوصيل.

They do not conduct electricity unless subjected to very high voltage, which can cause breakdown.

لا يمكنها توصيل الكهرباء إلا عند جهد مرتفع جدًا يؤدي إلى انهيار العازل.

3. Effect of Temperature on Electrical Conductivity تأثير درجة الحرارة على التوصيلية الكهربائية

In conductors: As temperature increases, resistance increases due to increased electron scattering.

في الموصلات: عند زيادة درجة الحرارة، تزداد المقاومة بسبب تصادم الإلكترونات مع الذرات.

In semiconductors: As temperature increases, conductivity increases because more electrons jump to the conduction band.

في أشباه الموصلات: عند زيادة درجة الحرارة، تزداد الموصلية لأن المزيد من الإلكترونات تقفز إلى نطاق التوصيل.

In insulators: The effect is minimal, except at very high temperatures where electrical breakdown may occur.

في العوازل: التأثير ضعيف، إلا في درجات الحرارة العالية جدًا حيث قد يحدث انهيار كهربائي.

- Band Theory explains the differences in electrical conductivity among materials based on the presence or absence of a band gap. This theory is fundamental in modern electronics, from conductors used in wiring to semiconductors in computers and smartphones.
- توضح نظرية النطاقات سبب اختلاف المواد في التوصيل الكهربائي بناءً على وجود أو عدم وجود فجوة طاقة. تلعب هذه النظرية دورًا أساسيًا في تطوير الإلكترونيات، من الموصلات المستخدمة في الأسلاك إلى أشباه الموصلات في الحواسيب والهواتف الذكية.

Magnetic Properties of Materials الخواص المغناطيسية للمواد

Magnetic properties describe how a material responds to an applied magnetic field. Based on their behavior, materials are classified into ferromagnetic, paramagnetic, and diamagnetic.

تشير الخواص المغناطيسية إلى كيفية استجابة المادة للمجال المغناطيسي الخارجي. بناءً على سلوكها، تُصنّف المواد إلى فيرومغناطيسية، وبارامغناطيسية، وديامغناطيسية

1. Ferromagnetic Materials المواد الفيرومغناطيسية

Definition: Materials that exhibit strong magnetization even in the absence of an external magnetic field.

التعريف: مواد تُظهر مغنطة قوية حتى في غياب المجال المغناطيسي الخارجي.

Characteristics : **الخصائص**

Have permanent magnetic moments due to unpaired electrons.

تمتلك عزومًا مغناطيسية دائمة بسبب الإلكترونات غير المزدوجة.

Magnetic domains (regions of aligned atomic dipoles) form naturally.

تحتوي على مناطق مغناطيسية (Magnetic Domains) حيث تصطف العزوم الذرية في نفس الاتجاه.

Exhibit hysteresis, meaning they retain magnetization after the external field is removed.

تظهر ظاهرة التخلفية المغناطيسية(Hysteresis) ، مما يعني أنها تحتفظ بالمغنطة بعد إزالة المجال الخارجي.

Have high magnetic permeability (respond strongly to external fields).

تتمتع بنفاذية مغناطيسية عالية، مما يجعلها تستجيب بقوة للمجالات المغناطيسية

Examples:

Iron (Fe), Nickel (Ni), Cobalt (Co), and their alloys.

الحديد(Fe) ، النيكل(Ni) ، الكوبالت(Co) ، وبعض السبائك المغناطيسية.

***Applications:*التطبيقات**

- Permanent magnets (used in motors, generators, and speakers).

  تصنيع المغناطيس الدائم (المستخدم في المحركات والمولدات والسماعات).

- Magnetic storage devices (hard drives). أجهزة التخزين المغناطيسي (مثل الأقراص الصلبة) .
- Transformers and electromagnets. المحولات والمغناطيسات الكهربائية

2. Paramagnetic Materials المواد البارامغناطيسية

Definition: Materials that exhibit weak attraction to an external magnetic field but do not retain magnetization when the field is removed.

- **التعريف**: مواد تنجذب بشكل ضعيف إلى المجال المغناطيسي لكنها لا تحتفظ بالمغنطة بعد إزالة المجال.

***Characteristics*:الخصائص**

- Contain unpaired electrons, but magnetic moments do not align strongly.
  - تحتوي على إلكترونات غير مزدوجة، ولكن العزوم المغناطيسية لا تصطف بقوة.
- No natural magnetic domains.
  - لا تحتوي على مناطق مغناطيسية كما في المواد الفيرومغناطيسية.
- Magnetization is proportional to the applied field and disappears when the field is removed.
  - تتناسب المغنطة مع المجال المطبق، لكنها تختفي عند إزالة المجال.
- Weak magnetic susceptibility ($\chi > 0$) تمتلك قابلية مغناطيسية ضعيفة وموجبة.

Examples:

Aluminum (Al), Titanium (Ti), Platinum (Pt), and Oxygen (O_2) in gaseous form.

الألمنيوم(Al) ، التيتانيوم(Ti) ، البلاتين(Pt) ، والأكسجين (O_2) في حالته الغازية.

***Applications*:التطبيقات**

- Used in MRI machines . تُستخدم في أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي(MRI)
- Enhancing magnetic properties of materials in certain applications.
  - تحسين الخصائص المغناطيسية لبعض المواد في التطبيقات الصناعية.
- Scientific research in magnetism.
  - الأبحاث العلمية المتعلقة بالمغناطيسية

3. Diamagnetic Materials المواد الديامغناطيسية

Definition: Materials that create a weak opposing magnetic field when exposed to an external magnetic field.

التعريف: مواد تُنتج مجالًا مغناطيسيًا ضعيفًا معاكسًا عند تعرضها لمجال مغناطيسي خارجي.

***Characteristics*:الخصائص**

- No unpaired electrons (all electrons are paired).
- لا تحتوي على إلكترونات غير مزدوجة (جميع الإلكترونات مزدوجة).
- Induced magnetization is opposite to the applied field.
- تولد مغنطة معاكسة للمجال المطبق، مما يؤدي إلى تنافر ضعيف مع المجال المغناطيسي.
- Weak repulsion from magnetic fields.
- تنافر ضعيف من المجالات المغناطيسية.
- Magnetic susceptibility ($\chi < 0$), meaning they slightly reduce the external field.

تمتلك قابلية مغناطيسية سالبة وضعيفة($\chi < 0$) ، مما يعني أنها تقلل من تأثير المجال المغناطيسي الخارجي.

Examples:

Copper (Cu), Gold (Au), Silver (Ag), Water (H_2O), and Graphite.

النحاس(Cu) ، الذهب(Au) ، الفضة(Ag) ، الماء(H_2O) ، والجرافيت.

***Applications*:التطبيقات**

- Magnetic levitation (e.g., levitating superconductors).
- (الرفع المغناطيسي) (Magnetic Levitation) مثل رفع المواد فائقة التوصيل (تعلق ماده فائقة التوصيل فوق مغناطيس دون تلامس مباشر)
- Shielding sensitive instruments from magnetic fields.
- حماية الأجهزة الحساسة من المجالات المغناطيسية.
- Superconducting materials exhibit perfect diamagnetism (Meissner effect).

المواد فائقة التوصيل تُظهر ظاهرة الديامغناطيسية المثالية -تأثير ميسنر (Meissner Effect)

- **Applications in Electronics and Power Generation**

Material science plays a critical role in the development of Wearable Energy Harvesting (WER) technologies. Advanced materials enable efficient energy conversion from mechanical, thermal, and biochemical sources, enhancing applications in electronics and power generation.

يلعب علم المواد دورًا أساسيًا في تطوير تقنيات توليد الطاقة القابلة للارتداء(WER) ، حيث تساهم المواد المتقدمة في تحسين تحويل الطاقة من المصادر الميكانيكية والحرارية والكيميائية الحيوية، مما يعزز التطبيقات في الإلكترونيات وتوليد الطاقة.

1. Materials for WER in Electronics

المواد المستخدمة في WER للإلكترونيات

These materials improve energy harvesting efficiency in wearable and flexible electronic devices:

تساعد هذه المواد في تحسين كفاءة جمع الطاقة في الأجهزة الإلكترونية القابلة للارتداء والمرنة:

a) Piezoelectric Materials (Mechanical Energy Harvesting)

أ) المواد الكهرضغطية (توليد الطاقة من الحركة الميكانيكية

Materials: Lead zirconate titanate (PZT), Polyvinylidene fluoride (PVDF), Zinc Oxide (ZnO) nanowires

المواد: زركونات تيتانات الرصاص(PZT) ، فلوريد البولي فينيلدين(PVDF) ، أسلاك نانوية من أكسيد الزنك(ZnO)

Application:

Converts body movements into electricity for smartwatches, fitness trackers, and medical sensors.

التطبيق: تحويل حركة الجسم إلى طاقة كهربائية لتشغيل الساعات الذكية، أجهزة تتبع اللياقة البدنية، وأجهزة الاستشعار الطبية.

b) Thermoelectric Materials (Heat-to-Electricity Conversion)

ب) المواد الحرارية الكهربائية (تحويل الحرارة إلى كهرباء)

Materials: Bismuth telluride (Bi_2Te_3), Lead telluride (PbTe), Flexible polymer composites

المواد: تيلوريد البزموت(Bi_2Te_3) ، تيلوريد الرصاص(PbTe) ، مركبات البوليمر المرنة

Application:

Generates power from body heat for wearable health monitors and IoT sensors.

التطبيق: توليد الطاقة من حرارة الجسم لتشغيل أجهزة مراقبة الصحة وأجهزة إنترنت الأشياء

c) Triboelectric Materials (Friction-Based Energy Harvesting)

ج) المواد الاحتكاكية الكهربائية (توليد الطاقة من الاحتكاك)

Materials: Polydimethylsiloxane (PDMS), Teflon, Nanostructured surfaces

المواد: بولي ميثيل سيلوكسان(PDMS) ، التفلون، الأسطح النانوية

Application: Powers self-charging electronic textiles and touch-responsive devices.

التطبيق: تشغيل المنسوجات الإلكترونية ذاتية الشحن والأجهزة التفاعلية باللمس

d) Photovoltaic Materials (Solar Energy Harvesting)

د) المواد الكهروضوئية (توليد الطاقة الشمسية)

Materials: Perovskite solar cells, Organic photovoltaic (OPV) materials

المواد: خلايا بيروفسكايت الشمسية، المواد الكهروضوئية العضوية(OPV)

Application: Embedded in smart clothing and wearables for continuous power supply.

التطبيق: دمجها في الملابس الذكية والأجهزة القابلة للارتداء لتوفير مصدر طاقة مستمر.

2. Materials for WER in Power Generation

2.المواد المستخدمة في WER لتوليد الطاقة

WER technologies in large-scale power generation rely on innovative materials:

تعتمد تقنيات WER لتوليد الطاقة على مواد مبتكرة لتوفير حلول طاقة مستدامة:

a) Biodegradable and Bio-compatible Materials

أ) المواد القابلة للتحلل الحيوي والمتوافقة بيولوجيًا

Materials: Silk fibroin, Carbon-based materials (Graphene, Carbon Nanotubes)

المواد: الحرير الفيبروني، المواد الكربونية (الجرافين، أنابيب الكربون النانوية)

Application: Implantable medical devices (pacemakers, biosensors) that generate power from body fluids.

التطبيق: تشغيل الأجهزة الطبية القابلة للزرع (مثل أجهزة تنظيم ضربات القلب والمستشعرات الحيوية) باستخدام طاقة الجسم.

b) Flexible and Stretchable Conductors

ب) الموصلات المرنة والقابلة للتمدد

Materials: Silver nanowires, Conductive polymers, Liquid metal alloys (e.g., Galinstan)

المواد: أسلاك الفضة النانوية، البوليمرات الموصلة، سبائك المعادن السائلة) مثل(Galinstan

Application: Wearable power banks and flexible batteries for energy storage in military and outdoor applications.

التطبيق: إنتاج بطاريات مرنة وبنوك طاقة قابلة للارتداء لاستخدامها في التطبيقات العسكرية والخارجية

c) Shape-Memory and Self-Healing Materials

ج) المواد الذكية ذاتية الإصلاح والذاكرة الشكلية

Materials: Shape-memory alloys (Nickel-Titanium), Self-healing polymer composites

المواد: سبائك ذاكرة الشكل (نيكل-تيتانيوم)، مركبات البوليمر ذاتية الإصلاح

Application: Enhances the durability of wearable power systems and flexible electronics.

التطبيق: تعزيز متانة أنظمة الطاقة القابلة للارتداء والإلكترونيات المرنة.

Trends in WER Materials الاتجاهات المستقبلية في مواد

Hybrid Materials: Combining piezoelectric, triboelectric, and thermoelectric properties for higher efficiency.

المواد الهجينة: الجمع بين الخواص الكهرضغطية، الاحتكاكية الكهربائية، والحرارية الكهربائية لزيادة الكفاءة.

Nano-engineered Surfaces: Improving energy conversion efficiency in self-powered electronics.

الأسطح النانوية المهندسة: تحسين تحويل الطاقة في الإلكترونيات ذاتية التشغيل.

Biocompatible and Sustainable Materials: Developing eco-friendly solutions for medical implants and smart textiles.

المواد المتوافقة حيويًا والمستدامة: تطوير حلول صديقة للبيئة لاستخدامها في الزرعات الطبية والمنسوجات الذكية.