جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة بابل
كلية التربية للعلوم الصرفة
قسم الفيزياء

# تأثير درجة الحرارة على مقاومة المواد الموصلة وشبه الموصلة

بحث مقدم الى كلية التربية للعلوم الصرفة – جامعة بابل وهو جزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في تخصص (علوم الفيزياء)

تقدم بهِ الطالبة:

زينب أحمد صباح

تحت إشراف:

د. فاطمة محمد حسين

1447هـ

2026م

# اقرار المشرف

اشـهد ان اعـداد البحـث الموسـوم بـ**(تـأثير درجـة الحـرارة علـى مقاومـة المـــــــــواد الموصـــــــــلة وشـــــــــبه الموصـــــــــلة)** والـــــذي تقـــــدم بـــــهِ الطالبـــــة **(زينـــــب أحمـــــد صـــــباح)** جـرى تحـت اشـرافي، كليـة التربيـة للعلـوم الصـرفة - جامعـة بابـل، وهـو جـزء مـن متطلبـات نيـل شـهادة البكـالوريوس فـي تخصـص (علـوم الفيزياء).

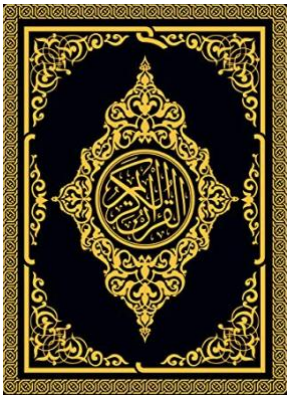
**التوقيع**
**المشرفة: د. فاطمة محمد حسين**
**التاريخ: / /2026م**

## توصية السيد رئيس القسم

(بناءً على توصية الاستاذ المشرف ارشح البحث للمناقشة)

**رئيس القسم**
**الاسم:**
**التاريخ: / /**2026م

**الآية القرآنية**



# ﴿وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا(114)﴾

## صدق الله العلي العظيم

**طه: 114**

# الاهداء

إلى من شجعني على المثابرة طوال عمري، إلى الرجل الأبرز في حياتي

(والدي العزيز)

إلى من بـــها أعلو، وعليها أرتكز، إلى القـــلب المعطاء

(والدتي الحبيبة)

إلى ابي الثاني الذي لا تكتمل سعادتي إلا بهِ

من هو اقرب الى روحي وقلبي وسندي بعد الله

(زوجي الغالي)

إلى من بذلوا جهدًا في مساعدتي وكانوا خيرَ سندٍ

(إخـواني وأخواتي)

أصدقائي وزملائي

إلى كل من ساهم ولو بحرف في حياتي الدراسية

وإلى كل هؤلاء: أهدي هذا العمل، الذي أسال الله تعالى أن يتقبله خالصاً.

# الشكر والعرفان

الشكر لله وحده على فضله ونعمة ما ظهر منها وما بطن

لابد لنا ونحن نخطو خطواتنا الاخيرة في الحياة الجامعية ان نقدم شكرنا الى

اساتذتنا الكرام الذين قدموا لنا الكثير باذلين جهودا كبيرة في بناء جيل الغد

لتبعث الامة من جديد... والذين حملوا أقدس رسالة في الحياة.....

الى جميع الاساتذة الافاضل في قسم الفيزياء

وبالأخص من اشرف على بحثي الدكتورة الفاضلة

(د. فاطمة محمد حسين)

التي كانت جهودها كبيرة في متابعة البحث وابداء النصائح والارشادات العلمية

وتوجيهاتها السديدة في تمام وانجاز البحث.

## الملخص

يتناول هذا البحث دراسة تأثير درجة الحرارة في المقاومة الكهربائية لكلٍ من المواد الموصلة وأشباه الموصلات، بوصف هذه الظاهرة من الموضوعات الأساسية في الفيزياء التطبيقية لما لها من دور مهم في فهم سلوك المواد وتطوير التطبيقات التقنية الحديثة. تبدأ الدراسة بتوضيح مفهوم التوصيل الكهربائي في المواد الموصلة، حيث تعتمد آلية انتقال التيار على حركة الإلكترونات الحرة داخل الشبكة البلورية، ويبيّن البحث أن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة اهتزاز الذرات مما يعيق حركة الإلكترونات ويؤدي إلى زيادة المقاومة الكهربائية.

كما يستعرض البحث خصائص أشباه الموصلات، والتي تتميز بسلوك مختلف تجاه درجة الحرارة، إذ تؤدي زيادة الحرارة إلى توليد أزواج إلكترون–فجوة، مما يزيد من عدد حاملات الشحنة ويؤدي إلى انخفاض المقاومة. ويتناول البحث أنواع أشباه الموصلات، النقية والمشوبة، وآلية عمل الوصلة الثنائية، إضافة إلى تفسير السلوك الكهربائي وفق نظرية حزم الطاقة.

يتضمن البحث جانبًا تحليليًا وتجريبيًا لحساب التوصيلية الكهربائية في الموصلات وأشباه الموصلات، وبيان العلاقة بين التيار والجهد والمقاومة عند تغير درجة الحرارة. كما يناقش المواد فائقة التوصيل وخصائصها المميزة عند درجات الحرارة المنخفضة، ودورها في التطبيقات العلمية المتقدمة.

ويختتم البحث بعرض أهم التطبيقات العملية للمواد الموصلة وأشباه الموصلات في مجالات الطب، والإلكترونيات، والصناعة، والتقنيات العسكرية، موضحًا أهميتها في تطوير الأجهزة الحديثة وأنظمة التحكم والاستشعار. ويؤكد البحث أن فهم تأثير الحرارة في الخصائص الكهربائية للمواد يُعد أساسًا لتصميم أنظمة أكثر كفاءة واستقرارًا، مما يسهم في التقدم العلمي والتكنولوجي.

# فهرس المحتويـــــات


| التسلسل | الموضوع | الصفحة |
|---|---|---|
| | الآية القرآنية | أ |
| | الإهـــــــداء | ب |
| | شكـــــر وتقدير | ج |
| | الملخص | د |
| | فهرس المحتويـــــات | ه |
| | فهرس الاشكال | ز |
| | **الفصل الاول**<br>**مقدمة عامة حول المواد الموصلة وشبه الموصلة** | **9-1** |
| (1-1) | مقدمة عامة | 1 |
| (2-1) | الموصلات الكهربائية | 2 |
| (3-1) | أشباه الموصلات | 3 |
| (1-3-1) | اشباه الموصلات (النقية) | 3 |
| (2-3-1) | اشباه موصلات الغير نقية (المشوبة) | 5 |
| (3-3-1) | الوصلة الثنائية | 7 |
| (4-1) | نظرية الحزم الطاقة | 7 |
| | **الفصل الثاني**<br>**تأثير درجة الحرارة على مقاومة المواد الموصلة وشبه الموصلة** | **20-11** |
| (1-2) | حساب التوصيلية الكهربائية في المواد الموصلة | 11 |
| (2-2) | علاقة المقاومة الكهربائية مع تغير درجة الحرارة | 12 |
| (3-2) | المواد ذات التوصيلية الفائقة | 14 |
| (4-2) | حساب التوصيلية الكهربائية في اشباه الموصلات | 16 |
| (5-2) | تأثير درجة الحرارة في مقاومة المواد شبه الموصلة | 17 |
| | **الفصل الثالث**<br>**تطبيقات المواد الموصلة وشبه الموصلة** | **31-22** |
| (1-3) | تطبيقات المواد الموصلة | 22 |
| (1-1-3) | تطبيقات المواد الموصلة في الطب | 22 |
| (2-1-3) | تطبيقات المواد الموصلة في الإلكترونيات | 24 |
| (3-1-3) | تطبيقات المواد الموصلة في الصناعة | 25 |
| (4-1-3) | التطبيقات العسكرية | 26 |

| | | |
|---|---|---|
| (2-3) | تطبيقات المواد شبه الموصلة | 28 |
| (1-2-3) | تطبيقات المواد شبه الموصلة في الطب | 28 |
| (2-2-3) | تطبيقات المواد شبه الموصلة في الإلكترونيات | 28 |
| (3-2-3) | تطبيقات المواد شبه الموصلة في الصناعة | 30 |
| (3-3) | مميزات أجهزة أشباه الموصلات | 31 |
| | المصـــادر والمراجـــع | **33** |

# فهرس الاشكال


| التسلسل | عنوان الجدول | الصفحة |
|---|---|---|
| | **اشكال الفصل الأول** | |
| الشكل (1-1) | المواد الموصلة والمواد العازلة للتوصيل الكهربائي | 3 |
| الشكل (1-2) | تمثيل الكريستال Si النقي في (T=0K) | 4 |
| الشكل (1-3) | تمثيل الكريستال Si النقي في (T>0K) | 4 |
| الشكل (1-4) | أشباه الموصلات نوع n ونوع p | 6 |
| الشكل (1-5) | مستويات المانحين والمقبولين في أشباه الموصلات من النوع n و p | 7 |
| الشكل (1-6) | حزم الطاقة في المواد شبه الموصلة | 9 |
| | | |
| | **اشكال الفصل الثاني** | |
| الشكل (2-1) | ربط دائرة كهربائية | 11 |
| الشكل (2-2) | مخطط بياني لحساب التوصيلية الكهربائية في المواد الموصلة | 12 |
| الشكل (2-3) | تجربة لبيان علاقة المقاومة الكهربائية مع تغير درجة الحرارة | 13 |
| الشكل (2-4) | بعض الموصلات الخزفية | 15 |
| | **اشكال الفصل الثالث** | |
| الشكل (3-1) | جهاز تخطيط القلب (ECG) | 23 |
| الشكل (3-2) | جهاز الرنين المغناطيسي | 23 |
| الشكل (3-3) | المحركات الكهربائية مصنوعة من الأسلاك الموصلة | 24 |
| الشكل (3-4) | جهاز مسرع الجسيمات | 25 |
| الشكل (3-5) | الصمامات الثنائية | 29 |
| الشكل (3-6) | انواع الترانزستور | 29 |
| الشكل (3-7) | أجهزة الاستشعار | 30 |
| الشكل (3-8) | اشباه الموصلات في الدوائر الكهربائية | 31 |

# الفصل الأول

## مقدمة عامة حول المواد الموصلة وشبه الموصلة

## (1-1) مقدمة عامة

يُعدّ علم الفيزياء من العلوم الأساسية التي تسهم في تفسير الظواهر الطبيعية وفهم القوانين التي تحكم المادة والطاقة، كما يشكّل أساسًا مهمًا للتقدم العلمي والتكنولوجي في مختلف المجالات وقد اهتم العلماء بدراسة خصائص المواد وسلوكها تحت تأثير العوامل الفيزيائية المختلفة، لما لذلك من دور كبير في تطوير التطبيقات العملية والصناعية[1].

وتُعدّ دراسة الخصائص الكهربائية للمواد من الموضوعات الأساسية في علم الفيزياء التطبيقية، لما لها من أهمية كبيرة في فهم سلوك المواد واستخدامها في المجالات العلمية والتكنولوجية المختلفة ومن بين هذه الخصائص تبرز المقاومة الكهربائية بوصفها عاملاً رئيسيًا يؤثر في كفاءة انتقال التيار الكهربائي داخل المواد، إذ تختلف قيمتها باختلاف نوع المادة والظروف الفيزيائية المحيطة بها، ولا سيما درجة الحرارة.

تلعب درجة الحرارة دورًا مهمًا في تحديد سلوك المواد الموصلة وشبه الموصلة، حيث تؤدي زيادة درجة الحرارة في المواد الموصلة إلى زيادة مقاومتها الكهربائية نتيجة ازدياد الاهتزازات الذرية التي تعيق حركة الإلكترونات، في حين يختلف تأثير درجة الحرارة في المواد شبه الموصلة، إذ تؤدي زيادة درجة الحرارة فيها إلى زيادة عدد حاملات الشحنة، مما يؤدي إلى انخفاض مقاومتها الكهربائية ويعكس هذا الاختلاف في السلوك الحراري تباين البنية الذرية وآلية التوصيل الكهربائي بين هذين النوعين من المواد.

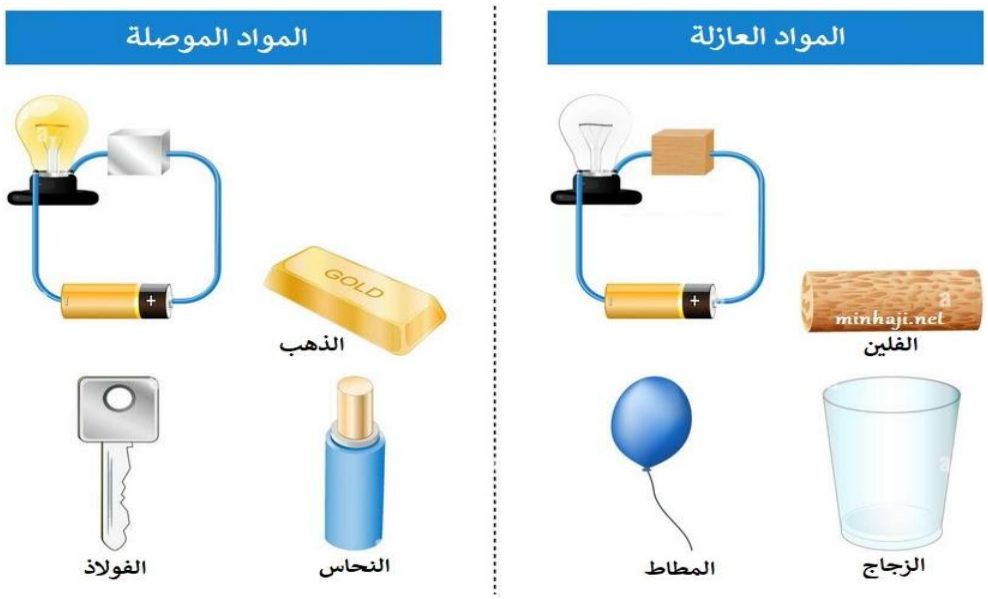
وتنبع أهمية هذا البحث من كونه يسلّط الضوء على الفروق الجوهرية بين تأثير درجة الحرارة على مقاومة المواد الموصلة وشبه الموصلة، لما لذلك من تطبيقات واسعة في تصميم الأجهزة الكهربائية والإلكترونية، مثل الدوائر الكهربائية، وأشباه الموصلات، وأجهزة الاستشعار الحراري. وعليه، يهدف هذا البحث إلى دراسة وتحليل تأثير درجة الحرارة على المقاومة الكهربائية لكل من المواد الموصلة وشبه الموصلة، وبيان أوجه التشابه والاختلاف بينهما، اعتمادًا على الأسس النظرية والتفسيرات الفيزيائية ذات الصلة[2].

## (2-1) الموصلات الكهربائية

وهي الأجسام التي تتوفر عليها إلكترونات حرة تسمح بنقل تيار كهربائي عن طريق ما يسمي توصيل كهربائي تحتوي المواد الموصلة للكهرباء على جسيمات مشحونة تتحرك بحرية عبر المادة وعند تسليط شحنة كهربائية اضافية على الموصل تنتشر الجسيمات المشحونة على سطح المادة والجسيمات الحرة في معظم الموصلات الكترونات غير مرتبطة بالذرات، وايونات في موصلات اخرى[1].

والفلزات موصلات جيدة لانها تحتوي على عدد كبير من الالكترونات الحرة، ولذلك تصنع معظم الاسلاك المستخدمة في نقل الطاقة الكهربائية من الفلزات وخاصة النحاس وبعض السوائل إيضاً موصلات فالماء المالح على سبيل المثال موصل للكهرباء لأنه يحتوي على ايونات صوديوم وكلوريد حرة الحركة داخل السائل وبعض الغازات إيضاً موصلات ففي حالة تسخين غاز ما الى درجات عالية تتحرك ذراته بسرعة عالية تؤدي الى تصادمها بعضها ببعض بشدة مما يجعل الالكترونات تنفلت منها وعندئذ يتحول الغاز الى نوع من الموصلات الكهربائية يسمى البلازما ومن امثلة البلازما الغاز الساخن المتوهج داخل المصباح الفلوري والغازات الساخنة التي تكون الشمس والنجوم الاخرى.

وفي معظم الموصلات تتصادم الالكترونات المتحركة مع الذرات بأستمرار وتفقد الطاقة ولكنها تتحرك بحرية تامة ولاتفقد اي طاقة في بعض المواد التي تسمى الموصلات الفائقة وتتطلب الموصلات الفائقة درجات منخفضة جداً لتؤدي وظيفة توصيل الكهرباء ولذلك يستخدم هذا النوع من الموصلات في بعض الحالات الخاصة وقد يستخدم في المستقبل في صناعة المحركات ذات الكفاءة العالية والمولدات وخطوط القدرة[2].




**الشكل (1-1) المواد الموصلة والمواد العازلة للتوصيل الكهربائي**

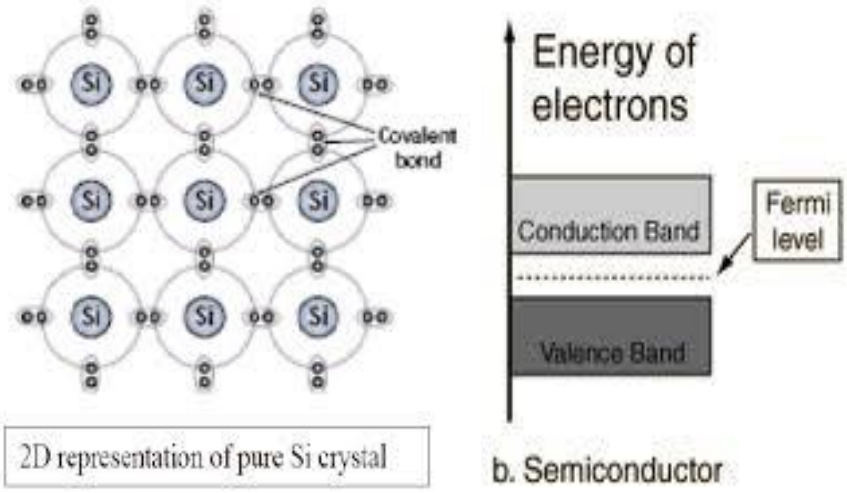
## (1-3) أشباه الموصلات

تعرف أشباه الموصلات بانها مواد عازلة عند درجات الحرارة المنخفضة ولكنها تمتلك قدراً معيناً من التوصيلية الكهربائية عند ارتفاع حرارتها يمكن تقسيم المواد الصلبة الى ثلاث اصناف عازلة وشبه موصلة وموصلة ونلاحظ ان للمواد العازلة كالزجاج والكوارتز (Quartz) توصيلية واطئة جداً في حدود (6-10S/cm) في حين نجدها في المعادن كالألمنيوم والفضة عالية جدا وعادة في حدود(104-106 S/cm) وأما المواد شبه الموصلة فتقع بين هذين النظامين تتأثر توصيلية شبه الموصل بالحرارة والضوء والمجال المغناطيسي وتؤثر فيها وجود كميات ضئيلة من الذرات الشائبة وان حساسية شبه الموصل تجاه هذه العوامل تجعل منه مادة بالغة الأهمية في التطبيقات الالكتروني[3].

### (1-3-1) اشباه الموصلات (النقية) (Intrinsic semiconductors)

تدعى اشباه الموصلات النقية والخالية من الشوائب والعيوب (في درجة الصفر المطلق) بأشباه الموصلات النقية مثل السيليكون والجرمانيوم اللذان يقعان في المجموعة الرابعة من الجدول الدوري حيث انها تمتلك اربعة الكترونات في مدار التكافؤ ولذلك فأن هذا المدار الخارجي يحتاج الى اربعة الكترونات اخرى لكي يتشبع وتكون الذرة في اقل طاقة ممكنة ويحصل هذا عندما تساهم كل ذرة بأربع الكترونات مع اربع ذرات مجاورة (حيث هناك اربع ذرات متساوية البعد عن ذرة خامسة في المركز اما بقية الذرات فبعيدة نسبياً) فتظهر كل ذرة

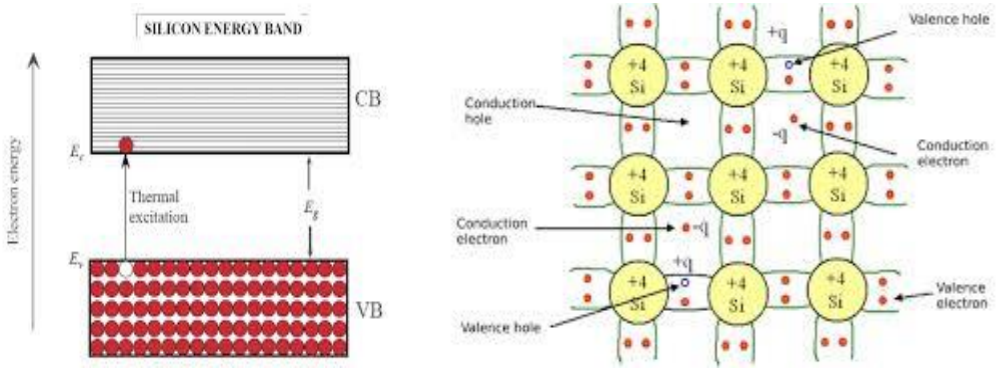
وكأنها تمتلك ثمان الكترونات في مدارها الخارجي وتدعى الاصرة بالأصرة التساهمية (covalent bond) مكونة الشبيكة البلورية[4].




**الشكل (1-2) تمثيل الكريستال Si النقي في(T=0K)**

نلاحظ من الشكل اعلاه بأن جميع الشحنات مقيدة او متعادلة كهربائياً اما في درجات الحرارة العالية فأن الالكترونات تكتسب طاقة كافية لتقطع الاواصر فتصبح حرة طليقة تساهم في عملية التوصيل الكهربائي عند تسليط فرق جهد عليها.

حيث تكون حركة الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل باتجاه معاكس لاتجاه المجال الكهربائي المسلط بينما تتحرك الفجوات بنفس اتجاه المجال والشكل (1-3) يبين شبه موصل نقي في درجة حرارة اكبر من الصفر المطلق ونلاحظ فيها الالكترونات الحرة واماكنها الموجبة وتزداد اعداد الالكترونات الحرة الطليقة بزيادة درجة الحرارة[3].




**الشكل (1-3) تمثيل الكريستال Si النقي في (T>0K)**

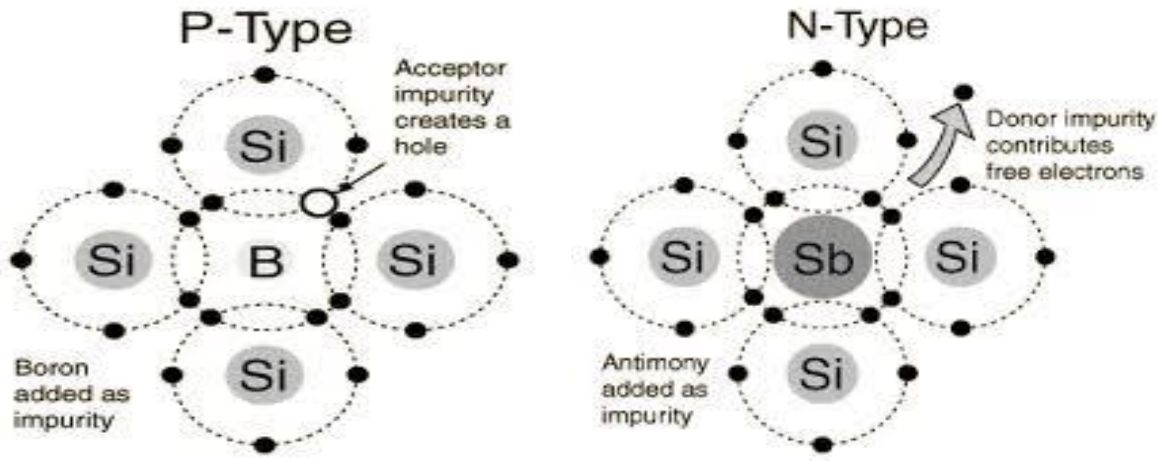
ان عمليـــة توليـــد ازواج الكتـــرون – فجـــوة تســـمى بالتـــأين الحـــراري (thermal ionization) وذلـــك لان بارتفـــاع درجـــة الحـــرارة تحصـــل بعـــض الالكترونـات علـى طاقـة وتقفـز مـن حزمـة التكـافؤ الـى حزمـة التوصـيل تاركـة خلفهـا مكانـاً شـاغراً يحتـاج الـى الكتـرون ليتعـادل لـذا فهـو يسـتطيع ان يحمـل شـحنة موجبـة ويـدعى فجوة (hole) وبذلك تتكون الازواج الكترون – فجوة.

## (1-3-2) اشباه موصلات الغير نقية (المشوبة)

ان التـأين الحـراري فـي المـواد الصـلبة يعتمـد كثيـرا علـى درجـة الحـرارة حيـث ان اي تغيـر طفيـف فـي درجـة الحـرارة يحـدث تغيـراً جـذرياً فـي عـدد الشـحنات الموجـودة فـي شـبه الموصـل وبهـذا تكـون التوصـيلية (conductivity) لشـبه الموصـل حساسـة جـدا لدرجـة الحـرارة الا ان فـي الاجهـزة الالكترونيـة مـن الضـروري السـيطرة علـى موصـلية المـواد لتـؤدي الاغـراض المطلوبـة، ولهـذا السـبب تعـالج او تشـوب (تطعـم) المـواد شـبه الموصـلة النقيـة مثـل السـيليكون بأضـافة كميـات قليلـة مـن ذرات عناصـر غريبـة تسـمى بالشـوائب (impurities) فوجـود الشـوائب فـي شـبه الموصـل يزيـد مـن موصـليتها ويسـيطر عليهـا مـن خـلال كميـة الشـوائب المضـافة ويختصـر الاعتمـاد علـى درجـة الحـرارة ويـؤدي الـى ظهـور نـوع واحـد مـن حـاملات الشـحنة واختفـاء او تضـاؤل النـوع الاخـر هنـاك نـوعين مـن اشـباه الموصـلات الغيـر نقيـة : نـوع سـالب (n-type) ونـوع موجب (p-type)

### 1. نوع سالب (n-type)

اذا اضـيفت كميـة مـن عناصـر المجموعـة الخامسـة (كـذرات شـائبة) مـن الجـدول الـدوري (periodic table) (كالفسـفور او الـزرنيخ او الانتيمـون) الـى شـبه موصـل نقـي مـن المجموعـة الرابعـة كالسـليكون فـأن هـذه الـذرات الشـائبة (التـي لهـا خمسـة الكترونـات تكـافؤ) تـدخل ضـمن تركيـب السـليكون وتكـون اواصـر تسـاهمية مـع الـذرات الاربعـة المحيطـة بكـل منهـا ويبقـى الكتـرون واحـد دون ان يـدخل ضـمن اي اصـرة (يبقـى مرتبطـاً بالـذرة الام فـي درجـة الصـفر المطلـق) وان فصـل هـذا الالكتـرون عـن الـذرة الام (ذرة الانتيمـون مـثلا) لا يحتـاج الـى طاقـة كبيـرة حيـث ان هـذه الطاقـة هـي اقـل بكثيـر مـن الطاقـة اللازمـة لنقـل الكتـرون مـن حزمـة التكـافؤ الـى حزمـة التوصـيل فـي اشـباه الموصـلات النقيـة ويـدعى هـذا الالكتـرون بـإلكترون الهبـة او المـانح (donor electron) والشوائب بالشوائب المانحة او الواهبة كما في الشكل (1-4) ادناه[4]:



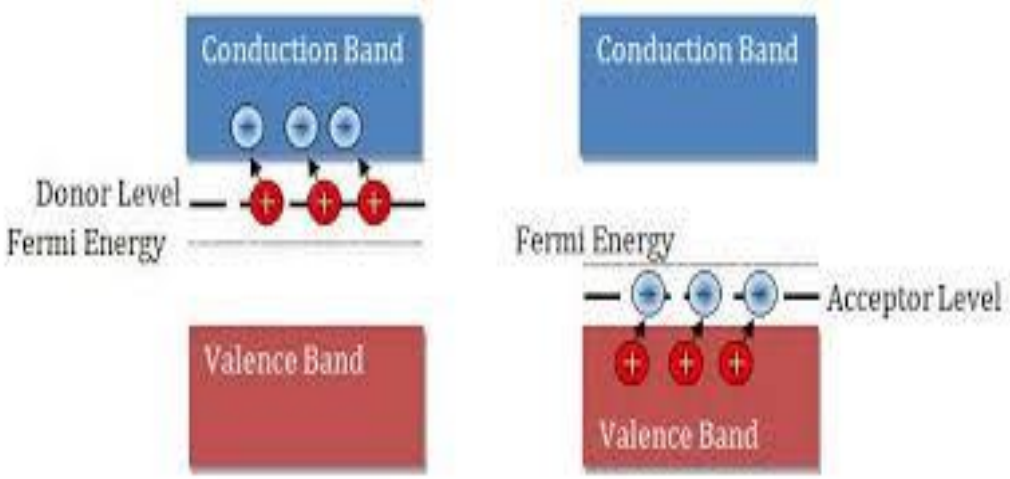

**الشكل (1-4) أشباه الموصلات نوع n ونوع p**

تؤثر الشوائب على المنطقة المحرمة لشبه الموصل حيث تقللها بسبب استحداث مستوى المانح او الواهب (donor level) الذي يقع اسفل حزمة التوصيل فيزاح مستوى فيرمي نحو حزمة التوصيل ضمن المنطقة المحرمة.

### 2. نوع موجب (p-type)

اذا اضيفت كمية من عناصر المجموعة الثالثة من الجدول الدوري (كالبورون او الالمنيوم او الكالسيوم او الانديوم) الى شبه موصل نقي من المجموعة الرابعة كالسيليكون فأن هذه الذرات الشائبة سوف تحتل مواقع ذرات السليكون وتكون مع الذرات الاربعة المحيطة بكل واحدة منها اواصر تساهمية.

ولما كانت ذرات الشوائب (البورون مثلا) تحتوي على ثلاث الكترونات تكافؤ فقط فعليه سوف تبقى اصرة تساهمية واحدة تحتوي على الكتروناً واحداً وتحتاج الى الكترون اخر لاستكمال البنية البلورية الاعتيادية فيكون نقصان في عدد الكترونات الاواصر التساهمية ويسمى فجوة (hole) وهو مكان فارغ يحتاج الى الكترون وقد اعتبرت الفجوات كناقلات او حاملات (carriers) شحنة موجبة مساوية لشحنة الالكترون بالمقدار ولهذا فان ذرة البورون تتقبل الكترون ضمن التركيب البلوري لاستكماله ولهذا سميت هذه الشوائب بالشوائب المتقبلة (acceptor impurities) يقلل التشويب بالمادة المتقبلة من عرض المنطقة المحرمة ويزيح مستوى فيرمي نحو حزمة التكافؤ ويتكون مستوى الذرات المتقبلة قرب حزمة التكافؤ[5].




**الشكل (1-5) مستويات المانحين والمقبولين في أشباه الموصلات من النوع n و p**

## (1-3-3) الوصلة الثنائية ( P- N Junction):

هي المنطقة المشتركة بين مادتين شبه موصلتين واحده من النوع P الموجب والثانية من النوع N السالب في هذه الوصلة تتحرك الالكترونات من الوصلة السالبة إلى الوصلة الموجبة والثقوب من الموجبة إلى السالبة من خلال طبقة تسمى طبقة النفاذ أما حركة الثقوب المعاكسة لحركة الالكترونات فتدعى تيار الانتشار وفرق الجهد على هذه الطبقة يسمى حاجز يسمى حاجز الجهد[4].

## (1-4) نظرية الحزم الطاقة Band Theory

هي عدد من الطاقات التي يمكن للإلكترون أن يمتلكها في المادة الصلبة ففي الذرة الوحيدة توجد الإلكترونات في مستويات طاقة محددة أما في البلورة حيث عدد هائل من الذرات تكون مرتبطة مع بعضها البعض في الشبكة فإن الإلكترونات تتأثر بعدد من الأنوية المحيطة بها و بالتالي تصبح مستويات الذرات المحددة حزما للطاقة المسموحة وهذا المفهوم لمستويات الطاقة يعرف بنظرية الحزمة[3].

كل حزمة تمثل عدد هائل من المستويات الكمية بين تلك الحزم توجد الحزم الحاجزة الإلكترونات الخارجية للذرات (أي تلك المسئولة عن الترابط الكيميائي) تكون حزمة التكافؤ في للمادة الصلبة وهذه الحزمة لها أعلى طاقة فتركيب الحزمة في المواد الصلبة يشير إلى خصائصها الإلكترونية.

ومن أجل التحرك خلال المادة الصلبة يجب على الإلكترونات أن تنتقل من مستوى كمي لأخر وهذا يحدث فقط إذا وجدت مستويات فارغة قريبه من الإلكترونات وعموما إذا كانت حزمة التكافؤ ممتلئة فإن الإلكترونات لا تستطيع ان تنتقل إلى

مستوى جديد في نفس الحزمة ولكي يحدث ذلك يجب أن تكون الإلكترونات في حزمة غير ممتلئة تعرف بحزمة التوصيل.

فالفلزات جيدة التوصيل للتيار الكهربائي إما لأن حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل نصف ممتلئة أو لأن حزمة التوصيل تتداخل مع حزمة التكافؤ وفي كلا الحالتين تتوفر حالات الفراغ في المواد العازلة تفصل حزمة التكافؤ عن حزمة التوصيل بحزمة حاجزة واسعة وبالتالي لا تمتلك الإلكترونات طاقة كافية "للقفز" من مستوى لآخر ولكن في أشباه الموصلات تكون الحزمة الحاجزة ضيقة بحيث عند درجات الحرارة الطبيعية تستطيع الإلكترونات الموجودة في مستوي التكافؤ أن تنتقل إلى مستوى آخر عن طريق تحفيز حراري ولكن عند الصفر المطلق تصبح أشباه الموصلات مواد عازلة[5].

تتوزع الالكترونات حول النواة في مدارات رئيسية حيث يتسع كل مدار عدد من الكترونات يعتمد هذا العدد على رقمه حسب العلاقة التالية العدد=$2n^2$ حيث n رقم المدار كل مدار رئيسي يتكون من عدد من المدارات الفرعية وهي S ويتسع 2 إلكترون P ويتسع 6 الكترونات d ويتسع 10 الكترونات أما f فيتسع إلى 14 إلكترون تعتمد الخواص الكهربائية للمواد على التوزيع الالكتروني للإلكترونات وخاصة على عدد الالكترونات في المدار الأخير ومن الممكن تفسير الخواص الكهربائية للمواد عن طريق نظرية أحزمة الطاقة.

**أحزمة الطاقة**: هي الطاقة التي تمتلكها الكترونات المدارات الأخيرة في مجموعة من المدارات المتقاربة تتوزع الالكترونات في مدارات حول النواة حسب القانون التالي:

عدد الالكترونات في المدار=$2n^2$

حيث ن:رقم المدار الرئيسي وعدد الالكترونات في المدار الرئيسي تتوزع في المدارات الفرعية (s,p,d,f) التابعة له ويمتلك كل الإلكترون طاقة محددة أيضا تعتمد على رقم المدار له ويستطيع الإلكترون الانتقال من مدار لآخر إذا فقد أو اكتسب فرق الطاقة بين المدارين فقط ولا يمكن أن يتواجد بين المدارات وقد يتحرر من الذرة إذا أعطي طاقة تساوي طاقة المدار الموجود فيه تعتمد الخصائص الكهربائية للمادة على مدى اتساع حزم الطاقة والفجوات بينها والتي تعتمد بدورها على الترتيب الالكتروني للمادة[6].

**حزمة التوصيل**: هي أعلى حزمة للطاقة في الذرة وهي المسئولة عن توصيل أو عدم توصيل المادة للتيار الكهربائي .

**حزمة التكافؤ**: هي حزمة الطاقة التي يأتي ترتيبها في الذرة وفي الطاقة تحت حزمة التوصيل مباشرة حيث يفصل بينها وبين حزمة التوصيل فجوة الطاقة.

**فجوة الطاقة**: هي ليست فراغ موجود بين الحزمتين ولكن هو مقدار الطاقة التي تلزم للإلكترونات الموجودة في حزمة التكافؤ حتى تنتقل إلى حزمة التوصيل.

**الشكل (1-6) حزم الطاقة في المواد شبه الموصلة**

تكون حزم التكافؤ وعند درجات الحرارة المنخفضة ممتلئة وحزم التوصيل فارغة ولكن فجوة الطاقة بين الحزمتين تكون صغيرة حيث عند درجة حرارة الغرفة مثلاً ينتقل عدد من الكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل وتصبح هذه المادة موصلة للتيار الكهربائي كيف يمكن زيادة موصلية هذه المواد[5]:

1- رفع درجة حرارتها (بالتسخين).
2- باستخدام مجال كهربائي شدته صغير.
3- عن طريق تطعيمها بذرات مواد أخرى.

# الفصل الثاني

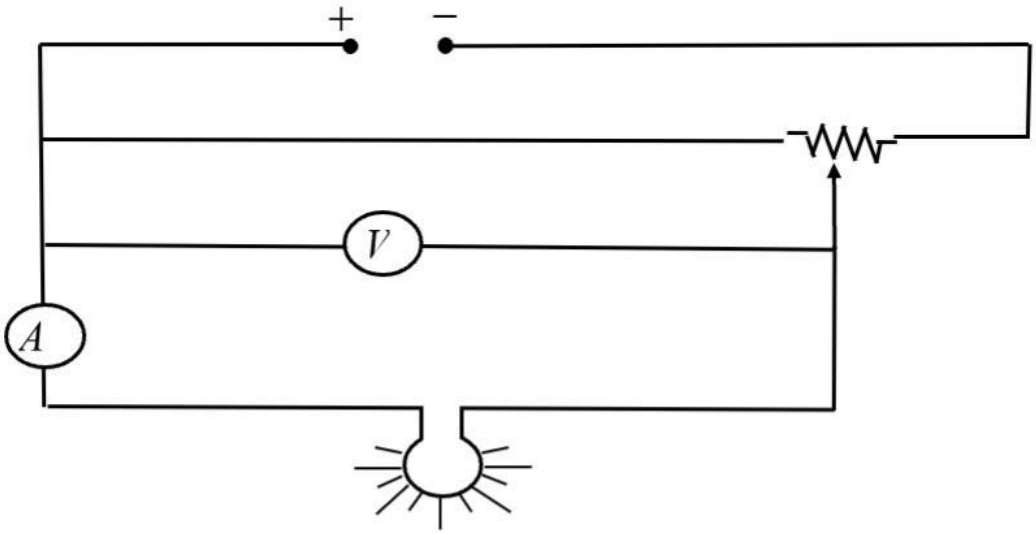
## تأثير درجة الحرارة على مقاومة المواد الموصلة وشبه الموصلة

## (1-2) حساب التوصيلية الكهربائية في المواد الموصلة

هناك انواع مختلفة من الموصلات تخضع لقانون اوم ولكن لا يمكن تطبيق هذا القانون على المقاومات التي ترتفع درجة حرارتها بشكل ملحوظ كما في مصباح التنكستن في هذه التجربة لان ارتفاع درجة حرارتها سيزيد من مقاومتها لمرور التيار وبالتالي لا يمكن تطبيق قانون اوم عليها لعدم ثبوت المقاومة، لذا نرى ان منحنيات العلاقة بين فرق الجهد والتيار لمثل هذه الاجسام الموصلة لا يكون خطاً مستقيماً. ويمكن كتابة العلاقة بين التيار والفولتية عبر فتيله مسخنة بالشكل التالي[6]:

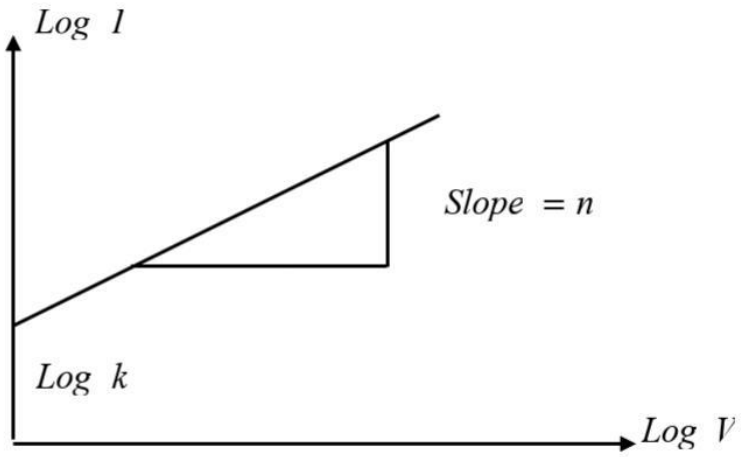
$$I = K V$$

حيث ان K قيمة ثابتة وتمثل معامل التوصيل لمعدن التنكستن.




**الشكل (2-1) ربط دائرة كهربائية**

1- اربط الدائرة كما في الشكل (2-1).
2- غير الفولتية بواسطة مجهز الفولتية من الصفر ولحين اشتغال المصباح.
3- سجل قراءة الفولتية وقراءة الاميتر المقابلة لها.
4- رتب نتائجك في جدول كما موضح ادناه .
5- ارسم خط بياني بين ($\boldsymbol{log\ I}$) على محور الصادات و($\boldsymbol{log\ V}$) على محور السينات نحصل على خط مستقيم يقطع المحور الصادي، و القطع يمثل قيمة ($\boldsymbol{log\ k}$) ومنه يمكن حساب قيمة **k** كما في الشكل (2-2)[7].




**الشكل (2-2) مخطط بياني لحساب التوصيلية الكهربائية في المواد الموصلة**

## (2-2) علاقة المقاومة الكهربائية مع تغير درجة الحرارة

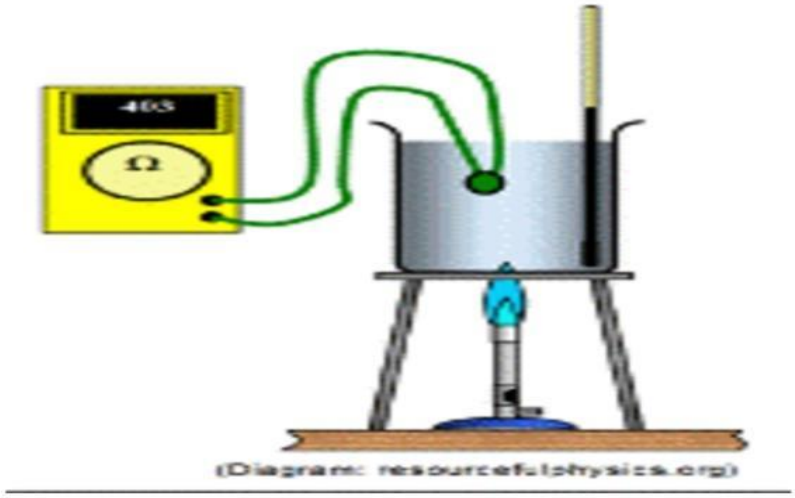
عند مرور تيار كهربائي في موصل، فإن الإلكترونات الحرة تتحرك داخل شبكة بلورية من الذرات هذه الحركة ليست سلسة بالكامل، بل تتعرض لتصادمات مستمرة تعيق سريان الشحن، درجة الحرارة تلعب دورًا أساسيًا في تحديد شدة هذه التصادمات، إذ تؤثر مباشرة في اهتزاز الذرات، وبالتالي في مقدار المقاومة، تكمن أهمية دراسة هذه الظاهرة في التطبيقات العملية، حيث إن تغير المقاومة بسبب الحرارة قد يؤدي إلى فقدان طاقة، أو تغير أداء الأجهزة، أو حتى تلف الأنظمة الكهربائية إن لم يُؤخذ بالحسبان[6].

وان تغير درجة الحرارة يؤثر على توصيلة المواد وذلك لان ارتفاع درجات الحرارة يؤدي الى زيادة حركة الجزيئات المكونة للمادة الموصلة وبالتالي زيادة في اعاقة الجزيئات للالكترونات المارة خلال المادة ، حيث تعرف المواد بأنها ذات معامل حرارى موجب ككل المعادن أو ذات معامل حرارى سلبى كالكربون وذلك لان الأولى تزداد مقاومتها خطيا مع ارتفاع درجة الحرارة والثانية تتناقص تدريجيا مع درجة الحرارة[7].

ان اكثـر المعـادن المسـتخدمة هـي سـبيكة النيكـل - كـروم لعمـل اسـلاك مقاومـة ومـن عيوبهـا أن معامـل زيـادة الحـرارة كبيـر فلـو قمـت بقيـاس التيـار فـى سـلك السـخان ستجد أنه كبير فى البدء ثم يقل عند الإحمرار تدريجيا.

لـذلك فعنـد وضـع ملـف نحاسـي فـي انـاء مـن المـاء ورفـع درجـة حرارتـه سـوف تـزداد درجـة حـرارة الملـف وبالتـالي تغيـر فـي قيمـة الفولتيـة والتيـار، وان العلاقـة بـين الفولتية والتيار لكل قراءة تعطى بالعلاقة[5]:

$$R = V / I$$




**الشكل (2-3) تجربة لبيان علاقة المقاومة الكهربائية مع تغير درجة الحرارة**

1 – اربط الملف الكهربائي مع مصدر للتيار وكذلك قم بربط كل من الفولتميتر والاميتر .

2 – قم بتشغيل مصدر التسخين وراقب درجات الحرارة.

3 – قم بستجيل قيم الفولتية والتيار مع تغير كل (20) درجة من الحرارة .

4 – قم بحساب المقاومة الكهربائية في كل مره من خلال تقسيم قيمة فرق الجهد على التيار .

5 – ناقش علاقة كل من الفولتية والتيار والمقاومة مع درجات الحرارة كلا على حدة من خلال قيم الجدول.

6 – ارسم علاقة بيانية بين قيم درجات الحرارة على محور السينات والمقاومة على محور الصادات وناقش الرسم[8].

## (3-2) المواد ذات التوصيلية الفائقة

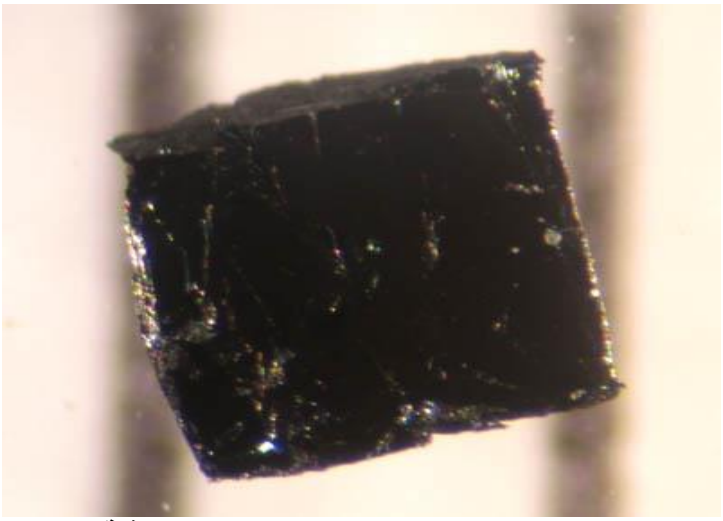
يمكن التمييز بين نوعين من المواد ذات الناقلية الفائقة، وذلك بحسب سلوكها عند تعرضها لحقل مغنطيسي:

يتميز النوع الأول type I superconductor بأنه عند تعرضه لحقل مغنطيسي يطرده إلى الخارج إلى أن تبلغ شدة هذا الحقل قيمة تدعى الحقل الحرج Hc، يسمح عندها بدخول الحقل إلى داخل المادة دفعة واحدة.

أما النوع الثاني type II superconductor فإنه يطرد الحقل المغنطيسي حتى تبلغ شدته قيمة تدعى الحقل الحرج السفلي $Hc_1$، يبدأ عندها الحقل بولوج المادة جزئياً، وذلك على شكل كمّات من التدفق تدعى الدوامات المغنطيسية vortex ويزداد عدد هذه الكمّات ضمن المادة كلما ارتفعت شدة الحقل إلى أن تبلغ قيمة الحقل الحرج العلوي $Hc_2$ الذي تفقد المادة عنده حالة الناقلية الفائقة لتعود إلى الحالة الطبيعية[6].

عند مرور تيار ضمن ناقل فائق من النوع الثاني فإن هذه الدوامات تتحرك باتجاه متعامد لاتجاه التيار، وتولد هذه الحركة حقلاً كهربائياً باتجاه التيار المار يشعِر بوجود مقاومة كهربائية ضعيفة في الحالة العملية تكون الدوامات ملتصقة بعيوب ضمن المادة، ومن المعروف في علم المواد أنه يمكن تقليل كمية العيوب ضمن مادة معينة ولكن لا يمكن تحضير مادة من دون عيوب، ومنه فإن الدوامات تجد دائماً ما تلتصق به.

**اما الموصلات الفائقة عند درجات حرارة مرتفعة:** هي نوع من المواد تسلك سلوك الموصلات الفائقة عند درجات حرارة أعلى من -200 درجة مئوية (أو -320 فهرنهايت)، وهي أقل درجة حرارة يمكن أن يصل إليها النيتروجين السائل، الذي يعتبر أحد أبسط المبردات المتاحة في مجال التبريد الفائق تظهر خصائص الموصلات الفائقة فقط (تحت تأثير الضغط الجوي) عند درجات حرارة أقل بكثير من درجة الحرارة المحيطة ولذا يُشترط تبريدها تمثل المواد الخزفية معظم الموصلات الفائقة التي تعمل عند درجات حرارة مرتفعة من ناحية آخرى تعمل الموصلات الفائقة الفلزية عند درجات حرارة أقل من -200 درجة مئوية وهي تُدعى الموصلات الفائقة عند درجات الحرارة المنخفضة وتُصنف الموصلات الفائقة الفلزية كذلك ضمن فئة الموصلات الفائقة الاعتيادية، إذ إنها أُكتشفت وأُستخدمت قبل اكتشاف النوع الآخر من الموصلات الفائقة[7].



**الشكل (2-4) بعض الموصلات الخزفية**

وفي الوقت الحالي اصبحت الموصلات الخزفية مناسبة للاستخدامات العملية، ولكن لا زلنا نواجه مشاكل عديدة في تصنيعها علاوة على قلة الأمثلة على استخداماتها العملية ومعظم المواد الخزفية هشة مما يجعل تصنيع الأسلاك منها عملية صعبة[6].

تكمن الميزة الكبرى للموصلات الفائقة الخزفية في أنه يُمكن تبريدها باستخدام النيتروجين السائل على الجانب الآخر تتطلب الموصلات الفائقة الفلزية مواد مبردة يصعب الحصول عليها، مثل الهيليوم السائل ولسوء الحظ لم نعثر حتى الآن على أي موصلات فائقة يمكن تبريدها إلى الحد الكافي باستخدام الثلج الجاف فقط (ثاني أكسيد الكربون في الحالة الصلبة) ولا يظهر تأثير التوصيل الفائق في أي منها تحت ظروف الضغط الجوي ودرجة حرارة الغرفة (إذ يظهر هذا التأثير عند درجات حرارة أقل من أي درجة حرارة سُجلت على سطح الأرض) ولذا تتطلب جميع الموصلات الفائقة نظام تبريد من نوع ما تندرج الفئة الرئيسية من الموصلات الفائقة عند درجات حرارة مرتفعة إلى فئة أكاسيد النحاس (بعض الأنواع المحددة منها فقط) بينما تندرج الفئة الثانية من الموصلات عمليًا إلى فئة المركبات الحديدية يندرج ثنائي بوريد المغنيسيوم في بعض الأحيان إلى الموصلات الفائقة عند درجات حرارة مرتفعة: إذ إن عملية تصنيعه بسيطة نسبيًا، ولكن تأثيره يظهر عند درجة حرارة أقل من -230 درجة مئوية، ولذلك يتعذر تبريده بواسطة النيتروجين السائل، وعوضًا عن ذلك يمكن تبريده بواسطة الهيليوم السائل الذي قد يصل إلى درجة حرارة أقل من تلك بكثير تسلك معظم الموصلات الفائقة الخزفية سلوك الموصلات الفائقة من النوع الثاني[8].

## (4-2) حساب التوصيلية الكهربائية في اشباه الموصلات

**الموصلية الكهربائية**: هي خاصية في من خصائص أي مادة و تمثل قدرتها على نقل الشحنات المتحركة من مكان إلى آخر وتعكس مقدار مسامحة مادة ما لمرور التيار فيها ويعبر عنها جورج أوم في قانون أوم في صيغته المغناطسية، وهي صيغة محورة من القانون الكهربائي كالتالي[9]:

$$J = \sigma E \dots\dots\dots\dots (1)$$

حيث :

E هي شدة المجال الكهربائي فولت لكل متر

J هي كثافة التيار أمبير لكل متر مربع

$\sigma$ وحدة الموصلية هي سيمنز لكل متر.

وفي الموصل الكهربائي الموصلية هي مقلوب المقاومية

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \dots\dots\dots\dots (2)$$

و بما أن مقاومة المعدن تزداد بزيادة الحرارة فتبعا لذلك فإن الموصلية الكهربائية في المعادن تزداد كلما نقصت الحرارة و يعبر عن ذلك رياضيا حسب القانون التالي[7]:

حساب التوصيلية الكهربائية (conductivity)(معامل التوصيل) في اشباه الموصلات النقية.

$$\sigma_{T'} = \frac{\sigma_T}{1 + \alpha(T - T')} \dots\dots\dots\dots (3)$$

تعطى كثافة التيار **(حسب النظرية الكلاسيكية للإلكترون الحر)** بالعلاقة التالية:

$$J = n\,e\,\mu\,E \dots\dots\dots\dots (4)$$

اما في حالة اشباه الموصلات ولوجود الالكترونات والفجوات فأن كثافة التيار للإلكترونات والفجوات يعطى على التوالي:

$$J_e = n\,e\,\mu_e\,E \dots\dots\dots\dots (5)$$

$$J_p = p\,e\,\mu_p\,E \dots\dots\dots\dots (6)$$

حيث ان :

E = شدة المجال الكهربائي $(V/m)$.

$J_e$ , $J_p$ = كثافة التيار للالكترونات والفجوات $(A / m^2)$.

$\mu_e$ , $\mu_p$ لكل من الالكترونات والفجوات على التوالي (mobility) = الانجرافية او التحركية

$(m^2\ V^{-1}s^{-1})$ ... ... ... ..... ... ... ... . ... ... ... ... ... . ... .... (7)

n , p = هي كثافة الالكترونات والفجوات (عدد الالكترونات او الفجوات لوحدة الحجم) على التوالي.

وبما ان كثافة التيار الكلي في شبه الموصل تساوي مجموع كثافة تيار الالكترونات والفجوات اي[7].

$$J = J_e + J_p = e[n\ \mu_e + p\ \mu_p]E = \sigma\ E \text{ ..... ... ... .....(8)}$$

حيث ان (σ) تمثل التوصيلية الكهربائية واضح ان معادلة (8) تمثل قانون اوم حيث

$$\sigma = e[n\ \mu_e + p\ \mu_p] \text{ ..... ... ... ... . ... ... ... ... ... ....(9)}$$

وبما ان في اشباه الموصلات النقية تكون(p=n) فأن معادلة (9) تصبح:

$$\sigma = en[\ \mu_e + \ \mu_p] \text{ ..... ... ... ... . ... ... ... ... . ... ... (10)}$$

(التوصيلية الكهربائية لشبه موصل نقي)

## (5-2) تأثير درجة الحرارة في مقاومة المواد شبه الموصلة

تعتمد التوصيلية الكهربائية لأشباه الموصلات على كثافة حاملات الشحنة من الإلكترونات والثقوب لذلك لبد من معرفة كيفية حساب كثافة الإلكترونات في نطاق التوصيل وكثافة الثقوب في نطاق التكافؤ وهذا يستدعي استخدام صيغة[9]:

$$D(E) = CE^{\frac{1}{2}} \text{ ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... (1)}$$

حيث أن D (E) كثافة الطاقة

$$C = \frac{1}{2\pi^2}\left[\frac{2m^j}{k^2}\right]^{\frac{3}{2}} \text{ ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... ... . (2)}$$

$m^j$= الكتلة المؤثرة للجسم الناقل للكهربائية حيث

$m_e^j$ = الكتلة المؤثرة للإلكترون

$m_h^j$ =( الكتلة المؤثرة للثقب (الفجوة

وعليه تصبح كثافة الإلكترونات

$$n_e = \int D(E)F(E)dE \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (3)$$

حيث أن

$$D(E) = CE^{\frac{1}{2}} = C_e\left(E - E_g\right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (4)$$

$$n_e = \int_{Eg}^{inp} c_e\left(E - E_g\right)^{\frac{1}{2}} F(E)dE \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (5)$$

حيث ان

$$c_e = \frac{1}{2\pi^2}\left[\frac{2m^j}{k^2}\right]^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (6)$$

يمكن اعتبار أن الإلكترونات القريبة من قاع نطاق التوصيل والثقوب القريبة من قمة نطاق التكافؤ هي تكون ذات أهمية لذلك يمكن أخذ الحد الاعلى للتكامل في العلاقة (6) إلي ما لانهاية ونعتبر الحد الدنى صفر وبما إن $(E - E_f)$ ستكون اعلى من $kT$ يمكن تقريب دالة فيرمي ديراك لتكون في شكل دالة توزيع بولتزمان[8]:

$$F(E) = \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (7)$$

فتكون الكثافة الإلكترونية هي:

$$n_e = C_e \int \left(E - E_g\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right) dE \dots\dots\dots\dots (8)$$

وبضرب هذه العلاقة في ( $exp\frac{E_g}{kT}$) والقسمة عليها تصبح:

$$n_e = 2\left[\frac{2\pi m_e^j}{k^2}\right] \exp\left[\frac{E_f - E_g}{kT}\right] \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (9)$$

أهمية هذه العلاقة أنها تبين اعتماد الكثافة الإلكترونية على درجة الحرارة كما يمكن استخدامها لتحديد موقع مستوى فيرمي في حالة أشباه الموصلات الاصلية يتساوى عدد الإلكترونات في نطاق التوصيل بعدد الثقوب في نطاق التكافؤ اي ان $n_e = n_h$ ويمكن اثبات ذلك باتخاذ إجراءات مشابهة لخطوات كثافة الإلكترونات ليجاد كثافة الثقوب $n_h$ يلاحظ في البداية أن (1-F(E)) تمثل الاحتمال بان تكون حالة الطاقة E غير مشغولة لذلك تكون كثافة الثقوب في نطاق التكافؤ كالتي[9]:

$$n_h = C_h \int_{bottom}^{0} (-E)^{\frac{1}{2}}(1 - F(E)dE) \dots\dots\dots\dots (10)$$

حيث يكون التكامل من قاع نطاق التكافؤ إلي قيمة نطاق التوصيل (الصفر) ويلاحظ أن (E-) موجبا لان الطاقة (E) سالبة تحت مستوى الصفر من قمة النطاق وعندما يكون $E - E_f$ كبيرا بدرجة كافية و سالبا يكون:

$$1 - F(E) = \exp\left(\frac{E-E_f}{kT}\right) \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (11)$$

لذلك يمكن أن نكتب كثافة الثقوب كالتي:

$$n_h = C_h \int_{-\infty}^{0} (-E)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right) dE \dots\dots\dots\dots (12)$$

علما بأن الثابت $C_e = j\ C_h$

مع اختلف الكتلة المؤثرة فماذا عوضنا $\frac{-E}{kT} = y$ تصبح

$$n_h = C_h (kT)^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-E_f}{k\pi}\right) \frac{\pi^{\frac{1}{2}}}{2} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (13)$$

بضرب المعادلة (9) في المعادلة (12) نحصل على :

$$n_e n_h = C_e C_h (kT)^3 \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \dots\dots\dots\dots\dots (14)$$

وهذه العلاقة لا تعتمد على مستوى فيرمي ويمكن افتراض أن العلاقة (2-6-13)تنطبق على أشباه الموصلات الاصلية بتساوي عدد الإلكترونات بعدد الثقوب $n_e = n_h$ وبتساوي المعادلتين (2-6-9)(2-6-12) وإذا كانت درجة الحرارة المطلقة صفرا أو قريبة من الصفر المطلق وكانت الكتلة المؤثرة للإلكترونات مساويا للكتلة المؤثرة للثقوب فإن موقع مستوى فيرمي $E_f$ يكون في منتصف فجوة الطاقة[8].

$$E_f = \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} kTIn\left(\frac{m_h^j}{m_e^j}\right) \dots\dots\dots\dots\dots\dots (15)$$

$$E_f = \frac{1}{2} E_g \dots\dots\dots (14)$$

وليكون اعتماد هذا المستوى على درجة الحرارة كبيرا إلا إذا ارتفعت درجة الحرارة ارتفاعا كبيرا فوق درجة حرارة الغرفة يمكن حساب عدد الإلكترونات والثقوب لكل من السليكون

والجرمانيوم حيث انه في درجة الحرارة العادية (300K) يوجد حوالي $1.5 \times 10^{10}$ إلكترون حر لكل $cm^3$ من مادة السليكون النقي كما توجد حوالي $5.2 \times 10^{10}$ الكترون حر لكل $\mathrm{cm}^3$ الجرمانيوم وكذلك يوجد نفس العدد من الثقوب لان $n_e = n_h$ وهذه نسبة تبين أن الجرمانيوم يكون موصل أفضل من السليكون في درجات الحرارة العادية[9].

**الجدول (2-1) بعض من خواص مواد اشباه الموصلات عنده درجة حرارة الغرفة 27C°**

| الكمية | Sl | Ga SA | Cd Ti | In P |
|---|---|---|---|---|
| **طاقة الفجوة** | 1.12 | 1.42 | 1.5 | 1.45 |
| **كثافة الحالة المؤثرة في شريحة التوصيل $n_e cm^{-3}$** | $2.9\times10^{19}$ | $4.3\times10^{17}$ | $7.5\times10^{17}$ | $5.5\times10^{17}$ |
| **كثافة الحالة في نقاط التكافؤ $n_h cm^{-3}$** | $1\times10^{19}$ | $8.2\times10^{18}$ | $1.8\times10^{19}$ | $1.8\times10^{19}$ |
| **كثافة الحامل النقي $n_j cm^{-3}$** | $1.4\times10^{10}$ | $1.8\times10^{6}$ | $6.9\times10^{5}$ | $1.5\times10^{7}$ |

# الفصل الثالث

# تطبيقات المواد الموصلة وشبه الموصلة

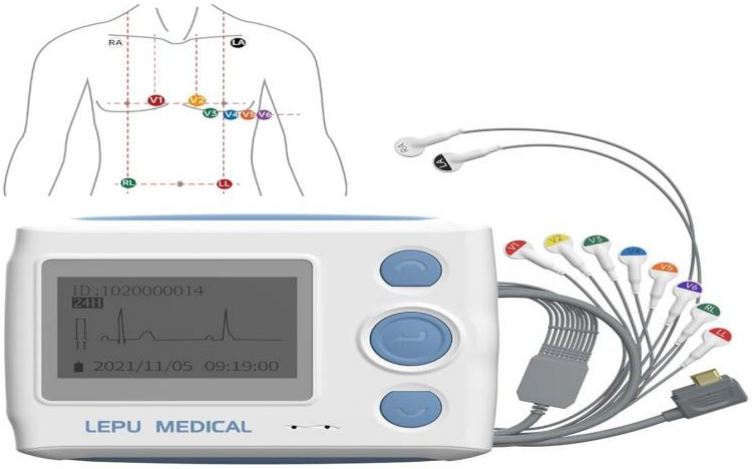
## (1-3) تطبيقات المواد الموصلة

تحتل المواد الموصلة مكانة أساسية في الحياة العلمية والتقنية، فهي تشكّل العمود الفقري للعديد من الأنظمة الكهربائية والإلكترونية، نظرًا لقدرتها العالية على نقل التيار الكهربائي بكفاءة. لقد أصبح من الصعب الاستغناء عنها في مختلف المجالات، سواء في الصناعة أو الطب أو الإلكترونيات، لما لها من خصائص كهربائية وحرارية مستقرة تسمح باستخدامها في تطبيقات دقيقة ومتنوعة، ومن أهم هذه التطبيقات ما يأتي[10]:

### (1-1-3) تطبيقات المواد الموصلة في الطب

تُستخدم المواد الموصلة في المجال الطبي لتطوير الأجهزة التي تعتمد على مرور التيار الكهربائي بكفاءة مع توفير أمان للمرضى، فهي تدخل في صناعة الأجهزة التشخيصية والعلاجية مثل أجهزة تخطيط القلب (ECG) وأجهزة التحفيز الكهربائي، حيث تضمن الموصلات الكفؤة نقل الإشارات الكهربائية الدقيقة دون فقدان أو تشويه. كما تُستفاد في تصنيع الحساسات الطبية التي تراقب المتغيرات الحيوية مثل درجة الحرارة، ومعدل النبض، وضغط الدم، إذ يعتمد عملها على استجابة المواد الموصلة للتغيرات الكهربائية الصغيرة، ما يسمح بإجراء قياسات دقيقة جدًا، ومن أبرز الأمثلة على ذلك[11]:

- أجهزة مراقبة النشاط الكهربائي للقلب والدماغ.
- أنظمة التحفيز الكهربائي للعضلات والأعصاب.
- الحساسات الدقيقة المستخدمة في أجهزة التشخيص المختبري.
- الأنظمة التي تقيس التغيرات الكهربائية في الأنسجة أثناء العمليات الجراحية.




**الشكل (3-1) جهاز تخطيط القلب (ECG)**

**التصـــوير بـــالرنين المغناطيســـي (The Magnetic Resonance Imaging) :**

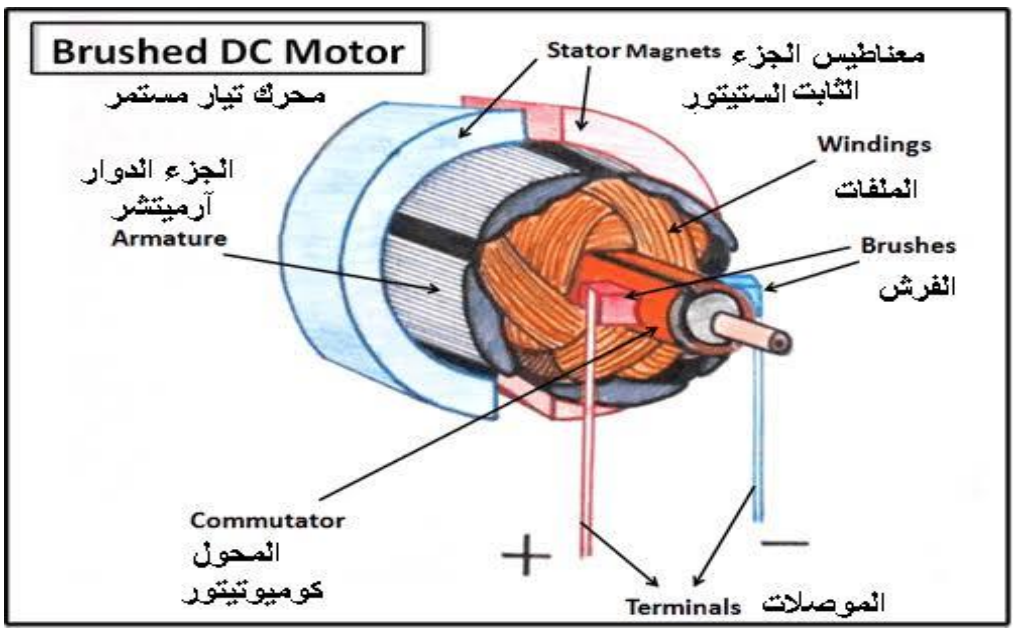
اجهـزة الـرنين المغناطيسـي تسـتخدم المـواد فائقـة التوصـيل لتوليـد مجـال مغناطيسـي كبيـر يسـمح لهـا بالحصـول علـى صـور داخـل جسـم المـريض ويعتبـر التصـوير بـالرنين المغناطيسـي مـن أحـدث طرائـق التشـخيص، حيـث يسـتطيع الطبيـب بواسـطته النظـر داخـل جسـم الأنسـان مـن دون الحاجـة إلـى أيـة وسـائط تشـريح أو عمليـات جراحيـة، تعمـل هـذه الطريقـة علـى أسـاس تعـريض جسـم الإنسـان (أو المنطقـة التـي يرغـب الطبيـب فـي تشخيصـها) لمجـال مغناطيسـي قـوي يتولـد مـن ملـف مصـنوع مـن مـواد فائقـة القـدرة علـى التوصيل[10].

**الشكل (3-2) جهاز الرنين المغناطيسي**

### (3-1-2) تطبيقات المواد الموصلة في الإلكترونيات

تلعب المواد الموصلة دورًا حيويًا في صناعة الأجهزة الإلكترونية، فهي تشكل المسارات الكهربائية على لوحات الدوائر المطبوعة وتربط المكونات معًا لضمان نقل الإشارات بكفاءة، يدخل استخدامها في جميع الأجهزة الإلكترونية تقريبًا، من الحواسيب والهواتف الذكية إلى الأنظمة الصناعية الدقيقة. ويمكن التحكم في خصائص هذه الموصلات عن طريق اختيار المواد ونقاوتها وسمكها لتتناسب مع التطبيقات المختلفة، ومن أبرز استخداماتها[12]:

- الدوائر الكهربائية والإلكترونية: تربط المكونات المختلفة وتضمن وصول الطاقة والإشارة.
- المحركات الكهربائية: تعتمد على الأسلاك الموصلة لنقل التيار وتحريك الملفات والمجالات المغناطيسية.
- الإلكترونيات الدقيقة: مثل المعالجات والرقائق، حيث تضمن الموصلات نقل الإشارة بدقة وسرعة عالية.




**الشكل (3-3) المحركات الكهربائية مصنوعة من الأسلاك الموصلة**

**وكـذلك اسـتخدامها فـي المسـارعات ( The Accelerator)** و يعـرف مسـارع الجسـيمات (Particle Accelerator) بأنـه الجهـاز الـذي يسـتخدم لتسـريع جسـيمات مشـحونة كهربائيـة (إلكترونات أو بروتونات) والوصول بهـا إلـى مسـتويات سـرعة عاليـة جـدا بوسـاطة مجـالات مغناطيسية قوية يجري توليدها في مغانط حلقية الشكل ولأن المغانط تلعـب الـدور الـرئيس فـي عملية تسريع حركة الجسيمات المشحونة وذلك بوساطة المجال المغناطيسي الذي تولده فإنه إذا دخلت المواد فائقة القدرة على التوصيل في تركيبها فإن هذه المغانط ستكون قـادرة علـى توليـد مجالات كهرمغناطيسية قوية جدا ولا يندرج هذا الأمـر فـي إطـار الافتـراض النظـري بـل إنـه أصبح حقيقة؛ فالولايات المتحدة الامريكية تمتلك الآن واحـداً مـن المسـارعات التـي تـدخل فـي تركيبهـا مـواد فائقـة القـدرة علـى التوصـيل ويطلـق علـى هـذا الـنمط مـن المسـارعات اسـم تيفاترون( Tevatron )[13].

**الشكل (3-4) جهاز مسرع الجسيمات**

### (3-1-3) تطبيقات المواد الموصلة في الصناعة

تمثـل المـواد الموصـلة أساسًـا للعديـد مـن التطبيقـات الصـناعية، فهـي تـدخل فـي أنظمـة الطاقـة، والـتحكم، والمعـدات الإلكترونيـة المعقـدة. اسـتخدام المـواد الموصـلة يجعـل الأجهـزة الصـناعية أسـرع وأكثـر موثوقيـة، ويقلـل مـن اسـتهلاك الطاقـة النـاتج عـن مقاومـة الأسـلاك. كمـا تسـمح هـذه المـواد بتصـغير حجـم المعـدات وتحسـين كفاءتهـا، مـا يجعلهـا لا غنى عنها في مجالات مثل[10]:

- أنظمة التحكم الصناعية.

- خطوط إنتاج الطاقة الكهربائية.
- الأجهزة الإلكترونية المتقدمة مثل الروبوتات الصناعية وأنظمة الأتمتة.
- أنظمة النقل والاتصالات التي تتطلب موصلية عالية واستقرارًا حراريًا.

**(3-1-4) التطبيقات العسكرية**

**1- أجهزة الرادار : Radar apparatus**

إن قدرة الموصلات على طرد المجالات المغناطيسية جعلت منها مرشحة لاستعمالها في الرادارات العسكرية فمن المعلوم أن دقة الصور التي يوفرها الرادار تعتمد على قدرته على التحليل غير أن تلك القدرة تتأثر سلباً بالمجالات المغناطيسية المجاورة سواء الأرضية أو غيرها وحتى تتصور المشكلة راقب ما يحصل لجهاز التلفاز عندما يتم تشغيل جهاز كهربائي يعتمد على التيار المتردد، إن الصورة سوف تصاب بالتشوش والسبب هو المجالات المغناطيسية المجاورة والتي أفسدت الجو على حركة الإلكترونات المهبطية التي هي المسؤولة عن الصورة[11].

وهذا هو ما يحصل مع الرادار بالضبط غير أن الأخير أكثر حساسية بشكل كبير وقد تم الاقتراح باستعمال الدروع المغناطيسية لحل هذه المشكلة والدروع المشار إليها عبارة عن اسطوانات ذات مقاسات مختلفة مصنوعة من المواد فائقة التوصيل يوضع بداخلها مصدر الإلكترونات المهبطية فيحميها من المجالات الخارجية ويجعل الصورة الرادارية غاية في الوضوح.

لتصور هذه المشكلة يمكنك مراقبة ما يحدث لجهاز التلفاز عندما يتم تشغيل جهاز كهربائي بالقرب منه . إن الصورة سوف تصاب بالتشويش نتيجة المجالات المغناطيسية المجاورة والتي تؤثر على حركة الإلكترونات المسئولة عن تكوين الصورة وهذا بالفعل ما يحدث مع أجهزة الرادار بالضبط ولكنها تكون أكثر حساسية حيث تتأثر بالمجالات الخارجية وللتغلب علي ذلك تم استعمال الدروع المغناطيسية والتي هي عبارة عن اسطوانات ذات مقاسات مختلفة مصنوعة من المواد الفائقة يوضع بداخلها مصدر الإلكترونات فيحميها من المجالات الخارجية ويجعل صورة الرادار غاية في الوضوح[12].

## 2- جهاز سكويد:

وأيضاً فمن التطبيقات العسكرية استخدام كاشف السكويد للكشف عن أدق الأعطال المتمثلة في الشقوق والشروخ في أجسام الطائرات العسكرية والمدنية على حد سواء. والطريقة تسمى بأسلوب (Non Destructive Testing (NDT)) الكشف غير الضار وللكاشف القدرة التامة للكشف عن عيوب فنية أو شروخ في داخل أجسام الطائرات ولو كانت متوغلة في عمق يزيد كثيراً عن عشرة سنتيمترات[11].

يتركب جهاز سكويد لقياس شدة التمغنط من حلقة من الموصل الفائق مكونة من وصلتين من المواد فائقة التوصيل تسمي وصلات جوزيف صن يتمكن جهاز سكويد من رصد التغير في الفيض المغناطيسي في ضوء الجهد المتردد الناتج أثر التغير في الطور بين أزواج كوبر عبر الوصلتين ويتميز جهاز سكويد بحساسية عالية جدا لقياس الفيض المغناطيسي تصل إلى حوالي $10^{-14}$ تسلا هذه المجالات تعتبر أقل من المجال المغناطيسي للأرض بمقدار $10^{11}$ مرة علي الأقل.

وبالتالي فقد أستطاع الباحثين من استخدام جهاز سكويد في رصد المجالات المغناطيسية الناتجة عن أعضاء جسم الإنسان مثل القلب والمخ والجهاز العصبي والتي كان من الصعب رصدها بالأجهزة المعتادة حيث أنها كانت تتطلب حساسية عالية جدا في القياس نظرا لأن المجال المغناطيسي الناتج عن هذه الأعضاء يكون محدود جدا ويحتاج لدقة وحساسية عالية في القياس على سبيل المثال المجال المغناطيسي للقلب يكون في حدود $10^{-10}$ تسلا وعن المخ يكون في حدود $10^{-13}$ تسلا[13].

## (2-3) تطبيقات المواد شبه الموصلة

تلعب أشباه الموصلات دورًا كبيرًا في الحياة، حيث تُستخدم في مجال واسع من التطبيقات وتخدم العديد من المجالات بسبب خصائصها وسعرها المنخفض، فقد انتشر استخدامها حتى أصبح لا يمكن الاستغناء عنها في كلّ من القطاع الاستهلاكي والصناعي ومن أهم هذه المجالات ما يأتي[14]:

### (3-2-1) تطبيقات المواد شبه الموصلة في الطب

تتخطى تطبيقات أشباه الموصلات المجال التقني لتخدم أيضًا المجال الطبّي حيث تدخل في صناعة العديد من الاختراعات الجديدة التي تستند إلى أساليب الطباعة الليثوغرافية، حيث يتركز استخدام أشباه الموصلات في صناعة بلورات بحجم النانو لتستخدم في الاختبارات التشخيصية حيث يمكن تصنيع هذه البلورات بمواد معدنية عضوية والتي يمكن فيما بعد جعلها قابلة للذوبان في الماء عن طريق تغطيتها بحمض مبلمر معيّن يجعلها قابلة للاقتران مع البوليمرات والجزيئات البيولوجية مثل الأجسام المضادة عبر تكوين روابط ببتيدية، ويشيع استخدام بلورات أشباه الموصلات النانومترية لوضع العلامات على الخلايا والأنسجة، فحجمها النقطي وقابليتها لبعث موجات في ظروف معينة يجعلها الخيار الأمثل لاستخدامها كملصقات في التطبيقات الطبية الحيوية التي تتطلب حساسية عالية ودقة طيفية، ومن الأمثلة على ذلك ما يأتي[12]:

1. القياس المناعي الكمي في المختبر.
2. توسيم عينات الخلايا الثابتة وعينات الأنسجة.
3. تتبّع نشر مستقبلات الغشاء.
4. تتبع حركة التكاثر والبقاء في الأنسجة المزروعة أو أثناء التطور الجنيني.

وقد تم اكتشاف أن هذه العلامات تتسرب في أنواع معينة من الورم على الأنسجة السليمة، مما يعني احتمال قابلية استعمالها كأداة للتشخيص المبكر وكدليل أثناء الجراحة.

### (3-2-2) تطبيقات المواد شبه الموصلة في الإلكترونيات

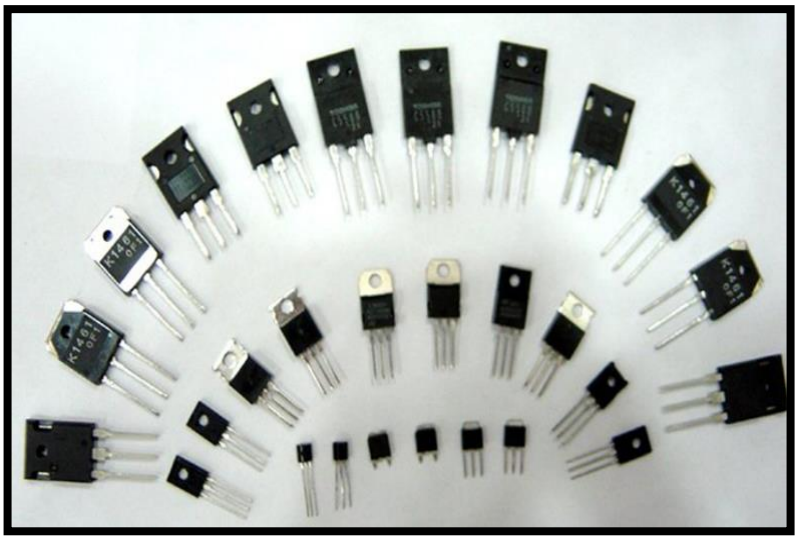
إنّ استخدامات أشباه الموصلات في الإلكترونيات عديدة ومتنوعة، فهي تدخل في صناعة كلّ من: الصمامات الثنائية، والترانزستورات، والدارات المتكاملة، وقد تم استعمال هذه الأجهزة في العديد من التطبيقات نظرًا لتكاملها وموثوقيتها وتكلفتها المنخفضة وكفاءتها في إنتاج الطاقة ومن الممكن التحكم في خصائص أشباه الموصلات عن طريق إضافة كميات

صغيرة من أنواع وتراكيز مختلفة من الشوائب لتعطي آثارًا وفوائد متنوعة، وفيما يـأتي بعـض الأجهزة المحتوية على أشباه الموصلات التي كثيرًا ما يتم استخدامها[13]:

**الصمامات الثنائية:** وهو لا يعمل كالموصلات بل يساعد على سريان التيار في اتجاه واحد فقط، وهو يتكون مـن مشـوب سـالب N ومشـوب موجـب P حيـث أنّ المشـوب السـالب يتكـون مـن الفسفور أو الزرنيخ وأمّا الموجب فيتكون من البورون أو الغاليوم.

**الشكل (3-5) الصمامات الثنائية**

**الترانزستور:** وهو يقوم بتضخيم التيارات الكهربائية الصغيرة ويعمـل كمفتـاح لتشـغيل مصـدر التيار أو إيقافه، وهو يتكون من ثلاثة مشوبات إما أن يكون اثنين منهما موجبين والآخـر سـالب PNP أو يكون اثنين منهما سالبين والآخر موجب NPN[14].



**الشكل (3-6) انواع الترانزستور**

**أجهزة الاستشعار:** وهي تقوم باستشعار التغيرات في الضغط والضوء ودرجات الحرارة، ولكن استخدامها الأكثر شيوعًا هو في استشعار التغيرات الحاصلة في المقاومات وتدخل أشباه الموصلات أيضًا في صناعة أجهزة أخرى كأجهزة الطاقة وبواعث الضوء وأجهزة الاستشعار

البصرية وبعض أنواع الليزر، ومن المتوقع أن تصبح أشباه الموصلات العناصر الأساسية في غالبية الصناعات والتي تشمل الأنظمة الإلكترونية التي تتعامل مع الاتصالات والحوسبة ومعالجة الإشارات وأنظمة التحكم[13].

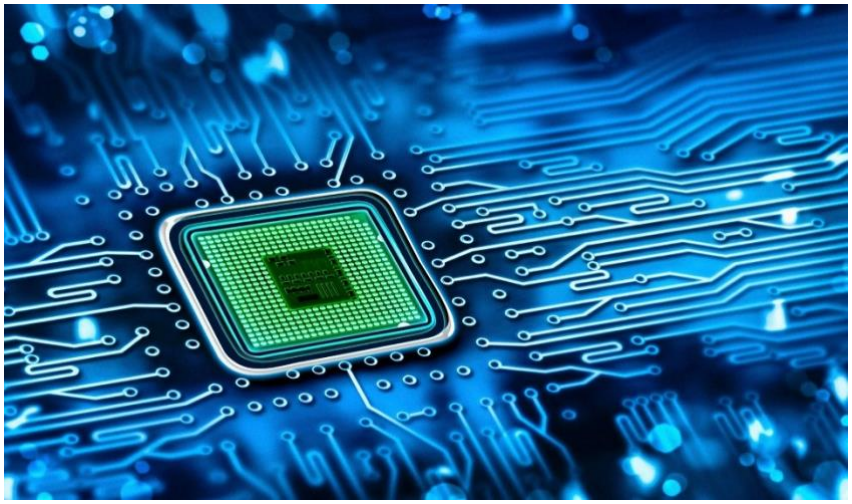
**الشكل (3-7) أجهزة الاستشعار**

### (3-2-3) تطبيقات المواد شبه الموصلة في الصناعة

تدخل أشباه الموصلات في صناعة العديد من الأجهزة الالكترونية كالدوائر الكهربائية التي لا يكاد يخلو نظام منها، فاستخدام أشباه الموصلات جعل الأجهزة الالكترونية أسرع وأصغر حجمًا فلا يمكن الاستغناء عنها في الأنظمة الالكترونية وخدمة الاتصالات والمعالجات وتطبيقات الحوسبة ومن أشهر تطبيقات أشباه الموصلات في المجال التقني ما يأتي[12]:

1. البواعث الضوئية كليزر الحالة الصلبة.
2. أساس تصنيع العديد من الأجهزة كالراديو والكمبيوترات والهواتف النقّالة.
3. تصنيع الأجزاء الكهربائية التي تُستعمل في الأجهزة الالكترونية كالدايودات والترانزستورات.
4. تدخل في العديد من الاختراعات الحديثة كالطابعات ثلاثية الابعاد، وفي إضاءات الليد LED.

5. تطوير أشباه موصلات بحجم النانو ليتم استخدامها في الخلايا الشمسية والتصوير الجزيئي والخلوي وأجهزة الكشف الحساسة.
6. توفير البنية الأساسية لتطوير أنظمة نانو معقدة مثل الشبكات الفائقة والعديد من عوامل الوسائط للتصوير الجزيئي والعلاج الموجّه



**الشكل (3-8) اشباه الموصلات في الدوائر الكهربائية**

## (3-3) مميزات أجهزة أشباه الموصلات

1. نظراً لأنّ أجهزة أشباه الموصلات لا تحتوي على أسلاك كهربائية، فلا حاجة إلى طاقة لتسخينها للتسبب في إنبعاث الإلكترونات.
2. نظراً لعدم الحاجة إلى تسخين، يتم ضبط أجهزة أشباه الموصلات على التشغيل بمجرد تشغيل الدائرة.
3. أثناء التشغيل، لا تصدر أجهزة أشباه الموصلات أي ضوضاء وطنين.
4. تتطلب أجهزة أشباه الموصلات تشغيلاً منخفض الجهد مقارنة بالأنابيب المفرغة.
5. نظراً لأحجامها الصغيرة، فإنّ الدوائر التي تتضمن أجهزة أشباه الموصلات تكون مضغوطة للغاية.
6. أجهزة أشباه الموصلات هي أجهزة مقاومة للصدمات.
7. أجهزة أشباه الموصلات أرخص مقارنة بالأنابيب المفرغة.
8. تتمتع أجهزة أشباه الموصلات بعمر غير محدود تقريباً.
9. نظراً لعدم وجود أنابيب مفرغة في أجهزة أشباه الموصلات، فلا توجد مشكلة في تدهور أو خراب هذه الأنابيب[13].

# المصادر والمراجع

[1] ديفيد هاليداي، روبرت ريزنك، جيرل ووكر، أساسيات الفيزياء، ترجمة: جعفر محمد وآخرون، دار ماكغرو-هيل، القاهرة، طبعة حديثة.

[2] تشارلز كيتل، فيزياء الحالة الصلبة، ترجمة عربية، دار النشر الجامعية، القاهرة.

[3] روبرت بويلستاد، الإلكترونيات العملية، ترجمة عربية، دار المريخ للنشر، الرياض.

[4] ريموند سيرواي، الفيزياء العامة: الكهرباء والمغناطيسية، ترجمة عربية، دار الكتب العلمية، بيروت.

[5] ألبرت مالفينو، مبادئ الإلكترونيات، ترجمة عربية، دار المريخ للنشر، الرياض.

[6] فاروق كامل، فيزياء المواد الصلبة وأشباه الموصلات، ديوان المطبوعات الجامعية، الجزائر، 1992.

[7] دراسة الخواص الكهربائية والضوئية لبعض اشباه الموصلات، الطالب ذو الفقار كاظم هلال، بحث مقدم الى جامعة القادسية، كلية العلوم، 2019.

[8] سمنار بعنوان اشباه الموصلات، مقدم من الطالب سعد الدين عثمان عادل، بجامعة الموصل، كلية التربية، 2015.

[9] سعد الدين الصديق ـ عثمان عادل ـ علاء الدين احمد ـ فتح الرحمن مأمون ـ محمد المصطفي ـ مصعب عبد الرحمن الخرطوم ـ السودان ـ 2014.

[10] كتاب الفيزياء العامة – الكهرباء والمغناطيسية، _تأليف_ أ.د/ يسري مصطفى ,,د/ الحسيني الطاهر (الجزء الأول) 2017.

[11] اسامة عمر مسعود، اشباه الموصلات، مكتبة اسامة العشي، الطبعة الثانية، ليبيا، 2004.

[12] د سمير عطا مكي، محاضرات اشباه الموصلات، جامعة بغداد، كلية التربية للعلوم الصرفة (ابن الهيثم)، 2015.

[13] شريف احمد خيري، حسن حسين حسن، اشباه الموصلات، جامعة القاهرة، مصر، 2008.