جامعة الانبار

كلية التربية للعلوم الصرفة

قسم الفيزياء

محاضرات

خواص مادة

البروفيسور الدكتور

وليد بديوي

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الفصل السابع

الخواص الكهربائية للمواد

The Electrical Properties of Materials

المقدمة

تظهر المواد مدى واسعاً من قيم قابلتها على التوصيل الكهربائي. تتفوق الموصلات الجيدة (كالفضة والنحاس والالمنيوم) على المواد العازلة الجيدة في قيم توصيلتها الكهربائية بمقدار 10^{20} على الأقل.

يتناول هذا الفصل أهم اساسيات الخواص الكهربائية للمواد المختلفة.

7 – 1 الموصلية الكهربائية

تعرف الموصلية الكهربائية على انها قابلية المادة لتوصيل التيار الكهربائي. وينتج توصيل التيار الكهربائي عن حركة الالكترونات أو الأيونات أوكليها داخل المادة. وبصورة عامة تكون المواد المعدنية الصلبة (العناصر) جيدة التوصيل الكهربائي.

تقسم المواد اعتماداً على قابليتها لتوصيل التيار الكهربائي الى ثلاثة اقسام رئيسة :

7 – 1 – 1 الموصلات The Conductors

من أهم الموصلات المعادن (الفلزات) والتي تكون ذات مقاومة نوعية كهربائية منخفضة (موصلتيها الكهربائية عالية) تتراوح تقريباً من 10^{-8} الى 10^{-6} أوم – متر في درجة حرارة الغرفة، ومن امثلة الموصلات الجيدة الفضة والنحاس والألمنيوم والحديد.

7 – 1 – 2 اشباه الموصلات The Semiconductors

تكون قيمة المقاومة النوعية الكهربائية لها متوسطة بين الموصلات والعوازل، اذ تتراوح بين 10^{-4} الى 10^{6} اوم – متر في درجة حرارة الغرفة. ومن امثلتها معدني السليكون والجرمانيوم.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

تتميز المواد العازلة كهربائياً بمقاومتها النوعية الكهربائية العالية والتي تتراوح بين 10^7 الى 10^{18} اوم– متر في درجة حرارة الغرفة ، ومن امثلة العوازل الخشب والزجاج والمطاط والنايلون .

عند وضع كمية من الشحنة الكهربائية على طرف من موصل فإنها ستنتشر بسرعة على سطح الموصل الى ان يحصل التوزيع المتعادل للشحنة الكهربائية ، بينما عند وضع نفس الشحنة على جهة من العازل فإنها لن تنتشر وتبقى في مكانها . ان حركة الشحنة داخل الموصلات ناتجة عن حركة الالكترونات . تكون بعض الالكترونات حرة غير مرتبطة بقوة الى اية ذرة أو جزيئة ، على الرغم من كونها مرتبطة بقوة بالمادة ككل . ان الالكترونات الواقعة في المدارات الداخلية تكون مرتبطة بقوة الى نواة الذرة ، بينما تكون الالكترونات الخارجية مرتبطة بقوة ضعيفة الى النواة ، ان هذه الالكترونات تكوّن الالكترونات الحرة للمادة . تتحرك الالكترونات الحرة بحرية داخل المادة ككل وتعاني تصادمات متكررة .

ان الالكترونات الحرة تشكل الغاز الالكتروني الحر (free electron gas) . ان هذه الالكترونات تكون محفوظة داخل المادة ، كما تحفظ جزيئات الغاز داخل الوعاء المغلق . ان عملية شحن الموصل تتضمن اضافة أو سحب الكترونات منها ، اذ ستكتسب المادة صافي شحنة موجبة اذا تم سحب الكترونات منها ، وستكون صافي الشحنة سالبة في حالة اضافة الالكترونات اليها . ان الشحنة الموجبة للمادة تعني نقصاً في عدد الكتروناتها وعلى العكس من ذلك تعني الشحنة السالبة للمادة زيادة في عدد الكتروناتها . ومن التصادمات التي تعانيها الالكترونات الحرة أو الأيونات الموجبة اثناء حركتها تنشأ المقاومة الكهربائية لسريان التيار الكهربائي ، وينشأ عنها حرارة تتناسب طردياً مع مربع قيمة التيار الكهربائي وتعرف المقاومة الكهربائية على انها خاصية المادة التي تعاكس (أو تعيق) سريان التيار الكهربائي (اي الالكترونات) خلالها .

7—2 المقاومة الكهربائية Electrical Resistivity (σ)

عندما يسلط مجال كهربائي مؤثر على المادة الصلبة ، فإنه يسبب سريان حاملات الشحنة الكهربائية (الالكترونات) ، وتكون الموصلية الكهربائية نتيجة لهذا التأثير ، يمكن كتابة العلاقة بين التوصيلية الكهربائية (σ) والمجال الكهربائي المؤثر E وكثافة التيار الكهربائي J بالعلاقة الآتية :

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

$$J = \sigma E \quad \ldots\ldots (7.1)$$

تعبّر قيمة كثافة التيار الكهربائي J عن عدد الشحنات الكهربائية (أو حاملات الشحنة) التي تمر خلال وحدة المساحة في وحدة الزمن ، اي ان

$$J = n e \upsilon_d \quad \ldots\ldots (7.2)$$

حيث ان (n) تمثل عدد الالكترونات (حاملات الشحنة) لوحدة الحجوم و υ_d متوسط سرعة الانجراف التي سببها تأثير المجال الكهربائي . من مقارنة المعادلتين (7.1) و (7.2) نحصل على :

$$\sigma E = n e \upsilon_d$$

$$\sigma = \frac{n e \upsilon_d}{E} \quad \ldots\ldots (7.3)$$

ان نسبة السرعة المتوسطة للانجراف الى المجال الكهربائي المسلط $(\frac{\upsilon_d}{E})$ يعرف بحركية الشحنة الكهربائية (μ) ، اي ان

$$\mu = \frac{\upsilon_d}{E} \quad \ldots\ldots (7.4)$$

وبالتعويض عن μ في المعادلة (7.3) نحصل على المعادلة الآتية

$$\sigma = n e \mu \quad \ldots\ldots (7.5)$$

ان مقلوب الموصلية الكهربائية يعرف بالمقاومة النوعية الكهربائية (electrical resistivity) ويرمز لها عادة بـ (ρ) . ان حركة الالكترونات داخل المادة لا يتم من دون حدوث استطارة أو تشتت نتيجة لتصادمها مع تذبذب الشبيكة الحراري او مع العيوب المتخللة في الشبيكة . ان اصطدام الالكترون يؤدي الى ارتداده باتجاه عشوائي ، ثم يبدأ بالتسارع مرة اخرى لحين حدوث الاصطدام الثاني . يسمى متوسط قيمة الزمن بين التصادمات المذكورة بزمن الاسترخاء (Relaxation time) ويرمز لها عادة بـ (τ) ان حاصل ضرب زمن الاسترخاء τ مع متوسط سرعة الانجراف (υ_d) يعرف بمتوسط المسار الحر للالكترون λ ، اي ان

$$\lambda = \upsilon_d \tau \quad \ldots\ldots (7.6)$$

يمكن تلخيص العوامل المسببة للمقاومة الكهربائية بالتصادمات التي تحدث بين الالكترونات الحرة وكل مما يأتي :

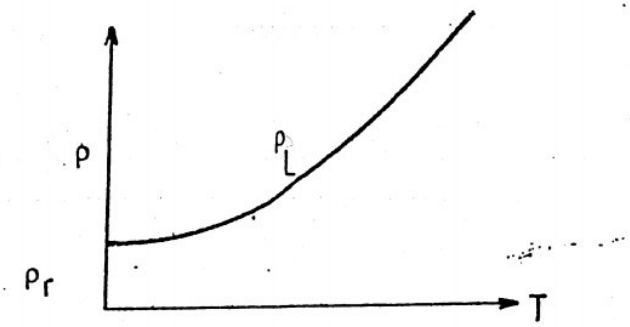
الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

1 – التذبذب الحراري للذرات أو الجزيئات ويزداد بزيادة درجة الحرارة ويقل بانخفاضها ، ويعد العامل الرئيس للمقاومة الكهربائية في درجة حرارة الغرفة .

2– العيوب والشوائب داخل المادة ويظهر تأثيرها بصورة واضحة في درجات الحرارة المنخفضة جداً .

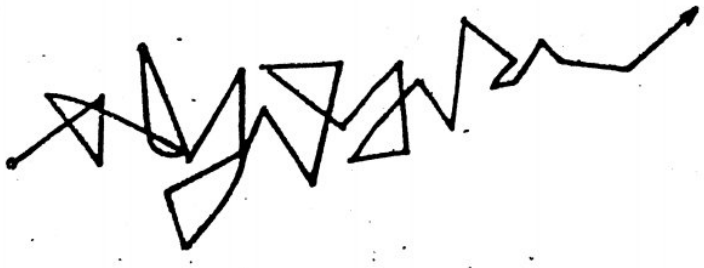
فاذا رمزنا للعامل الاول ρ_L والعامل الثاني ρ_r فان المقاومة النوعية الكلية للمعادن تكون مساوية الى ρ اي ان

$$\rho = \rho_r + \rho_L \quad \ldots\ldots\ldots (7.7)$$



الشكل (7.1) يوضح علاقة المقاومة الكهربائية بدرجة الحرارة للمعادن (الفلزات) العادية

تحتوي الموصلات على عدد كبير جداً من الالكترونات الحرة . فعلى سبيل المثال يحتوي السنتميتر المكعب الواحد على اكثر من (10^{22}) الكترون . تنتشر الالكترونات الحرة خلال جميع حجم المادة . ويبقى دائماً في الموصل المتعادل كهربائياً تساوي عدد الشحنات السالبة اي الالكترونات الحرة مع الشحنة الموجبة لنوى الذرات في الشبكية . تكون حركة الالكترنات عشوائية وتتبع مسارات ذات اتجاهات مختلفة كما في الشكل (7.2) .



الشكل (7.2) : الحركة العشوائية للالكترون داخل المادة.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

يتحرك الغاز الالكتروني بسرعة بطيئة خلال المادة الموصلة وبمعدل سرعة يقارب سنتميتر واحد لكل ثانية (1cm/sec) . ان هذه السرعة تكون بطيئة جداً عند مقارنتها بالسرعة العشوائية الحرارية للالكترون خلال المادة الموصلة والتي تقارب المليون متر للثانية الواحدة (10^6m/sec).تمتلك الالكترونات الحرة سرعة عالية نتيجة طاقة الحرارية والتي تكون بشكل عشوائي وتعاني خلالها عدداً كبيراً من التصادمات والتي تقدر بـ 10^{14} تصادم في الثانية الواحدة. ان السرعة التي يكتسبها الالكترون نتيجة تأثير المجال الكهربائي المسلط تكون صغيرة جداً عند مقارنتها بالسرعة العشوائية الحرارية ، ولذلك فان معدل التصادمات يكاد يكون غير معتمداً على المجال الكهربائي (تأثير ضعيف جداً) . ومن هذه الحقائق نجد ان زمن الاسترخاء يكون ثابتاً يعتمد فقط على طبيعة المادة .

ترتبط مقاومة السلك المعدني ذي المقطع العرضي المنتظم (A) مع طوله (L) بالعلاقة الآتية :

$$R \propto \frac{L}{A}$$

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad \ldots\ldots\ldots (7.8)$$

ρ – تمثل المقاومة النوعية الكهربائية، تعتمد المقاومة النوعية على درجة الحرارة ، وفي المعادن تزداد المقاومة النوعية بصورة بطيئة مع درجة الحرارة. ويعزى ذلك الى زيادة معدل التصادمات بين الالكترونات والذرات (الشبيكة)نتيجة لزيادة الأهتزازات وذبذبات الشبيكة نتيجة لارتفاع درجة الحرارة. يبين الجدول (7.1) قيم المقاومة النوعية لبعض المواد المعروفة عند درجة حرارة الغرفة .

ان كل تصادم يبطئ من سرعة الالكترون ، أو يجعل تلك السرعة صفراً أو يعكسها باتجاه آخر. ونتيجة لهذا العدد الكبير من التصادمات التي تبعثر سرعة الالكترون ، فان الالكترون لن يكتسب على الأطلاق سرعة كبيرة نتيجة لتأثير المجال الكهربائي الذي يحاول تعجيل الالكترونات الحرة. ان التصادمات المذكورة تبدد الطاقة الحركية للالكترون ، والتي تم اكتسابها نتيجة لتأثير المجال الكهربائي عليها. ان الطاقة الحركية المبددة ستظهر على شكل حرارة ترفع من درجة حرارة المادة.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الجدول (7.1) : قيم المقاومة النوعية لبعض المواد المعروفة عند درجة حرارة الغرفة

المادة	المقاومة النوعية $\rho\ (\Omega.m) \times 10^{-8}$
الفضة	1.6
النحاس	1.7
الالمنيوم	2.8
النيكل	7.8
الحديد	10
الصلب	11
البراس	7
الكونستنان	~50
السليكون	2.6×10^{3}
الجرمانيوم	0.42×10^{3}
الكاربون (كرافيت)	3.5×10^{-5}
البولي اثيلين	20×10^{12}
الزجاج	$\sim 1 \times 10^{12}$
المطاط	10×10^{12}

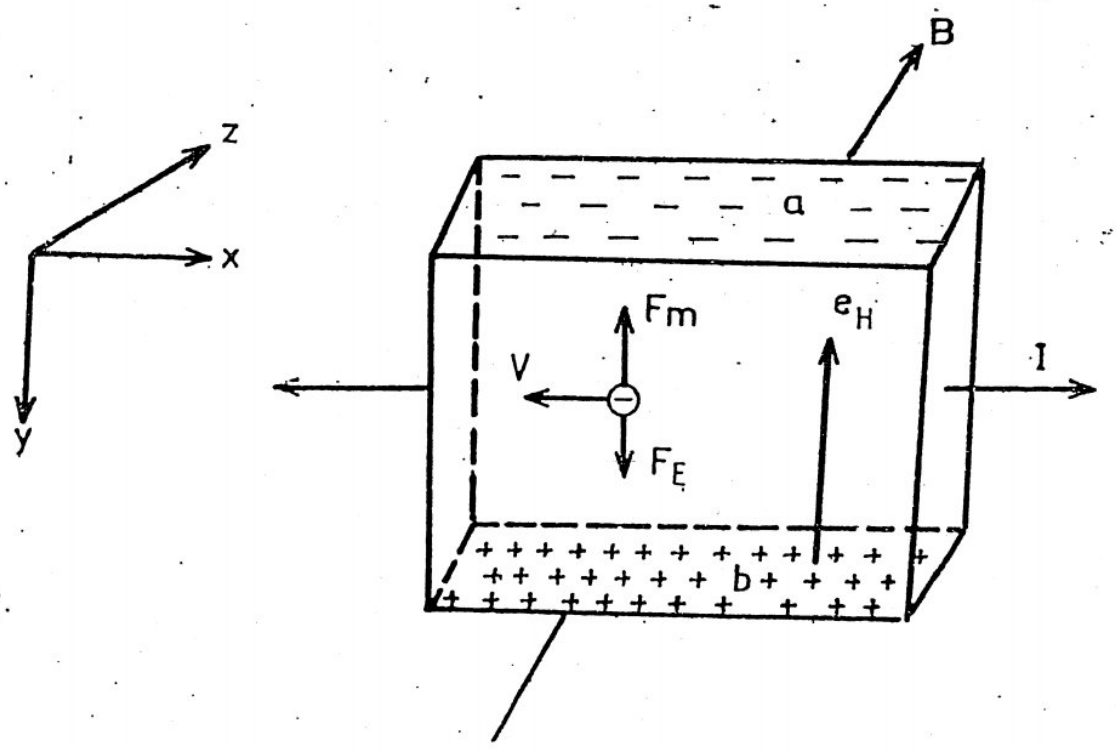
ان المحاليل السائلة الحاوية على أيونات تكون موصلات جيدة أيضاً ، مثال ذلك محلول ملح الطعام في الماء الذي يحتوي على ايونات الصوديوم الموجبة Na^+ وايونات الكلور السالبة Cl^- . ان حركة الشحنة خلال المحلول تتم عبر حركة الايونات الموجبة والسالبة في المحلول . يعد الماء النقي (المقطر) موصلاً رديئاً للتيار الكهربائي ، بينما يكون الماء الاعتيادي موصلاً جيداً للتيار الكهربائي بسبب احتوائه على بعض الايونات السالبة والموجبة لمواد شائبة ذائبة في الماء .

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

تعد الغازات العادية عوازل جيدة للتيار الكهربائي ، علىٰ عكس الغازات المتأينة التي تكون موصلاً جيدة للتيار الكهربائي . مثال ذلك الهواء الجاف الذي يكون عازلاً جيداً ، بينما يكون الهواء المتأين في خط البرق موصلاً جيداً للكهربائية ، وذلك لاحتواء الهواء المتأين علىٰ خليط من الأيونات الموجبة والالكترونات الحرة . يطلق علىٰ الغاز المتأين البلازما Plasma التي سنتطرق اليها في الفصل القادم .

7–3 ظاهرة هول Hall Effect

اذا مر تيار كهربائي مستمر خلال مادة موصلة أو شبه موصلة ، موضوعة في مجال مغناطيسي خارجي وكانت خطوط الفيض المغناطيسي متعامدة مع اتجاه سريان التيار الكهربائي ، فان فرق جهد سيتولد بين جهتي المادة وباتجاه عمودي على كل من التيار الكهربائي وخطوط الفيض المغناطيسي . أي ان كل من اتجاه التيار واتجاه المجال والفولتية المتولدة تكون متعامدة مع بعضها البعض ، انظر الشكل (7.3) .



الشكل (7.3): يوضح ظاهرة هول.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

وتسمىٰ القوة الدافعة الكهربائية المتولدة بفولتية هول Hall Voltage, V_H. ان مقدار فولتية هول يتناسب طردياً مع كل من التيار الكهربائي وشدة المجال المغناطيسي. يمكن التعبير عن فولتية هول V_H بدلالة التيار الكهربائي I والمجال المغناطيسي B وسمك المادة d كما في المعادلة الآتية :

$$V_H = R_H \frac{I\,B}{d} \qquad \ldots\ldots\ldots (7.9)$$

اذ ان R_H تمثل مكافىء (أو ثابت) هول. يعتمد ثابت هول علىٰ نوع المادة المستخدمة أو عدد ونوع حاملات الشحنة. هناك نوعان لحاملات الشحنة وهما الالكترونات أو الفجوات الموجبة الشحنة. يمكن التعبير عن R_H كما في المعادلة الآتية :

$$R_H = \frac{1}{n_e} \qquad \ldots\ldots\ldots (7.10)$$

ان اشارة R_H يمكن ان تكون سالبة أو موجبة اعتماداً على نوع حاملات الشحنة. فاذا كانت هذه الحاملات الكترونات فان اشارة R_H تكون سالبة. اما اذا كانت الاشارة موجبة فان حاملات الشحنة ستكون الفجوات الموجبة الشحنة.

ومن المعادلتين (7.9) و (7.10) نجد ان R_H ومن ثم V_H يتناسبان عكسياً مع n والتي تكون قليلة في اشباه الموصلات عنها في الموصلات وعليه فان قيمة فولتية هول تكون اكثر بكثير في حالة اشباه الموصلات منها في حالة الموصلات واذا بقيت قيمة التيار الكهربائي ثابتة ، فان فولتية هول ستكون مقياساً لشدة المجال المغناطيسي. ولخاصية هول تطبيقات عملية عديدة.

يمكن الحصول على حركية هول لحاملات الشحنة μ_H من حاصل ضرب قيمة التوصيلية الكهربائية σ بمكافىء هول R_H ، اي ان

$$\mu_H = - \sigma R_H$$

وتستخدم قيمة مكافىء هول في حساب قيمة عدد حاملات الشحنة لوحدة الحجم. والجدول (7.2) يبين قيم مكافىء هول والتوصيلية الكهربائية وحركية هول لعدد من المواد المعروفة.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner