الباب العاشر

الخواص الكهربائية للجوامد Electric Properties of Solids

اذا اردنا ترتيب المواد الصلبة وتصنيفها من حيث معامل توصيلها الكهربائى σ فاننا نجد انواعا ثلاثة : ــ

١ ــ مواد جيدة التوصيل الكهربائى وهى المواد المعدنية مثل النحاس ومعامل توصيله

$$\sigma = 10^5 \quad ohm^{-1}\ cm^{-1}$$

٢ ــ اشباه موصلات مثل كبريتيد الرصاص Pb S ومعامل توصـــيله

$$\sigma = 1 \quad ohm^{-1}\ cm^{-1}$$

٣ ــ مواد رديئة التوصيل او عازله كهربائيا مثل الابونيت ومعامل توصـــيله

$$\sigma = 10^{-10} \quad ohm^{-1}\ cm^{-1}$$

من قيم معاملات التوصيل السابقة يتضح مقدار التغير الضخم فى الصـــفات الكهربائية للمواد الصلبة المختلفة .

يعتمد التوصيل الكهربائى على وجود حاملات شحنة حره free charge carriers

يمكن لها أن تتحرك تحت تأثير مجال كهربائى free charge carriers ولتفسير الخواص الكهربائية للجوامد نبدأ أو بالحالة البسيطة للعناصر احادية التكافؤ .

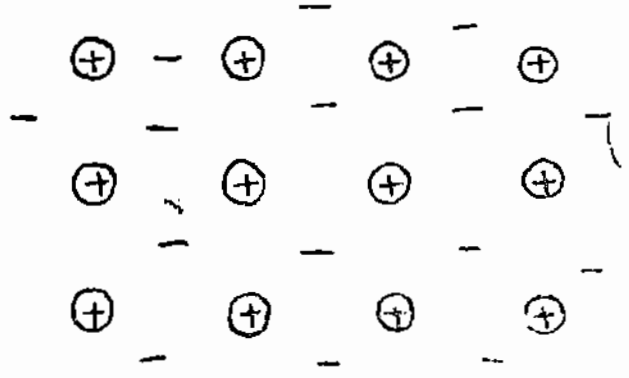
النظرية الالكترونية فى الفلزات :

تطورت النظرية الالكترونية للفلزات ومرت بثلاثة مراحل : ـ

ا ـ النظرية الكلاسيكية للغاز الالكترونى الحر وقد وضعها درودى ولونتز عام ١٩٠٠ Drude & Lorentz وقد افترضا أن الفلزات تحتوى الكترونات حرة تخضع فى حركتها للقوانين الكلاسيكية للميكانيكا .

ب ـ النظرية الكمية للالكترون الحر وقد وضعها سمر فيلد Sommerfeld عام ١٩٢٨ حيث فرض وجوب خضوع الالكترونات الحره فى الفلزات للقوانين الكمية quantum laws

جـ ـ نظرية المناطق : وبدأت بـ بلوخ Bloch عام ١٩٢٨ حيث اعتبرت حركة الالكترونات فى مجال جهد دورى periodic potential field ناشىء عن الشبيكة .



الغاز الالكترونى يتخلل الايونات فى الشبيكه :

١ ــ النظرية الكلاسيكية للالكترون الحر

صور دوردى لورنتز تركيب أى فلز على أنه رصه من الايونات الموجبة يتخللها غاز من الالكترونات الحره تتوزع طاقاتها حسب قانون التوزيع لماكسويل . وقد افترضنا أن الالكترونات بالرغم من شحناتها السالبة تتصرف كجزئيات متعادلة لغاز تام . كما أهملا وجود المجال الدورى الذى تتحرك فيه الالكترونات والذى يرجع الى دورية الشبيكة .

وبالرغم من التبسيط الشديد لهذه الفروض الا أن النظرية حققت نجاحا فيما يأتى : ــ

١ ــ **تحقيق قانون اوم** المعروف واثباته على أساس رياضى

٢ ــ اثبات صحة العلاقة العملية المعروفة **بقانون فيدمان وفرانز** والتى تنص على أن النسبة بين التوصيل الكهربائى الى معامل التوصيل الحرارى واحدة لكل الفلزات عند نفس درجة الحرارة

٣ ــ **تفسير سبب الاعتام واللمعه فى الفلزات** Luster & opacity

يستطيع الالكترون الحرا لتذبذب فى مجال كهرومغناطيسى (ضوء) ساقط عليه . تمتص **الالكترونات الطاقة الفوتونية لجميع أطوال الامواج الســـاقطة ولذلك** يظهر الفلز **معتما** وعندما تعود تلك الالكترونات على السطح الى مستويات طاقاتها المعتادة **تنبعث نفس هذه الأمواج ثانية لتعطى لمعة الفلز .**

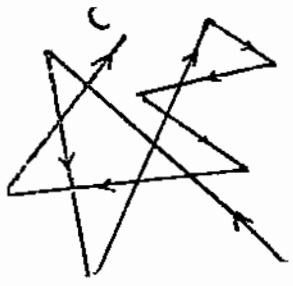
ظاهرة تولمان Tolman effect

تحقق تولمان عمليا من أن الالكترونات فى الفلز تكون حرة الحركة . فأحضر سلكا معدنيا واحدث فيه عجلة تسارع فجائية فوجد هناك تيارا كهربائيا يمر فيه . وتفسير ذلك أن الالكترونات الحرة قد القيت **بفعل القصور** الذاتى الى ناحية من السلك وهذا يعنى حركة الشحنات داخله أى مرور تيار كهربائى . وقد حسبت e/m للجسيمات التى تحدث ظاهرة تولمان نوجد انها تطابق e/m للالكترونات .

التوصـــيل الكهربائى وقانون أوم :

اعتبر تأثير مجال كهربائى x على غاز من الالكترونات الحره ، كثافتها n لوحدة الحجوم .

تتحرك الالكترونات حركة عشوائية . وفى حالة عدم وجود المجال تكون محصلة السرعة الازاحية drift velocity تساوى صفرا حيث أن عدد الالكترونات التى تتحرك فى اتجاه ما تساوى تماما العددالذى تحرك فى عكس هذا الاتجاه .



شكل ١٠ — ٢

زمن الارخاء relaxation time τ يعرف بأنه متوسط الزمن الذى يأخذه الالكترون ليقطع مسار حر اى λ اذا كانت C هى متوســـط السرعة الجزيئية للالكترون تكون :

$$\tau = \frac{\lambda}{C}$$

وتتوقف قيمه زمن الارخاء على عوامل التشتيت لالكترونات التوصيل فى الموصـــــل .

يؤثر وجود المجال الكهربائى على كل الكترون بقوة F تسببازاحته عن موضعه ولتكن السرعة الازاحية v drift velocity وهى فى عكس اتجاه المجال .

فى حالة الاستقرار ، اى عند استمرار التاثير بالمجال الكهربائى ،

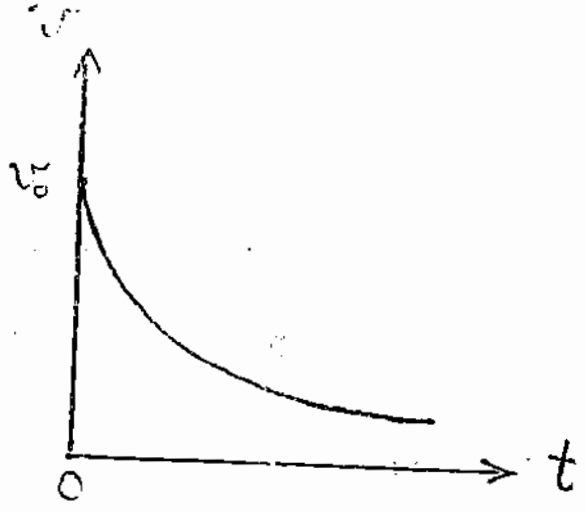
نفرض أن السرعة الازاحية هى v ، تكـون عجلة تسـارع الالكترون عندئذ تسـاوى صفرا أى أن

$$\frac{dv}{dt} = 0$$

معادلة الحركة للالكترون عند بدء التاثير عليه بمجال هى

$$m\left(\frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau}\right) = F$$

عند ازالة المجال تتناقص السرعة الازاحية v للالكترونات حتى تصل للصفر وتخضع حركة الالكترون الازاحية للمعادلة :



$$\frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = 0$$

وحل هذه المعادلة يعطى سرعة الالكترون ازاحيا $V(t)$ بعد زمن t من لحظة ازالة المجال الكهربائى

$$\therefore v(t) = v_0 \exp - t/\tau$$

وعندما يكون تأثير المجال متصلا فان معادلة الحركة المنتظمة للالكترون اثناء انتقاله ازاحيا فى المجال هى

$$m \frac{v}{\tau} = F$$

ولكن القوة المؤثرة على الالكترون تساوى : $F = X e$

$$\therefore v = \frac{X e \tau}{m}$$

تعطى هذه المعادلة السرعة الازاحية المنتظمة للالكترون فى المجال X

تعريف : الحركية الازاحية The Drift mobiility μD

تعرف الحركية الازاحية μD بانها السرعة الازاحية المنتظمة لكل وحدة مجال كهربائى ، اى انها :

$$\mu D = \frac{v}{X} = \frac{e\tau}{m}$$

وتعرف **الكثافة التيارية** electric current density J بانها الشحنة الكهربائية التى تمر عموديا فى وحدة المساحات فى وحدة الزمن . اى ان

$$J = n e v$$

حيث n عدد الالكترونات لوحدة الحجوم ، e شحنة الالكترون وفى حالة الاستقرار اى عند ثبوت التيار يكون

$$J = \frac{n e^2 \tau}{m} \quad X$$

وتظهر هذه المعادلة تناسبا بسيطا بين شدة التيار J وشدة المجال الكهربائى $\times$ وهو ما ينص عليه قانون اوم المعروف .

من المعادلة السابقة يكون معامل التوصيل الكهربائى σ هو

$$\sigma = \frac{J}{\times} = \frac{n e^2 \tau}{m} = \frac{n e^2 \lambda}{m c}$$

وبتطبيق نظرية الحركة للغازات التامة على الغاز الالكترونى الحر فان طاقة الالكترون E هى

$$E = \tfrac{1}{2} m c^2 = 3/2 \; k T$$

حيث C هى السرعة الجزيئية ، للالكترونات . وقد اعتبرنا ان لكل درجة من درجات الحرية للالكترون طاقة تساوى $\tfrac{1}{2} k T$ كما ينص عليها قانون تساوى توزيع الطاقة .

يصبح معامل التوصيل

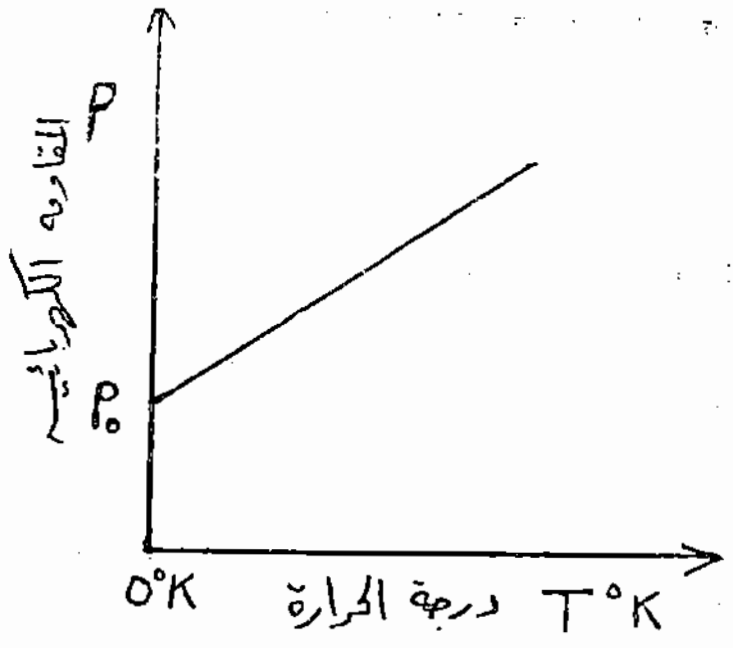
$$\sigma = \frac{\lambda n e^2 C}{3 k T}$$

وتعطى هذه المعادلة تغير التوصيل الكهربائى بدرجة الحرارة T فتزداد المقاومة الالكترونية بزيادة درجة الحرارة .

وعلى حسب النظرية السابقة فاننا اذا اختبرنا شبيكة مثالية تامة يكون توصيلها الكهربائى عند درجة الصفر المطلق لانهائيا ($\sigma \alpha 1/T$) ومقاومتها تساوى صفرا . ولكن التجربة تثبت انه عند درجة الصفر المطلق لا تؤول مقاومة أى بلورة الى الصفر ولكن يكون لها قيمة محددة Po ويعود وجود هذه المقاومة عند الصفر المطلق الى وجود شوائب وأخطاء شبيكة فى الترتيب البلورى مما يسبب تشتيت بعض الكترونات التوصيل وهذا يؤدى الى ظهور هذه المقاومة

التوصـــيل الحرارى للغاز الالكترونى الحر

يعتمد التوصيل الحرارى فى الفلزات على انتقال طاقة الحركة للالكترونات



الحرة . فاذا اعتبرنا قطعه من فلز ذات سطحين متوازيين ورفعت درجة حرارة احد الاوجه بالنسبة للاخر تنتقل الطاقة بواسطة الالكترونات وينتج عن ذلك ظاهرة التوصيل الحرارى -

باعتبار أن الغاز الألكترونى يخضع لقوانين الغازات التامة وبتطبيق قانون التوصيل الحرارى للغازات نحصل على

$$K = \frac{1}{2} n c \lambda k$$

حيث n هو عدد الالكترونات فى وحدة الحجوم من الغاز الالكترونى
C سرعة الضوء ، λ متوسط طول المسار الحر للالكترون

قانون ڤيدمان وفرانز Wiedemann — Franz law

اكتشف ڤيدمان وفرانز عمليا أن النسبة بين معامل التوصيل الكهربائى الى معامل التوصيل الحرارى ثابته لجميع الفلزات ثم جاء بعدهما لورنتز Lorentz فحدد قانون ڤيدمان وفرانز ليشمل درجة الحرارة ايضا .

اذ وجد أن النسبة $\frac{k}{\sigma}$ تتناسب طرديا مع درجة الحرارة المطلقة .

ويمكن الوصول الى هذه النتائج العملية نظريا باستخدام نظرية الالكترون الحر . مما سبق : —

$$\sigma = \frac{\lambda n e^2 c}{3 k T}$$

&

$$K = \frac{1}{2} \lambda n c k$$

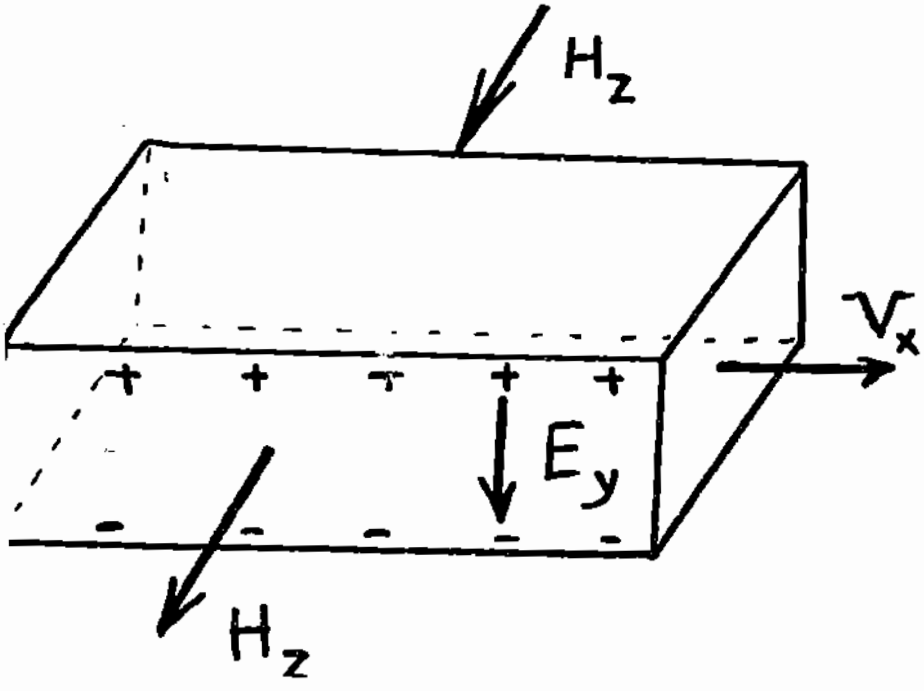
بقسمة المعادلتين نحصل على

$$\frac{K}{\sigma} = 3/2 \left(\frac{k}{e}\right)^2 T$$

عندما تكون درجة الحرارة T ثابتة تكون النسبة K/σ أيضا ثابتة وهذا هو قانون فيدمان وفرانز • كما أن رفع درجة الحراراة يسبب زيادة K/σ زيادة طردية وهذا هو تعديل لورنتز •

ظاهرة هول : The Hall effect

اذا وضع موصل كهربائى فى مجال مغناطيسى Hz وكان يمر فيه



تيار كهربائى Jx بحيث يكون التيار والمجال متعامدين ، يتولد جهد كهربائى عمودى على كل من اتجاه التيار والمجال .

وتفسير ذلك هو أن التيار الكهربائى عبارة عن تيار من الالكترونات تتحرك بسرعة ازاحية Vx ويسبب وجود المجال العمودى انحراف هذه الالكترونات فتتراكم على الوجه الاسفل للعينة مما يسبب تولد مجال كهربائى تتزايد شدته حتى يعادل تأثير المجال المغناطيسى الحارف للالكترونات ويسمى الفرق فى الجهد على سطحى الشريحه المتقابلين بجهد هول Hall voltage

وللتعبير عن ظاهرة هول رياضيا نفرض أن التيار المار فى شريحة الفلز هو Jx فى اتجاه X وان المجال المغناطيسى المؤثر Hz فى اتجاه z

اذا كانت e هى شحنة الالكترون بالكولوم (وحدات e.m.u) فان القوة $\overrightarrow{F}$ التى تؤثر على الالكترونات تعطى بالمعادلة

$$\vec{F} = e\vec{E} + e\vec{v} \times \vec{H}$$

بما ان حركة الالكترون فى اتجاه x تكون مركبة القوة فى اتجاه Y هى

$$Fy = e\,(Ey - vx\,Hz)$$

وتصبح هذه القوة مساوية للصفر عندما يتزن تأثير المجال المغناطيسى مع المجال الكهربائى Ey الناتج عن انحراف الالكترونات

$$\therefore \quad 0 = e\,Ey - e\,vx\,Hz$$

$$Ey = Hz\,v_x$$

الكثافة التيارية Jx تعطى بالمعادلة $Jx = n\ e\ vx$

$$\therefore \quad Ey = \frac{Jx \cdot Hz}{n\ e}$$

ويعرف معامل هول RH Hall coefficient بانه المجال الكهربائى المستعرض الذى ينتج عن مرور تيار شدته الوحده عندما تكون شدة المجال المغناطيسى المؤثر هى الوحدة اى أن

$$\therefore \quad R\,H = \frac{Ey}{Jx \cdot Hz} = \frac{1}{n\ e}$$

واذا كان الفرق فى الجهد V على العينة ذات السمك t فان معامل هول يصبح

$$R\,H = \frac{V/t}{Jx \cdot Hz}$$

ويمكن قياس كل هذه المقادير عمليا .

ويلاحظ أن قيمة RH تكون سالبة أو موجبة على حسب نوع حامل الشحنات فى الموصل ، الكترونات أو فجوات موجبة
electrons or positive holes

ويعرف **معامل الحركية لهول** Hall mobility H على أنه معامل هول مضروبا فى معامل التوصيل الكهربائى σ

$$\therefore \quad \mu H = RH \cdot \sigma$$

وقد وجد أن قيمة RH للفلزات المعتادة حوالى $١٠^{-٢٤}$ e.s.u.

وانها اكبر كثيرا فى حالة اشباه الموصلات حيث أن n لها اصغر كثيرا عنها فى حالة الفلزات .

عندما يكون RH سالبا يكون التوصيل بواسطة الالكترونات ويسمى n — type conductivity وعندما يكون RH موجبا يكون التوصيل بواسطة الفجوات الموجبة ويسمى عندئذ p — type