عنوان المحاضرة:

الخواص الكهربائية للمواد الصلبة

Electrical properties of solid materials

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الخواص الكهربائية للمواد الصلبة

تتكون المواد الصلبة من تجمع او تراص عدد كبير من الذرات المرتبة بشكل هندسي معين يعرف بالبلورة وتختلف هذه الذرات باختلاف العناصر الكيميائية للمادة المكونة لها،تتراوح انصاف اقطار الذرات من 0.46 A^O الى 3.0 A^O .تحتوي عناصر المادة الصلبة على أيونات موجبة وسالبة أو على الكترونات،فعند التأثير على هذه الجسيمات المشحونة فان حركتها (العشوائية قبل التأثير) تتأثر لتصبح ذات حركة اتجاهية.ومن اهم العوامل التي تؤثر على هذه الحركة هي:

١- طاقة الكترونات التكافؤ الموجودة في الغلاف الخارجي للذرة.
٢- حركة برم الالكترونات في الذرة.
٣- الاعاقة الكهربائية التي تصاحب المجال الكهربائي والتخلف المغناطيسي المصاحب للمجال المغناطيسي.
٤- البنية البلورية للمادة الصلبة

الكترونات التكافؤ والكترونات التوصيل

الكترونات التكافؤ هي تلك الإلكترونات التي تشغل القشرة الخارجية للذرة وتستعمل لربط الذرات بعضها ببعض لتشكيل جزيئة أو بلورة ،ويختلف عدد الكترونات التكافؤ من عنصر إلى أخر ويكون بشكل عام اقل من العدد اللازم لإشباع أو ملء القشرة الخارجية للذرة الحرة.تكون الكترونات التكافؤ مقيدة بصورة غير محكمة (او غير مستقرة) ببقية اجزاء الذرة،فعند تقريب الذرات الحرة بعضها من بعض لتشكيل مادة في حالة الصلابة تتراكب الذرات المجاورة او تتشابك بحيث ان الكترون التكافؤ لذرة ما لم يعد مقيدا للذرة الام بل يكون منتميا للبلورة الكاملة بعد تكونها من تشابك الاعداد الكبيرة من الذرات ،اذ باستطاعة الالكترونات الحرة التنقل من أيون ما الى أيون اخر مجاور له اولا ثم الى أيون اخر مجاور له ثانيا وهكذا ،ان الالكترون المتنقل الذي يدعى الكترون التكافؤ لذرة حرة يصبح نفسه ما تسميه الكترون توصيل ،بناءا على ما تقدم تصبح جميع الكترونات التكافؤ للذرات المتشابكة الكترونات التوصيل للبلورة الناتجة من تشابك تلك الذرات،تستطيع الإلكترونات حمل تيار كهربائي (لذلك سميت بحاملات التيار) تحت تأثير مجال كهربائي خارجي ،أي أن التوصيل يكون ممكننا عند توفر أعداد كبيرة من الإلكترونات غير المقيدة بذرة خاصة بل تنتشر في كل مكان من البلورة لهذا سميت هذه الإلكترونات بالكترونات التوصيل.ان الكترونات التكافؤ تكون مسئولة عن الصفات الكيميائية بينما الكترونات التوصيل تكون مسئولة عن معظم صفات المادة الصلبة.

عدد الكترونات التوصيل لوحدة الحجم=عدد الكترونات التكافؤ لذرة منفردة x عدد الذرات لوحدة الحجم

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

التوصيل الكهربائي للمواد الصلبة

يعرف التوصيل الكهربائي للمواد الصلبة على انه قابلية انتقال الشحنة الكهربائية من موقع الى آخر في تلك المادة،تعتمد حركة الشحنة الكهربائية على نوع المادة الصلبة ،وتكون الشحنات الكهربائية على هيئة الكترونات او فراغات الكترونية Electronic Vacancy ،تتكون الفراغات الالكترونية في البنية البلورية ذات الأواصر التساهمية في حالة فقدان احد الكترونات المزدوج الالكتروني للآصرة ،كما يتكون الفراغ الإلكتروني في المواد ذات الأواصر الأيونية عند كسر الآصرة الأيونية فيتكون في هذه الحالة الكترون حر Free Electron ذو الشحنة السالبة وفجوة Hole ذات الشحنة الموجبة على الرغم انها في الحقيقة نقص في الشحنة السالبة ضمن البنية البلورية. في اتوصيل الأيوني يكون الوسيط الحامل للشحنات Charge Carries المنقولة اما أيونات موجبة او أيونات سالبة.اما في التوصيل الالكتروني فالالكترونات هي وسيط النقل.

ويرمز لمعامل التوصيل (التوصيلية)الكهربائي (σ)الذي هو حاصل ضرب عدد حاملات الشحنة (n) ومقدار الشحنة (q)التي يحملها الحامل الواحد وحركية Mobility (μ)حاملات الشحنة اي ان:اكتب المعادلة هنا.

$$\sigma = nq\mu \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

يمكن تصنيف المواد الصلبة بموجب معاملات توصيلها الكهربائي الى ثلاثة اصناف:

١- الموصلات Conductors :هي مواد جيدة التوصيل الكهربائي وهي مواد فلزية مثل (الذهب،الفضة ،النحاس،الالمنيوم....) يكون معامل التوصيل الكهربائي لها بحدود $10^{7}(\Omega.m)^{-1}$.

٢- أشباه الموصلات Semiconductors :هي مواد عازلة عند درجة حرارة الصفر المطلق وموصلة بشكل ضعيف عند درجة حرارة الغرفة مثل (السيلكون ،الجرمانيوم ،كبريتيد الخارصين...) يكون معامل التوصيل الكهربائي لها بحدود $10^{2}(\Omega.m)^{-1}$.

٣- العوازل Insulators :هي مواد رديئة التوصيل الكهربائي او عازلة كهربائيا مثل (الأبونيت،المطاط ،البلاستك،الزجاج ،الخزف) يكون معامل التوصيل الكهربائي لها بحدود $10^{-8}(\Omega.m)^{-1}$.

التوصيل في الفلزات (المعادن)

الذرة المعدنية :هي ذرة يحوي مدارها الخارجي عددا قليلا من نسبيا من الكترونات ذات ارتباط ضعيف بنواتها ولذلك تستطيع الهروب من تلك الذرة بسهولة أي إن طاقة تأينها واطئة نسبيا.

المعدن الصلب :فهو مادة ذات لمعان معدني وذات كثافة عالية وجيدة التوصيل للحرارة والكهربائية،ولكن عامل التوصيل الكهربائي يقل بارتفاع درجة الحرارة . عند تقريب الذرات

Dr. Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الأساسية بعضها من بعض تتراكب غيمة الكترونات الذرات المتجاورة أي تتشابك بحيث تسهل هجرة الكترونات التكافؤ من ذرة إلى أخرى،وفي هذه الحالة ليست هنالك الكترونات معينة تابعة لذرة معينة بل يمكن اعتبار المعدن الصلب مكونا من صفوف مرتبة لايونات موجبة الشحنة (كاتيونات) مرتبة داخل بحيرة من الإليكترونات السالبة الشحنة (أنيونات) المهاجرة من ذراتها .تكون حركة الإلكترونات المكونة لهذه البحيرة حسب النظرية الكلاسيكية حرة الحركة في داخل المعدن الصلب ولكنها ليست تامة الحرية حيث إن حركتها تقاوم بالمجال الكهربائي للأيونات المعدنية الموجبة الذي يتطلب طاقة لقذف إلكترون من هذه البحيرة إلى خارج سطح المعدن .وتكون الإلكترونات المكونة لهذه البحيرة مسئولة عن القابلية العلية جدا للتوصيل الكهربائي والحراري للمعادن الصلبة .

الخواص الشائعة للفلزات تتمثل بما يلي:

١- التوصيل الكهربائي والحراري الجيد.
٢- المتانة Strength.
٣- العاكسية الضوئية Optical Reflectivity المسئولة عن تميز الفلزات بمظهرها البراق.

تعتمد هذه الخواص على البنية الذرية وعلى عدد الكترونات التكافؤ لكل ذرة حرة.

ان عدد الكترونات التوصيل في فلز في وحدة الحجم يعطى بالعلاقة:

$$n = Z\left(\frac{\rho}{M}\right)N_A \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

Z:العدد الذري ،M:الوزن الذري للفلز ،ρ:كثافة الفلز،N_A:عدد افوكادرو (6.0225×10^{23}) ذرة لكل مول.

الغاز الإلكتروني الحر :إن اعتبار الكترونات التوصيل ذات حرية حركة كاملة داخل البلورة يعني عدم تعرضها لأي نوع من الاصطدام (عدا اصطدامها مع سطح البلورة وانعكاسها منه) وهذا يشبه حركة ذرات غاز مثالي ولذلك يطلق على الإلكترونات التوصيل مصطلح الغاز ((الإلكتروني الحر)) أو ((الغاز الالكتروني الحر)) Free Electron Gas.

ما الفرق بين الغاز الالكتروني الحر في معدن عن جزيئات الغاز؟

أولا:يكون الغاز الإلكتروني الحر ذا شحنة سالبة بينما تكون جزيئات الغاز الاعتيادية متعادلة الشحنة ،ولذلك يمكن اعتبار الغاز الإليكتروني الحر في معدن مثل (البلازما) وهي مادة عالية التأين فيها أعداد متساوية من النويات الذرية المؤبنة والالكترونات الطليقة.

ثانيا: يكون تركيز الالكترونات في المعدن كبيرا جدا (حوالي 3×10^{28} إلكترون لكل متر مكعب أو أمثر)بينما يكون تركيز الغاز الاعتيادي (حوالي 10^{25} جزيئة لكل متر مكعب).

Dr. Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة:

نموذج الالكترون الحر

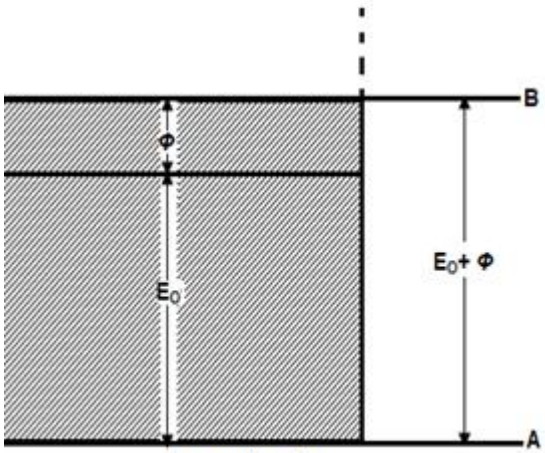
Free electron model

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نموذج الالكترون الحر

تعد الكترونات التوصيل في معدن ما حرة طليقة الحركة بصورة تامة (باستثناء وجودها عند السطح الخارجي لمعدن)،حيث تتعرض الى جهد خارجي او حاجز خارجي يدعى بحاجز الجهد Potential Barrier يعمل على حجز حركة الالكترونات وتقيدها،عليه فان الحركة الحرة للالكترونات تقتصر على باطن المعدن بعيدا عن سطحه.



الشكل(١)

ولتمثيل الالكترونات الحرة في معدن نستعين بالشكل(١)حيث تمثل المنطقة المظللة مستويات طاقة مستمرة تقابل جميع الطاقات الحركية من الصفر الى E_0 وقد تراكبت فوق طاقة كامنة ممثلة بوساطة المستوى A ،المستوى B يمثل طاقة الكترون في الفراغ خارج سطح المعدن ،ان الفرق بين المستويين A وB يعطى ب ($E_0+\phi$):هو يعرف بكونه جهد داخلي Inner Potential للمعدن وهو يمثل التغير في الطاقة الكامنة لإلكترون عند مروره عبر حد فاصل بين المعدن والفراغ الخارجي. اما ϕفهي تمثل دالة الشغل Work Function وهي عبارة عن اقل طاقة اضافية يجب منحها للإلكترون (الذي يمتلك اعظم طاقة حركية E_0)لكي يرتفع الى المستوى B او اعلى منه وهي مستويات ممتدة الى ما لانهاية فوق المستوى B ،بحيث تتحرك الالكترونات بحرية بأية قيمة من الطاقة الحركية في الفراغ.

تكون دالة الشغل ϕ عادة بضعة الكترون فولت لكل الكترون ،وهي تحصل في بعض الظواهر مثل:

١- الانبعاث الثرميوني او الانبعاث الأيوني الحراري Thermionic Emission عندما يحفز الكترون حراريا لاجتياز الحاجز الخارجي.
٢- الانبعاث الضوئي Photoelectric Emission عندما يمتص الالكترون فوتونا فعالا Energetic ليحرره.

ان افتراض الحرية التامة لحركة الكترونات التوصيل يعني الافتراض ان القوى بين الكترونات التوصيل من جهة ولباب الأيونات الموجبة (وهي تتكون من نويات الذرات والالكترونات الشاغلة للقشرات المقفلة او المشبعة) من جهة اخرى تكون معدومة ،الا انه يجب ان نتوقع تفاعلا ما بين الكترونات التوصيل والأيونات الموجبة كذلك تفاعل اخر بين الكترونات التوصيل انفسها،وتكون هذه التفاعلات قوية لذلك يجب ان تعاني الكترونات التوصيل من تصادمات Collisions متكررة الحدوث و دائمية ولهذا تنشأ فكرة ان الكترونات التوصيل مغايرة لفكرة

Dr Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الغاز المثالي ولا يمكن تسميتها بغاز الالكترون الحر. لكن نموذج الإلكترون الحر وضع تفسيرات ومبررات حول ضعف التفاعل بين الكترونات التوصيل ولباب الأيونات الموجبة وهي:

أولا : على الرغم من تفاعل الكترون التوصيل مع لب الأيون الموجب من خلال التجاذب الكولومبي فأن التأثيرات الكمية تقدم جهدا تنافريا اضافيا يحاول اضعاف التجاذب الكولومبي ،وان الجهد الصافي يعرف بالجهد الكاذب Pseudo Potential.

ثانيا :عندما يجتاز الالكترون ما أي أيون فأن سرعة الالكترون تزداد زيادة سريعة ،لأن اقترابه كثيرا من أيون يسبب نقصانا في جهده ولهذا السبب يقضي الالكترون فترة زمنية قصيرة من وقته قرب الأيون ،حيث يكون جهد الأيون في تلك المنطقة قويا جدا.وهذا يعني ان إلكترون التوصيل يقضي معظم وقته بعيدا عن الأيون الموجب في مناطق حيث يكون الجهد ضعيفا وهذا ما يجعلنا نعتقد بأن إلكترون التوصيل يتصرف بوصفه جسيما حرا الى حد ما.

ثالثا :ان التفاعل بين الكترون التوصيل وأيون موجب يكون ضعيفا جدا عندما تكون المسافة بينهما كبيرة،لأن الأيونات تكون قد حجبت أو سترت Screened بواسطة بقيت الالكترونات أي ان التفاعل يكون بصيغة جهد كولوم المحجوب ذو المدى القصير وليس بصيغة جهد كولوم التام ذو المدى الطويل.

أما التفسيرات والمبررات التي قدمها نموذج الإلكترون الحر حول ضعف التفاعل بين الكترونات التوصيل انفسها فتكون بالشكل التالي:

أولا :ان الإلكترونات ذات برومات Spins متوازية تميل الى البقاء بعيدة بعضها عن بعض بموجب قاعدة پاولي للاستبعاد.

ثانيا :ان الالكترونات ذات البرومات المتعاكسة تفضل البقاء بعيدة بعضها عن بعض لكي تنخفض طاقة المنظومة الى الحد الأدنى ،لأن الاقتراب الشديد لإلكترون من الكترون آخر يجعل الطاقة الكامنة الكولومبية كبيرة بصورة مفرطة ، وهذا يسبب انتهاكا لنزعة المنظومة لامتلاك أوطأ طاقة ممكنة.

ثالثا :ان التصادم بين الالكترونين يستوجب وجود حالتين شاغرتين قبل حدوث التصادم،وهذه الحالتين تكون موجودة في قشرة عرضها (K_BT)،وأن حدوث التصادم بعيدا عن هذه القشرة غير وارد لكون الحالات البعيدة عن القشرة(قشرة فيرمي)تكون مملوءة بالالكترونات .

التوزيع الكلاسيكي للسرع

يمكن تفسير كثير من الظواهر التي يتصرف بها معدن باستخدام الاحصاء الكلاسيكي أي توزيع ماكسويل – بولتزمان ،المباديء الاساسية لتوزيع السرع بين جزيئات الغاز المثالي التي اقترحت من قبل ماكسويل و بولتزمان اللذان أشارا الى أن الجزيئات في الغاز المثالي

Dr Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

تمتلك سرعا تتراوح بين الصفر وما يقارب سرعة الضوء ولكن من دون معرفة العدد النسبي لهذه الجزيئات ضمن أي مدى من السرع. ولمعرفة عدد الجزيئات التي تقع سرعتها بين v و $(v+dv)$ يتطلب الأمر فرضيتين أساسيتين هما :

أولا :خضوع الجزيئات لقوانين الصدفة بسبب حركتها العشوائية.

ثانيا :الاتزان الحراري للغاز في الوعاء ،أي ان خواص الغاز تكون متجانسة من نقطة الى اخرى في الوعاء.

اذا فرضنا لأن عدد الكترونات التوصيل لكل وحدة حجم من معدن هو (n) بحيث تكون حرة الحركة تماما وتخضع لقوانين الصدفة والاتزان الثرموديناميكي ،فأن عدد الالكترونات بالاتجاه السيني (x) ذات السرع المحصورة بين v_x و (v_x+dv_x) يعطى بالعلاقة:

$$P(v_x)=f(v_x)\,dv_x \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

$P(v_x)$:دالة التوزيع الاحتمالي وهي تمثل نسبة عدد الالكترونات ضمن هذا المدى من السرع بالاتجاه السيني،ويصبح الشيء نفسه بالنسبة للالكترونات المتحركة بالاتجاهين (y)و(z).

$$P(v_y)=f(v_y)\,dv_y \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

$$P(v_z)=f(v_z)\,dv_z \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

$$P=P(v_x)\,P(v_y)\,P(v_z) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

$$P=f(v_x)\,f(v_y)\,f(v_z)dv_x dv_y dv_z \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(5)$$

دالة التوزيع المتزن هي:

$$f_o=f(v_x)\,f(v_y)\,f(v_z) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(6)$$

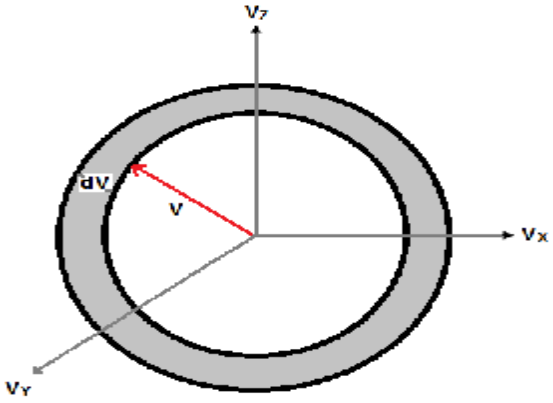
ان عدد الالكترونات لكل وحدة حجم التي تشغل حجما في فضاء السرعة مقداره $(dv_x\,dv_y dv_z)$ وتتمركز عند الوضع$(v_x\,v_y v_z)$ يعطى بالعلاقة:

$$f_o dv_x dv_y dv_z = n\left(\frac{m}{2\pi K_B T}\right)^{3/2} exp\left[\frac{-m(v_x^2+v_y^2+v_z^2)}{2K_B T}\right] dv_x dv_y dv_z \ldots\ldots(7)$$

حيث $\left(v^2=v_x^2+v_y^2+v_z^2\right)$،على فرض أن جميع الاتجاهات للحركة الالكترونية تكون متساوية الاتجاهات،اي ان نسبة عدد الالكترونات التي تمتلك سرعة معينة(v) يعتمد على قيمة السرعة وليس على الاتجاه،وهذا يعني أن متجهات السرعة تكون موزعة بانتظام في قشرة

Dr. Ghasan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

كروية للسرعة سمكها يقع بين v و $(v+dv)$،عليه فأن توزيع ماكسويل – بولتزمان المتزن يكون ذا تماثل كروي في فضاء السرعة وأن حجم القشرة في هذا الفضاء يساوي:



$$dv_x dv_y dv_z = 4\pi S^2 \mathrm{ds} \quad \ldots.(8)$$

حيث (S)تمثل الانطلاق ،أي سرعة لا اتجاهية وهي القيمة العددية للسرعة:

$$\left(S^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2\right) \quad \ldots.(9)$$

وعلى هذا الاساس تكون احتمالية الانطلاق(S) بغض النظر عن اتجاهه في المدى S و $(S+dS)$.

$$dn = f_o dv_x dv_y dv_z \quad \ldots.(10)$$

$$dv_x dv_y dv_z = 4\pi r S^2 dS \quad \ldots.(11)$$

$$\frac{dn}{\mathrm{n}} = 4\pi s^2 \left(\frac{m}{2\pi K_B T}\right)^{3/2} exp\left[\frac{-ms^2}{2k_B T}\right] ds \quad \ldots.(12)$$

ان معدل الطاقة الحركية لكل الكترون في توزيع ماكسويل – بولتزمان يساوي:

$$\frac{3}{2} K_B T = \frac{1}{2} m (S_{RMS})^2 \quad \ldots.(13)$$

$$S_{RMS} = \left(\frac{3K_B T}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots.(14)$$

حيث ان الانطلاق الاكثر احتمالا:

$$S_{MPS} = \left(\frac{2K_B T}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots.(15)$$

وجد عند درجات الحرارة الاعتيادية أن قيمة جذر متوسط مربع السرع حوالي$(10^5\ m/s)$.

Dr. Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة:

نظرية درود للتوصيل الالكتروني

Drud's theory of electronic conductivity

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نظرية درود للتوصيل الالكتروني

تعد نظرية درود أول نظرية كلاسيكية للغاز الالكتروني الحر في الفلزات ،صور درود البنية البلورية لأي فلز على انه رص من لباب الايونات الموجبة Positive Ion Cores يتخللها عدد كبير من الالكترونات الحرة ناتجة عن مساهمة كل ذرة في الفلز بإلكترون تكافؤي أو أكثر ويطلق على هذه الالكترونات بالكترونات التوصيل ،وتتأثر هذه الالكترونات بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية.

افترض درود على ان الالكترونات على الرغم من شحنتها السالبة تتصرف كجزيئات غاز مثالي متعادلة الشحنة .اهمل درود المجال الدوري الذي تتحرك فيه الالكترونات والذي يرجع الى دورية الشبيكة. وافترض ان الكترونات التوصيل تستطار Scattered نتيجة تصادمها العشوائي بلباب الايونات الموجبة بحيث ان معدل سرعتها بعد كل تصادم يساوي صفرا.وعند تسليط مجال كهربائي خارجي على فلز تكتسب الالكترونات تعجيلا نتيجة تغير قيمة أو اتجاه سرعة انجراف Drift Velocity الالكترونات او كل من القيمة والاتجاه وهذا التغيير يباد ويستأصل عند كل تصادم بين الالكترونات ولباب الايونات الموجبة ،وبسبب هذا التصادم يفقد الالكترون جميع طاقته التي اكتسبها بواسطة المجال الكهربائي المسلط وتكون سرعته بعد التصادم عشوائية ليس لها علاقة باتجاه حركته قبل التصادم وكأن الالكترون فقد تصرف حالته الحركية قبل التصادم وهذا يعني ان التغير في سرعة الالكترون يظهر فقط خلال فترة بين تصادم وأخر ولذلك يزداد تأثير المجال الكهربائي المسلط على الكترونات التوصيل كلما زادت الفترة الزمنية بين تصادمين متتاليين.

متوسط الزمن الحر Mean Free Time : هي الفترة الزمنية بين تصادمين متتاليين ويعرف ايضا بزمن الاسترخاء Relaxation Time ويرمز له بالرمز (τ_m)،وهو معدل الزمن اللازم الذي يستغرقه الكترون لقطع مسافة (تعرف بالمسار الحر) بين تصادمين متعاقبين.

المسار الحر الالكتروني Electronic Free Path :هو المسافة التي يتحركها اي الكترون توصيل بفاعلية انطلاقه الحراري (S_{th})خلال متوسط الزمن الحر (τ_m).

الانطلاق الحراري Thermal Speed :هو انطلاق الالكترون عند حركته من استطارة الى مركز استطارة آخر.

$$S_{th} = \frac{\lambda}{\tau_m} = \left(\frac{3K_BT}{m}\right)^{1/2} \quad \text{.....(1)}$$

نفرض ان(n_o)مجموعة من الكترونات التوصيل عند زمن $(t = 0)$،لذا فان عدد الالكترونات الناجية Survived من اي تصادم بعد مرور زمن (t)هو:

$$n_1 = n_0\, exp\left(-\frac{t}{\tau_m}\right) \quad \text{.....(2)}$$

المعدل الزمني الذي بموجبه تزيل التصادمات بعضا منت الالكترونات الناجية من أي تصادم خلال الزمن (t) يعطى بالعلاقة ألآتية :

$$-\frac{dn}{dt} = \frac{n_1}{\tau_m} = \frac{n_0}{\tau_m}\, exp\left(-\frac{t}{\tau_m}\right) \quad \text{.....(3)}$$

Dr. Ghassan Alhiti
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

قبل تسليط المجال الكهربائي الخارجي على المعدن يكون توزيع السرع موحد الخواص Isotopicفي جميع الاتجاهات ،عليه فان معدل سرعة الالكترونات بأي اتجاه كان يساوي صفرا على الرغم من استمرارها في الحركة واصطدامها بلباب الايونات الموجبة.

وعند تسليط مجال كهربائي ثابت القيمة والاتجاه فان الالكترونات الحرة تتأثر بتعجيل منتظم بسبب ازدياد سرعتها مع الزمن بموجب قوانين نيوتن. وبعد مرور زمن (t)من بدء تسليط المجال الكهربائي يكتسب الاليكترون الذي يعان استطارة خلال هذه الفترة سرعة انجراف فضلا عن سرعته الحرارية التي مقدارها:

$$\Delta v_1 = \left(\frac{-eE_1}{m}\right) t \quad \text{.....(4)}$$

اما المسافة التي يقطعها الالكترون باتجاه المجال الكهربائي التي تتراكب مع حركته الحرارية العشوائية:

$$\overline{x_1} = \frac{1}{2}\left(\frac{-eE_1}{m}\right) t^2 \quad \text{.....(5)}$$

عليه يمكن التعبير عن النقل الالكتروني الكلي Total Electronic Transport على طول مسار واحد (باتجاه المجال الكهربائي للالكترونات (n_o))بالمعادلة :

$$\int_0^\infty \overline{x_1}\left(\frac{dn}{dt}\right) dt = \left(\frac{-eEn_o}{2m\tau_m}\right) \int_0^\infty t^2 \quad exp\left(\frac{-t}{\tau_m}\right) dt \quad \text{.....(6)}$$

ولتبسيط المعادلة نفرض أن :

$$y = \frac{t}{\tau_m}, \quad t = \tau_m y \Rightarrow dt = \tau_m dy \quad \text{.....(7)}$$

$$\int_0^\infty \overline{x_1}\left(\frac{dn}{dt}\right) dt = \left(\frac{-eEn_o\tau_m^2}{m}\right) \int_0^\infty \frac{1}{2} y^2 e^{-y} dy \quad \text{.....(8)}$$

$$\int_0^\infty \overline{x_1}\left(\frac{dn}{dt}\right) dt = n_o \left(\frac{-eE\tau_m}{m}\right) \tau_m \quad \text{.....(9)}$$

تمثل المعادلة (9) نقل (n_o)من الجسيمات بحيث تمتلك جميعها نفس زمن الاسترخاء(τ_m) ونفس معدل سرعة الانجراف.

$$\Delta\overline{v} = \left(\frac{-eE\tau_m}{m}\right) \quad \text{.....(10)}$$

اما اذا فرضنا ان الفلز يحتوي على عدد (n)من الالكترونات لكل متر مكعب،وان جميعها تتحرك بسرعة انجراف ثابتة $(\Delta\overline{v})$ في مجال كهربائي$(\bar{E})$ فان كثافة التيار الكهربائي (J)تعطى بالمعادلة:

$$J = (-en\Delta\overline{v}) = \left(\frac{ne^2\tau_m}{m}\right)\bar{E} = \sigma\bar{E} \quad \text{.....(11)}$$

حيث ان التوصيلية الكهربائية(σ)كمية موجبة وغير متجهة

$$\sigma = \left(\frac{ne^2\tau_m}{m}\right) \quad \text{.....(12)}$$

Dr Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ان العلاقة التي تربط بين$(\bar{\mathbf{E}})$ و $(\mathbf{J})$علاقة خطية تعرف بقانون أوم ومنها يمكن حساب قيمة التوصيلية الكهربائية(σ)بدلالة المقادير المعروفة (n)،(m)، (e) و(τ_m).ويمكن التعبير عن التوصيلية الكهربائية باستخدام ما يعرف بالتحركية الانجرافية Drift Mobility والتي تعرف على انها السرعة الانجرافية المنتظمة لكل وحدة مجال كهربائي.

$$\mu = \frac{\Delta \bar{v}}{E} = \frac{e\tau_m}{m} \quad \text{.....(13)}$$

بالمقارنة مع المعادلة(12) نحصل :

$$\sigma = ne\mu \quad \text{.....(13)}$$

وبتعويض المعادلة(1) في المعادلة (12) نحصل :

$$\sigma = \left(\frac{ne^2\tau_m}{m}\right) = \frac{ne^2\lambda}{m\,S_{th}} = \frac{ne^2\lambda}{(3mK_BT)^{1/2}} \quad \text{.....(14)}$$

ويلاحظ من المعادلة الاخيرة ان التوصيلية الكهربائية (σ) تتناسب طرديا مع $(T)^{-1/2}$لمدى واسع من درجات الحرارة ،وقد وجد عمليا ان تبريد الفلز الى درجات حرارية واطئة فان التوصيلية الكهربائية(σ) تناسب طرديا مع $(T)^{-5}$قبل الوصول الى مستوى مستقر،وبهذا تفشل نظرية درود في تفسير النتائج عند درجات الحرارة الواطئة لأن الكترونات التوصيل لا تتصرف تماما كجزيئات الغاز المثالي وأن الالكترونات لا ترتد عند اصطدامها بقلوب الايونات الموجبة.

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة:

التوصيل الحراري للغاز الالكتروني الحر

Thermal conduction of free electronic gas

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

التوصيل الحراري للغاز الالكتروني الحر

ينتقل التيار الحراري في وسط معدني بواسطة عمليتين:

اولا : استطارة الفونونات بواسطة غيرها من الفونونات وبواسطة العيوب البلورية والكترونات.

ثانيا : استطارة الالكترونات بواسطة فونونات وعيوب بلورية.

تشير التجارب العلمية الى ان موصلية المعدن للحرارة أحسن بكثير من تلك الموصلية لأي عازل على الرغم من توافر الفونونات في كل من المعادن والعوازل لذا فان التيار الحراري في معدن ينتقل بواسطة الكترونات التوصيل بسبب وفرة الكترونات التوصيل في معدن بالنسبة الى عازل بحيث ان اسهام الفونونات في عملية التوصيل الحراري في معدن يكون ضعيفا ويمكن اهماله ولذلك تعرف الموصلية الحرارية الناشئة عن اسهام الكترونات التوصيل بالموصلية الحرارية الالكترونية.

يمكن تطبيق فرضيات درود بشأن طبيعة حركة الكترونات التوصيل في فلز والمستخدمة في حساب التوصيلية الكهربائية لي د،يمكن حساب الموصلية الحرارية للغاز الالكتروني الحرل ثا ندبالمعادلة:

$$\$\%\& \frac{'}{(}) * +' - ./ \quad \text{.....(15)}$$

حيث ان لمحضد:تمثل الحرارة النوعية الالكترونية الكلاسيكية لغاز الكتروني عند ثبوت الحجم:

$$345 = \frac{6}{7}89 : \quad \text{.....(16)}$$

$$; <= \frac{>}{?}@ABCDEFGH = I\ J\ KLMNO \quad \text{.....(17)}$$

$$PQR = \frac{STUVWXYZ}{[} \quad \text{.....(18)}$$

عدد لورنتي ح ولأي ح بي:هو النسبة بين معامل التوصيل الحراري الالكتروني لص ظد ومعامل التوصيل الكهربائي لج ع د لكل درجة حرارة .

$$b = \frac{cdeq}{h} = i\ j\ \frac{kl}{m}no \quad \text{.....(19)}$$

$$' p = q.rs\ tuv\ wxy\frac{z\{|\}}{\sim\text{-}!"\#\$}\% \& \quad \text{.....(20)}$$

تشير المعادلة ل إحد ان عدد لورنز كمية ثابتة لا تعتمد على عدد الكترونات التوصيل ولا على كتلة الالكترون،ولابد من الاشارة الى أن عدد لورنز المحسوب في المعادلة ض مدهو بناءا على النظرية الكمية بينما وجد ان عدد لورنز حسب النظرية الكلاسيكية هو ق ع تذمحن إهيم ا ض ة ب عةقصبلد. '

Dr. Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نظرية لورنتز للتوصيل الالكتروني

عمل لورنتز على تطوير نظرية درود للغاز الالكتروني الحر حيث دحض فرضيته والتي تنص على ان كل الكترون توصيل في معدن يمتلك الانطلاق الحراري نفسه،اي ان جميع الالكترونات الحرة في الفلز لها انطلاق حراري واحد.

لقد افترض لورنتز ان الغاز الالكتروني الحر في الفلز يكون في حالة اتزان حراري ويمتلك سرعا تخضع لدالة التوزيع السرع لوطد عند غياب تأثير اي مجال كهربائي خارجي،وعند تسليط مجال كهربائي على الفلز سوف ينتج عن ذلك انجراف الالكترونات بشكل متماثل وينشأ تبعا لذلك نظاما جديدا أو دالة جديدة لتوزيع السرع ويطلق عليها ل لد وتختلف تماما عن دالة توزيع السرع لىكد التي تكون في حالة الاتزان الحراري وفي حالة غياب المجال كهربائي .ان معدل تغير لىءد بالنسبة للزمن في أي مكان داخل البلورة الفلزية ،وعند أية لحظة عندما يكون المجال مؤثرا يساوي حاصل جمع نوعين مختلفين من الاسهامات:

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{field} = \left(\frac{df}{dt}\right)_{drift} + \left(\frac{df}{dt}\right)_{collisions} \quad \text{.....(21)}$$

حيث $\left(\frac{df}{dt}\right)_{drift}$:تمثل تأثير المجال في تغير دالة توزيع السرع.

$\left(\frac{df}{dt}\right)_{collisions}$: تمثل تأثير الاستطارة في محاولتها لإعادة دالة توزيع السرع ل د.

ولكون القوة تعرف على انها تغيير الزخم،فأن الالكترون الذي له انطلاق ل د يمتلك زخم مقداره ل د حينما تكون القوة المبذولة عليه تساوي ل د وعليه يمكن كتابة الحد الأول من المعادلة لحمد بالصيغة:

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{drift} = \frac{\partial f}{\partial k_x}\frac{dk_x}{dt} + \frac{\partial f}{\partial k_y}\frac{dk_y}{dt} + \frac{\partial f}{\partial k_z}\frac{dk_z}{dt} \quad \text{.....(22)}$$

ان الاستطارة الحاصلة من التصادمات بين الالكترونات والقلوب الأيونية الموجبة تعمل على القضاء على أي تعجيل يحدث على طول المسار الحر الذي يسبق التصادم،وبموجب ذلك افترض لورنتز أن فئثشجهب تتناسب طرديا مع لخ ق ىد ويعبر عن ثابت التناسب بمقلوب زمن الاسترخاءل ، أد بشرط ان يكون زمن الاسترخاء لظلادمماثل لمعدل الزمن الحر لخص دفقط عندما تكون سرعة الالكترون بعد التصادم عشوائية.

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{collisions} = -\frac{f - f_0}{\tau} \quad \text{.....(23)}$$

وعند تعويض المعادلة لممد و لذمد في المعادلة لحمد نحصل على :

$$\frac{\partial f}{\partial k_x}\frac{dk_x}{dt} + v_x\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{f - f_0}{\tau} = 0 \quad \text{.....(24)}$$

فعند تسليط مجال كهربائي خارجي ثابت لزمن طويل بالمقارنة مع زمن الاسترخاء لل د د،وعند حصول حالة الاستقرار يصبح الحد الاول في المعادلة لتمد يساوي صفرا،عليه فان الحد الثاني يساوي الحد الثالث بالمقدار ويعاكسه بالإشارة وعند ذلك يمكن التعبير عن دالة توزيع السرع المشوهة لصد في حالة الاستقرار:

Dr. Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$+= , - + . \frac{/0}{4}\,506\,\frac{78}{9:};\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(25)$$

تشير المعادلة الاخيرة الى أن الفلز يمتلك توصيل كهربائي محدد لأن التكامل فوق لغد يحصل عنه سرعة انجراف غي متلاشية لكامل الغاز الالكتروني الحر .فإذا ما افترضنا ان اتجاه المجال الكهربائي المسلط على الفلز يكون بالاتجاه السيني السالب فأن كثافة التيار تكون:

$$=> = \{\ ?@ABC\,0DEFGH\,I\,JKL\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(26)$$

ولما كان التكامل بالنسبة الى لإهد يساوي صفرا أي أن:

$$Qp = QRS = \{\ ?T\frac{UWX}{Y}Z'[\backslash] \sim \frac{`a}{bc}d\,0efghij\,klm\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(27)$$

$$'\ n_o = \frac{p}{q}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(28)$$

$$r = \{\ ?s\frac{t'uwx}{yz}\{'|\frac{}{\bullet!}\sim\ '' 0\#\$\%\&'\ ()*+\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(29)$$

يبدل التكامل من السرعة ل ةدالى الانطلاق ل عد ،ويعبر عن الانطلاق ل بد بمركبات م أ تةذ مةضدة اي أن:

$$78 = 9: + <\geq + ?@\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(30)$$

$$BC = DE = FG\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(31)$$

عليه فأن :

$$H^I = JK\overset{M}{L}N\ \ OP = \frac{R}{S}TU\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(30)$$

ان حجم القشرة الكروية في فضاء السرع ذات نصف قطر ه وسمك رخق تساوي ظص لا ،أد ،المعادلة ل إمد تصبح:'

$$_ = \frac{`abc}{de}?\,fg^{h'}i\,\frac{jklm}{no}pqr\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(31)$$

ويمكن حساب التكامل في المعادلة لحذ باستخدام قيمة من المعادلة:

$$f_u = n'''(\frac{v}{wxyz\{})|\sim\}'''\bullet!''\ \#'\frac{\$\%\&'}{()*+}'',\ \ldots\ldots\ldots\ldots(32)$$

$$-\ \{\ \frac{./0}{12} = n'''(\frac{3}{456\,78})^{9;}:'0<\frac{=>?}{@ABC}D'''EFGH'\frac{I\,JK}{MNO}''Q\ \ldots\ldots\ldots\ldots3)..(3$$

وبتعويض المعادلة ل ذ ذ في المعادلة لحذ نحصل على :

Dr. Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Solid S

Dr. Ghassan Adnan

عنوان المحاضرة :

تأثير هول

Hall Effect

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

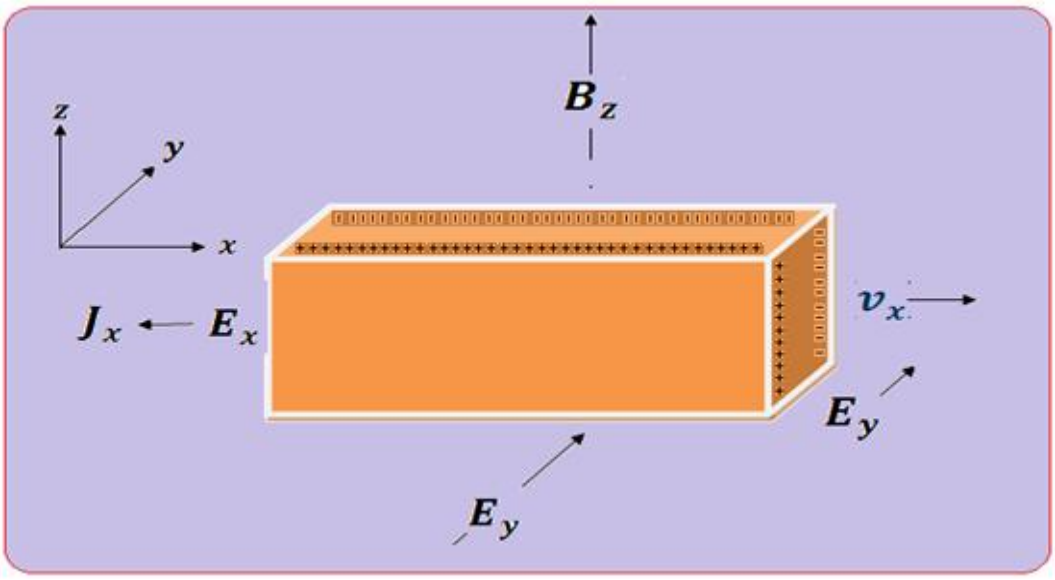
تأثير ثومسن : هو تولد قوة دافعة كهربائية في موصل نتيجة لوجود فرق بين درجة حرارة نهايتيه.

تأثير هول

تعريفه: هو اختلاف توزع التيار في شريحة معدنية بفعل مجال مغناطيسي ،فعند تسليط مجال مغناطيسي على موصل (يحمل تيارا كهربائيا) باتجاه عمودي على اتجاه سريان التيار تنشأ نزعة لدى حاملات الشحنة الى الانحراف جانبا فتسبب تولد قوة دافعة كهربائية عبر الموصل باتجاه عمودي على اتجاه كل من التيار والمجال المغناطيسي.

التفسير الفيزيائي لهذه الظاهرة :

عند وضع شريحة من فلز تحت تأثير مجال مغناطيسي عمودي وإمرار تيار كهربائي في تلك الشريحة،يتولد فرق جهد كهربائي عمودي على اتجاه كل من التيار والمجال المغناطيسي. ان التيار الكهربائي عبارة عن سيل من الالكترونات التي تتحرك بسرعة انجراف (v_e) باتجاه معاكس لاتجاه المجال الكهربائي(E_x)،وعند تسليط مجال مغناطيسي حثه (B) على شريحة معدنية تتولد قوة لورنتز $[F = e(\overline{v_e} x \overline{B})]$ تنحرف هذه الالكترونات نحو اليمين (حسب قاعدة اليد اليمنى).تعمل هذه القوة على تجميع الالكترونات في الطرف الايمن من الشريحة ليكون هذا الطرف سالب الشحنة وفي الوقت نفسه يحدث نقصا في الالكترونات في الطرف الأيسر فيكون موجب الشحنة ونتيجة لذلك يتولد مجالا كهربائيا (E_y)ينبع من الشحنة الموجبة ليصب بالشحنة السالبة نحو اليمين لينمو بالتدريج فيعمل على منع المزيد من الانحراف الجانبي للالكترونات حتى يحدث الاتزان يعرف هذا المجال بمجال هول (E_H) ويطلق على فرق الجهد بين طرفي الشريحة بجهد هول (V_H).



وللتعبير عن تأثير هول رياضيا نفرض ان كثافة التيار في شريحة الفلز هول (J_x) في اتجاه المحور $(-x)$ وان المجال المغناطيسي المؤثر (B_z) في اتجاه المحور (z) كما في الشكل.ان القوة المؤثرة على الالكترون بوجود المجال الكهربائي (E) والمجال المغناطيسي (B) تعطى بالعلاقة:

$$\mathrm{F} = e\left(E_y - v_e\, x\, B_z\right) \quad \text{.....(37)}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

وبما أن حركة الالكترون تكون في اتجاه المحور (x) فعليه تكون القوة المؤثرة على الالكترون في اتجاه المحور (y) :

$$\mathrm{F_y} = e\left(E_y - v_e\, x\, B_z\right) \quad \text{.....(38)}$$

وتصبح القوة $\left(F_y\right)$ مساوية للصفر عندما يحدث التوازن بين تأثير المجال المغناطيسي (B_z) وتأثير المجال اللكهربائي$\left(E_y\right)$ الناتج عن انحراف الالكترونات:

$$\mathrm{E_y = E_H = v_x\, B_z} \quad \text{.....(39)}$$

وهي معادلة مجال هول حيث (v_x) تمثل معدل سرعة انسياق الالكترونات بعكس اتجاه المجال الكهربائي الخارجي ، ولما كانت كثافة التيار (J_x) تعطى بدلالة سرعة الانسياق (v_x) وعدد الالكترونات لكل وحدة حجم(n):

$$\mathrm{J_x} = (-en\Delta\overline{v_x}) \quad \text{.....(40)}$$

$$\therefore \mathrm{v_x} = \frac{-J}{n\,e} \quad \text{.....(41)}$$

$$\therefore \mathrm{E_H} = \frac{-1}{n\,e}\, J_x\, B_z \quad \text{.....(42)}$$

المعادلة (42) تعني ان مجال هول يتناسب مع كل من كثافة التيار (J_x) وشدة المجال المغناطيسي (B_z) ويدعى ثابت التناسب بمعامل هول الذي يحدد نوع الاستجابة العمودية على اتجاه كل من التيار والمجال المغناطيسي أي أن :

$$\mathrm{R_H} = \frac{-1}{n\,e} = \frac{E_{H(y)}}{J_x\, B_z} \quad \text{.....(43)}$$

ان معامل هول يحدد اشارة وكثافة حاملات الشحنة فهو سالب عندما تكون الحاملات الكترونات حرة .وتزداد قيمة معامل هول بانخفاض تركيز الحاملات. عليه فهو وسيلة مهمة لمعرفة تركيز وإشارة حاملات الشحنة ولاسيما في المواد شبه الموصلة.

يمكن ربط معامل هول $(\mathrm{R_H})$مع التوصيلية الكهربائية (σ) من خلال الصيغة الرياضية التالية:

$$\therefore \mu = -\sigma\, R_H \quad \text{.....(44)}$$

Dr Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

H.W : شريط من النحاس عرضه $(1\ cm)$ وسمكه $(0.1\ cm)$ يمر خلاله تيار كهربائي شدته $(20\ Amp.)$ ،فعند تسليط مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه تساوي $(1.2\ T)$ وبصورة عمودية على سطح الشريط ظهر فرق جهد كهربائي مقداره $(18\ mv)$بين نقطتين متقابلتين على عرض الشريط .جد معامل هول(R_H) وسرعة انجراف الالكترونات(v_e) وتركيزها(n) ؟

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة :

المقاومة المغناطيسية

Magnetic resistance

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

المقاومة المغناطيسية

عند دراسة تأثير هول وجد أن كثافة التيار الكهربائي تعطى بالمعادلة:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \vec{J} + \mu(\vec{J} x \vec{B}) \quad \text{.....(45)}$$

حيث تمثل (μ) تحركية هول Hall Mobility لحاملات الشحنة وتقاس بوحدات متر مربع لكل (فولت.ثانية). التفسير الفيزيائي للحد الأول في الطرف الأيمن من المعادلة (45) التي تمثل حل معادلة النقل لبولتزمان باستخدام نظرية لورنتز وللمرتبة الأولى للمجال المغناطيسي هو أن التوصيل لغاز الكتروني على طول معدن يجب ان لا يضعف في حالة وجود مجال مغناطيسي له مركبة عمودية على كثافة التيار(J)،وهذا يشير الى انم المقاومة الكهربائية لمعدن لا تعتمد على تأثيرات المجال المغناطيسي.

اما من الناحية التجريبية فقد وجد أن المواصلة Conductance (قدرة المادة على توصيل التيار الكهربائي) تتناقص عند وجود المعدن في مجال مغناطيسي وتعرف هذه الظاهرة بتأثير المقاومة المغناطيسية وهذا يدل على نشوء مقاومة كهربائية اضافية في موصل نتيجة وجوده في مجال مغناطيسي خارجي.

اما نظريا وبموجب نظرية لورنتز فأن حل معادلة النقل لبولتزمان لرتبة أعلى من الرتبة الأولى للمجال المغناطيسي يظهر تناقصا في القدرة على توصيل التيار الكهربائي ويعتمد ذلك على مربع المجال المغناطيسي وهذا ما يتطابق مع القياسات العملية.

ان تفسير ذلك هو ان بعض الالكترونات قد تتحرك أسرع أو أبطأ من متوسط سرعة الالكترونات ولذلك فهي تسلك مسالك منحنية من احدى نهايتي الموصل الى النهاية الأخرى ،ان الانحناء أو التقوس لكثير من المسارات الالكترونية يقلل من القدرة على توصيل التيار الكهربائي حيث يعبر عن التوصيلية الكهربائية المغناطيسية بالصيغة الرياضية التالية:

$$\sigma_B = \frac{J^2\sigma}{J^2+(\sigma R_H)^2|\vec{J} x \vec{B}|^2} \quad \text{.....(46)}$$

تكون المقاومة الكهربائية المغناطيسية أعظم ما يمكن عندما يكون المجال المغناطيسي$(\vec{B})$ بكامله عموديا على اتجاه سريان التيار $(\vec{J})$،وتتلاشى المقاومة عندما يكون المجال المغناطيسي$(\vec{B})$ موازيا لكثافة التيار $(\vec{J})$ أي أن :

$$\sigma_B = \sigma \quad \text{.....(47)}$$

اخفاقات النظريات الكلاسيكية للإلكترون الحر

أولا : تفترض النماذج الكلاسيكية ان للمعادن طاقة حركية للالكترونات الحرة $\left(\frac{3}{2}nK_BT\right)$ وهذا يعني امتلاك المعدن حرارة نوعية الكترونية عالية ، إلا أن التجارب تشير الى أن الحرارة النوعية المرافقة للغاز الالكتروني تكون صغيرة جدا ، وهكذا الحال ينطبق على القابلية البارامغناطيسية العالية المتوقعة لحاملات شحنة حرة تماما .

ثانيا : ان متوسط المسار الحر المستنتج عمليا من تأثير هول والتوصيلية الكهربائية كبير جدا بالمقارنة مع الفسح بين ذرات المعدن ، وهذا يعني ضمنا عدم تصادم بعضها مع بعض أو عدم تصادمها مع لباب الأيونات

Dr.Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الموجبة وكأن الكترونات التوصيل غازا ذا دقائق عديمة التفاعل المتبادل ، وهذه الظاهرة لم تستطع تفسيرها النظرية الكلاسيكية.

ثالثا : لم تستطع النظريات الكلاسيكية تفسير الاشارات الشاذة لمعامل هول الذي اشارته سالبة دائما لكن بعض من المعادن مثل الكادميوم (Cd) والزنك (Zn)معامل هول لها ذو اشارة موجبة.

رابعا : تتنبأ النظريات الكلاسيكية بأن معامل هول له كمية ثابتة $\left(\mathrm{R_H}=\frac{-1}{n\,e}\right)$ لا تعتمد على درجة الحرارة (T) وزمن الاسترخاء (τ_r) وشدة المجال المغناطيسي المسلط $\left(\vec{B}\right)$ ،ولكن من الناحية العملية وجد أن معامل هول يعتمد على درجة الحرارة وشدة المجال المغناطيسي ومن المحتمل أيضا على زمن الاسترخاء غير المسيطر عليه عمليا.

خامسا : لم تستطع النظريات الكلاسيكية اعطاء تفسير للتصرف المعقد الذي تسلكه مقاومة المعدن تحت تأثير مجال مغناطيسي ، حيث تزداد مقاومة العناصر النادرة مثل النحاس والفضة والذهب بصورة واضحة بزيادة المجال المسلط.

سادسا : لم تفلح النظريات الكلاسيكية في تفسير اعتماد التوصيلية الكهربائية على درجات الحرارة ، حيث تتناسب التوصيلية الكهربائية مع (T^{-1}) عند درجات الحرارة العالية ومع (T^{-5}) عند درجات الحرارة الواطئة .

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة :

المقاومة المغناطيسية

Magnetic resistance

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

المقاومة المغناطيسية

عند دراسة تأثير هول وجد أن كثافة التيار الكهربائي تعطى بالمعادلة:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \vec{J} + \mu(\vec{J} x \vec{B}) \quad \text{.....(45)}$$

حيث تمثل (μ) تحركية هول Hall Mobility لحاملات الشحنة وتقاس بوحدات متر مربع لكل (فولت.ثانية). التفسير الفيزيائي للحد الأول في الطرف الأيمن من المعادلة (45) التي تمثل حل معادلة النقل لبولتزمان باستخدام نظرية لورنتز وللمرتبة الأولى للمجال المغناطيسي هو أن التوصيل لغاز الكتروني على طول معدن يجب ان لا يضعف في حالة وجود مجال مغناطيسي له مركبة عمودية على كثافة التيار(J)،وهذا يشير الى انم المقاومة الكهربائية لمعدن لا تعتمد على تأثيرات المجال المغناطيسي.

اما من الناحية التجريبية فقد وجد أن المواصلة Conductance (قدرة المادة على توصيل التيار الكهربائي) تتناقص عند وجود المعدن في مجال مغناطيسي وتعرف هذه الظاهرة بتأثير المقاومة المغناطيسية وهذا يدل على نشوء مقاومة كهربائية اضافية في موصل نتيجة وجوده في مجال مغناطيسي خارجي.

اما نظريا وبموجب نظرية لورنتز فأن حل معادلة النقل لبولتزمان لرتبة أعلى من الرتبة الأولى للمجال المغناطيسي يظهر تناقصا في القدرة على توصيل التيار الكهربائي ويعتمد ذلك على مربع المجال المغناطيسي وهذا ما يتطابق مع القياسات العملية.

ان تفسير ذلك هو ان بعض الالكترونات قد تتحرك أسرع أو أبطأ من متوسط سرعة الالكترونات ولذلك فهي تسلك مسالك منحنية من احدى نهايتي الموصل الى النهاية الأخرى ،ان الانحناء أو التقوس لكثير من المسارات الالكترونية يقلل من القدرة على توصيل التيار الكهربائي حيث يعبر عن التوصيلية الكهربائية المغناطيسية بالصيغة الرياضية التالية:

$$\sigma_B = \frac{J^2\sigma}{J^2+(\sigma R_H)^2|\vec{J} x \vec{B}|^2} \quad \text{.....(46)}$$

تكون المقاومة الكهربائية المغناطيسية أعظم ما يمكن عندما يكون المجال المغناطيسي$(\vec{B})$ بكامله عموديا على اتجاه سريان التيار $(\vec{J})$،وتتلاشى المقاومة عندما يكون المجال المغناطيسي$(\vec{B})$ موازيا لكثافة التيار $(\vec{J})$ أي أن :

$$\sigma_B = \sigma \quad \text{.....(47)}$$

اخفاقات النظريات الكلاسيكية للإلكترون الحر

أولا : تفترض النماذج الكلاسيكية ان للمعادن طاقة حركية للالكترونات الحرة $\left(\frac{3}{2}nK_BT\right)$ وهذا يعني امتلاك المعدن حرارة نوعية الكترونية عالية ، إلا أن التجارب تشير الى أن الحرارة النوعية المرافقة للغاز الالكتروني تكون صغيرة جدا ، وهكذا الحال ينطبق على القابلية البارامغناطيسية العالية المتوقعة لحاملات شحنة حرة تماما .

ثانيا : ان متوسط المسار الحر المستنتج عمليا من تأثير هول والتوصيلية الكهربائية كبير جدا بالمقارنة مع الفسح بين ذرات المعدن ، وهذا يعني ضمنا عدم تصادم بعضها مع بعض أو عدم تصادمها مع لباب الأيونات

Dr.Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الموجبة وكأن الكترونات التوصيل غازا ذا دقائق عديمة التفاعل المتبادل ، وهذه الظاهرة لم تستطع تفسيرها النظرية الكلاسيكية.

ثالثا : لم تستطع النظريات الكلاسيكية تفسير الاشارات الشاذة لمعامل هول الذي اشارته سالبة دائما لكن بعض من المعادن مثل الكادميوم (Cd) والزنك (Zn)معامل هول لها ذو اشارة موجبة.

رابعا : تتنبأ النظريات الكلاسيكية بأن معامل هول له كمية ثابتة $\left(\mathrm{R_H}=\frac{-1}{n\,e}\right)$ لا تعتمد على درجة الحرارة (T) وزمن الاسترخاء (τ_r) وشدة المجال المغناطيسي المسلط $\left(\vec{B}\right)$ ،ولكن من الناحية العملية وجد أن معامل هول يعتمد على درجة الحرارة وشدة المجال المغناطيسي ومن المحتمل أيضا على زمن الاسترخاء غير المسيطر عليه عمليا.

خامسا : لم تستطع النظريات الكلاسيكية اعطاء تفسير للتصرف المعقد الذي تسلكه مقاومة المعدن تحت تأثير مجال مغناطيسي ، حيث تزداد مقاومة العناصر النادرة مثل النحاس والفضة والذهب بصورة واضحة بزيادة المجال المسلط.

سادسا : لم تفلح النظريات الكلاسيكية في تفسير اعتماد التوصيلية الكهربائية على درجات الحرارة ، حيث تتناسب التوصيلية الكهربائية مع (T^{-1}) عند درجات الحرارة العالية ومع (T^{-5}) عند درجات الحرارة الواطئة .

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة :

دوال توزيع الطاقة

Energy distribution functions

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الجسيمات الأساسية

يتكون الجسم الصلب من عدد كبير من الجسيمات المجهرية (ذرات ،نوى ،الكترونات)،وقد صنفت الجسيمات على اساس "برمها Spin " أو لفها الذاتي ، ويحدد التصنيف طبيعة توزيع الطاقة لتكدس حشد من الجسيمات ،ويكون التصنيف للجسيمات كما يلي :

a) جسيمات متماثلة ، يكون لبرمها أي قيمة ، وتكون متباعدة عن بعضها البعض ،ويمكن التمييز بينها (كجزيئات الغاز) ،وتخضع لإحصاء ماكسويل – بولتزمان .

b) جسيمات متماثلة ، برم كل منها يساوي الصفر أو عدد صحيح من (h)، غير قابلة للتمييز بينها (كالفوتونات ،الفونونات)، تسمى البوزونات (Bosons) ، تخضع لاحصاء بوز – أنيشتاين ، ولا تخضع لمبدأ باولي (Pauli exclusion principle) .

c) جسيمات متماثلة ، برم كل منها يساوي عدد فردي من أنصاف (h)، غير قابلة للتمييز بينها (كالألكترونات ،البروتونات ، النيترونات)، تسمى الفيرميونات (Fermions)، تخضع لمبدأ باولي ، وتتميز بسلوك فردي مميز ،فإذا شغل الفيرميون حالة طاقة معينة لا يمكن لأي فيرميون آخر أن يشغل تلك الحالة وهو الفارق الأساسي بين البوزونات والفيرميونات ، وتخضع لإحصاء فيرمي – ديراك .

دوال توزيع الطاقة

تعطي دالة توزيع الطاقة $(f(E))$ احتمالية أن يكون الجسيم في حالة طاقية (E) معينة ،وهناك ثلاثة دوال لتوزيع الطاقة تصف حالات الطاقة لها الأشكال التالية :

I . دالة توزيع ماكسويل – بولتزمان (Maxwell – Boltzman distribution)

وهي توزيع كلاسيكي يصف حالات الطاقة للجسيمات التي يمكن التمييز بينها وله الشكل الرياضي المبين أدناه الشكل (1) مع شرح الرموز حيث (A) ثابت التنظيم ، (E) الطاقة التي يمتلكها الجسيم ، (K) ثابت بولتزمان ، (T) درجة الحرارة ، يسري مفعول هذا التوزيع في درجات الحرارة العالية .لا يوجد أي قيود على عدد الجسيمات التي تشغل مستوى طاقة معين .

$$f(E)_{\text{Maxwell-Boltzmann}} = \frac{1}{Ae^{E/kT}}$$

الشكل (1) : تفصيلات دالة توزيع ماكسويل – بولتزمان (Maxwell – Boltzman distribution) .

Dr. Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

II. دالة توزيع فيرمي – ديراك (Fermi – Dirac distribution)

تكمن أهمية التوزيع انه عند درجة الصفر المطلق تكون كل حالات الطاقة عند مستويات طاقة اقل من طاقة مستوى فيرمي (E_f) مشغولة بالجسيمات وما فوق ذلك المستوى تكون حالات الطاقة فارغا ويعتبر مستوى فيرمي علامة مميزة حيث تكون دالة التوزيع للمستويات تحت مستوى فيرمي تساوي الواحد (احتمال الأشغال 100%)، تخضع الجسيمات لمبدأ باولي حيث كل مستوى طاقة يكون مشغولا بجسيم واحد فقط الشكل (2).

$$f(E)_{\text{Fermi-Dirac}} = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT}+1}$$

الشكل (2): تفصيلات دالة توزيع فيرمي – ديراك (Fermi – Dirac distribution).

III . دالة توزيع بوز– اينشتاين (Bose – Einstein distribution)

لا تخضع البوزونات الى مبدأ باولي وعند الدرجات المنخفضة تسلك البوزونات سلوكا مختلفا عن الفيرميونات حيث ان عدد غير محدد يمكن أن يتواجد بنفس حالة الطاقة ، وهذا التجمع في نفس مستوى الطاقة يسمى التكاثف وهو ما يحصل في ظاهرة الموصلية الفائقة الشكل (3).

$$f(E)_{\text{Bose-Einstein}} = \frac{1}{Ae^{E/kT}-1}$$

الشكل (3): تفصيلات دالة توزيع بوز– اينشتاين (Bose – Einstein distribution).

ان دوال الطاقة السابقة تعمل على المبدأ التالي :

بفرض أن عدد الجسيمات (N) وعدد الحالات المتوفرة (G) ، فعندما يكون عدد الجسيمات أصغر بكثير من عدد الحالات أي عدد الحالات الفارغة كبير جدا هنا يكون احتمال انشغال الحالة أصغر بكثير من

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الواحد $(N/G \ll 1)$، واحتمال التقاء الجسيمات لتشغل نفس الحالة صغير مما يؤدي الى ظهور الصفة الجماعية ، والعكس عندما $(N/G \gg 1)$(بوزونات وفيرميونات) عندها تكون عدد الحالات المتوفرة من مرتبة عدد الجسيمات أو أقل ، والمشكلة تكمن في كيفية اشغال تلك الحالات فرديا أو جماعيا ،وهي مشكلة تعكس طبيعة الجسيمات التي تعرف بالمنطبقة (Degenerate)، ويزول هذا الانطباق في الدرجات الحرارة العالية وتصبح غير منطبقة (Non Degenerate)،ويطبق عليها توزيع ماكسويل – بولتزمان .

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة:

النظرية الكمية للإلكترون الحر

Quantum theory of free electrons

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

النظرية الكمية للالكترونات الحرة

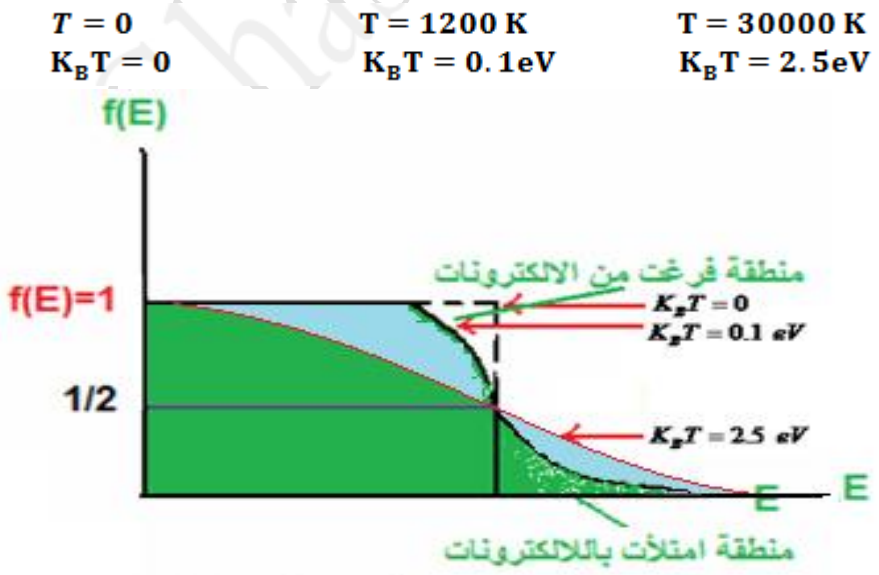
بعد اكتشاف مبدأ الاستبعاد لباولي استطاع سمر فيلد استخدام نفس فكرة الكترونات الغاز الحرة في المعادن لحل المشاكل التي عانت منها النظرية الكلاسيكية لإلكترون الحر ،التي اعتمدت على توزيع ماكسويل – بولتزمان في حين ان النظرية الكمية لسمرفيلد تبنت التوزيع الكمي لفيرمي – ديراك لجسيمات تعرف بالفرميونات تخضع لمبدأ الاستبعاد لباولي الذي ينص: على ان كل حالة (مستوى) من حالات الطاقة يشغله الكترونين ببرمين متعاكسين$(\pm 1/2)$. ان دالة التوزيع لفيرمي – ديراك تمثل احتمالية اشغال حالة ما ذات طاقة (E) ،اي عدد الجسيمات في تلك الحالة أو التوقع لاحتلال حالة كمية طاقتها (E)وتعطى بالصيغة الرياضية :

$$f(E) = \frac{1}{1+e^{\left(\frac{E-E_F}{K_B T}\right)}} \quad \text{.....(48)}$$

بموجب المعادلة (48)عند درجة حرارة $(T = 0\ K)$فان جميع حالات الطاقة لغاية$(E = \mathrm{E_F})$ تكون مشغولة تماما اي ان $(f(E) = 1)$ بينما تكون جميع حالات الطاقة $(E > \mathrm{E_F})$ فارغة أي ان $(f(E) = 0)$ ان سبب ذلك:

$$\lim_{T\to 0} exp\left(\frac{E-E_F}{K_B T}\right) = \begin{cases} 0 & f(E) = 1 \quad at\ E < E_F \\ 1 & f(E) = \frac{1}{2} \quad at\ E = E_F \\ \infty & f(E) = 0 \quad at\ E > E_F \end{cases} \quad \text{.....(49)}$$

الشكل (1) يوضح اعتماد دالة التوزيع لفيرمي – ديراك على درجة الحرارة فهناك ثلاثة قيم ل$(K_B T)$:



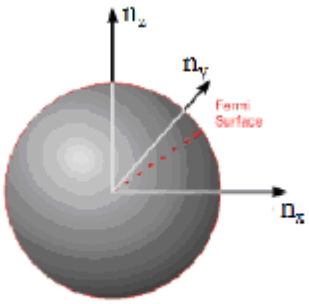
الشكل (1):شكل توزع فيرمي عند وفوق الصفر المطلق

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

حيث أن الفيرميونات عند درجة $(T = 0\ K)$ تشغل أوطأ مستويات الطاقة المتوافرة ثم تصعد حتى تصل إلى الطاقة $(\varepsilon = \varepsilon_f)$ ولذلك تمثل (ε_f) مؤشرا لأعظم طاقة للفيرميونات في المنظومة ولذلك سميت بطاقة فيرمي.حيث ان احتمالية الاشغال عند أية درجة حرارة تساوي نصفا فقط عندما تكون طاقة الالكترون مساوية لطاقة فيرمي $(\varepsilon = \varepsilon_f)$ عند تلك الدرجة .ان الدالة $(f(E))$ تبدأ بالتناقص قليلا عن ارتفاع درجة حرارة المعدن ،وتفسير ذلك انه عند ارتفاع درجة الحرارة تسمح التهيجات الحرارية باستحداث حالات اضافية للإشغال ذات طاقات اعلى من (E_F) على حساب خلو حالات ذات طاقات أقل من (E_F) .

كثافة الحالات لغاز الكتروني حر في ثلاثة أبعاد

تعرف كثافة الحالات $(D(E))$ لغاز الكتروني حر بأنها عدد الحالات الكمية الالكترونية المتوفرة لكل وحدة مدى للطاقة ، وبعبارة اخرى تمثل $(dN = D(E)\,dE)$ عدد الحالات الالكترونية المتاحة خلال مدى طاقة بين $(E$ و $E + dE)$.



الشكل (2): سطح فيرمي الكروي

ولحساب عدد الحالات الواقعة بين العدد الكمي (n) والعدد الكمي $(n + dn)$ في كرة فيرمي شكل (2)،فإذا كان $(\frac{1}{8})$ حجم الكرة التي نصف قطرها (n) فأن عدد الحالات الواقعة بين (n) و $(n + dn)$ في قشرة سمكها (dn).

$$\text{عدد الحالات} = \frac{1}{8}(4\pi n^2 dn) \quad \text{.....(50)}$$

ولما كانت العلاقة بين العدد الكمي (n) والطاقة (E):

$$E = \frac{h^2 n^2}{8mL^2} \quad \text{.....(51)}$$

$$n^2 = \frac{8mL^2}{h^2}E \Longrightarrow n = \frac{\sqrt{8mE}L}{h} \quad \text{.....(52)}$$

$$2n\,dn = \frac{8mL^2}{h^2}dE$$

$$dn = \frac{4mL^2}{n\,h^2}dE = \frac{4mL^2}{h^2\left(\frac{\sqrt{8mE}L}{h}\right)}dE \quad \text{.....(53)}$$

$$dN = D(E)dE = \frac{4}{8}\frac{8}{\sqrt{8}}4\pi\frac{m^{\frac{3}{2}}L^3}{h^3}E^{\frac{1}{2}}\,dE$$

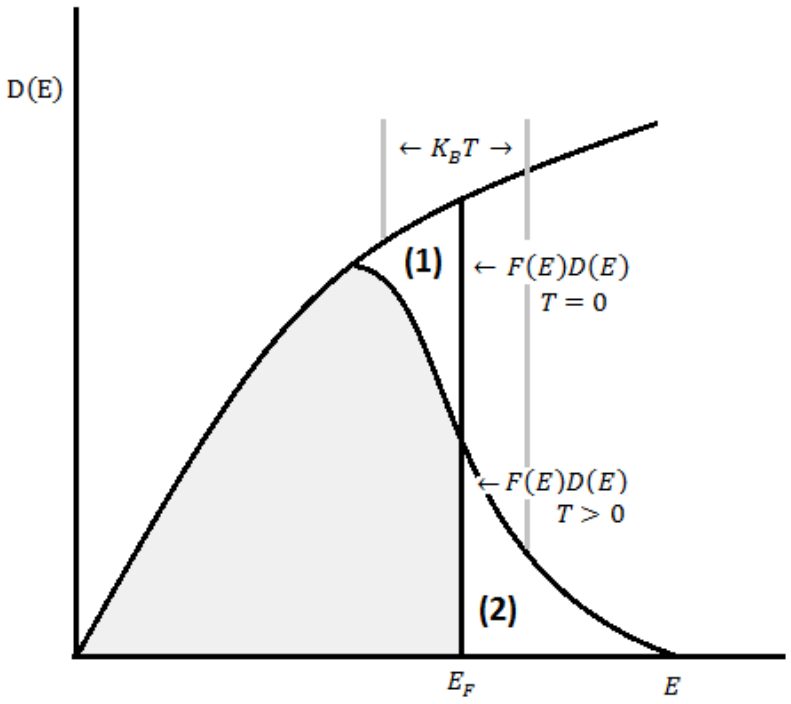
$$D(E) = \frac{4\sqrt{2}\,\pi\,m^{\frac{3}{2}}L^3}{h^3}E^{\frac{1}{2}}$$

Dr. Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عدد الحالات لكل وحدة حجم (L^3) من الغاز: $\left(D(E)=\frac{4\sqrt{2}\,\pi\,m^{\frac{3}{2}}}{h^3}E^{\frac{1}{2}}\right)$، ولما كانت كل حالة تحوي الكترونين ببرمين $(\pm 1/2)$ لذا فان عدد المراتب $\big(D(E)\big)$المتوفرة عن الطاقة (E).

$$D(E)=\frac{8\sqrt{2}\,\pi\,m^{\frac{3}{2}}}{h^3}E^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....(54)}$$

نلاحظ من الشكل (3)ان الدالة $\big(D(E)\big)$تبدأ بالتناقص قليلا عند ارتفاع درجة حرارة المعدن فوق $\big(T=0\ K\big)$، حيث تسمح التهيجات الحرارية باستحداث مراتب اضافية للإشغال اعلى من (E_F) على حساب خلو اخرى ذات طاقات أقل من (E_F)،أي أن الطاقة تزداد فتتهيج الالكترونات حراريا وتغادر المنطقة المرقمة (1) الى المنطقة (2) بحيث أن عدد الحالات التي تفرغ أو تشغر تعادل عدد الحالات التي تملأ .



شكل (3)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة :

نموذج سمرفيلد للإلكترون الحر

Summerfield's Free Electron Model

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نموذج سمرفيلد للإلكترون الحر

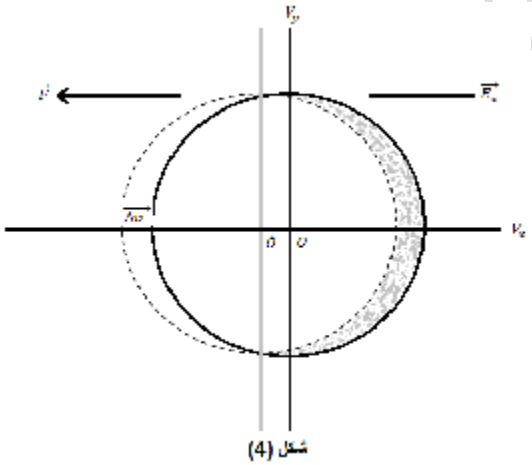
يعتبر سمرفيلد أول من طبق ميكانيك الكم على حركة الالكترونات في المواد الصلبة لمعالجة التوصيل الكهربائي في المعادن ،ويعتبر سمرفيلد رائدا لنظرية الغاز الالكتروني الحر مستفيدا من نظرية لورنتز ولكن بتطبيق احصاء فيرمي – ديراك الكمي بدلا من احصاء ماكسويل – بولتزمان الكلاسيكي. افترض سمرفيلد أن زمن الاسترخاء(τ_r) بين تصادمين متتاليين بين الالكترونات والشبيكة يمكن اعتباره دالة لطاقة الالكترونات ،فعند درجات الحرارة الاعتيادية تكون طاقة معظم الكترونات الغاز الالكتروني الحر لمعدن هي أقل من طاقة فيرمي(E_F) بعدة مرات للكمية (K_BT) و لذلك لا تستطيع تلك الالكترونات من الاستطارة بسبب التصادم لتتغير طاقتها قليلا ، حيث ان جميع الحالات الالكترونية ذات الطاقة المقاربة تكون مشغولة وان أي اشغال اضافي يكون ممنوعا بموجب مبدأ الاستبعاد لباولي،وبعبارة احرى ان استطارة الالكترون في حالة ذات طاقة واطئة يمكن ان تحدث فقط اذا كان الارتفاع الى حالة شاغرة ممكنا بالقرب من طاقة فيرمي(E_F) ،وعلى هذا الاساس يكون جزءا صغيرا فقط من الالكترونات ذات الطاقة القريبة من طاقة فيرمي (حوالي $(4K_BT)/E_F$ الكترون) مستعدا وله القابلية على الاسهام بالتصادم بحيث يكون المسار الحر (λ_F) لإلكترون يمتلك طاقة فيرمي فقط ،اي ان الالكترونات القريبة من طاقة فيرمي تتحرك بانطلاق فيرمي $\left(S(E_F)=\left(\frac{2E_F}{m}\right)^{\frac{1}{2}}\right)$ ،لذلك يعرف متوسط الزمن الحر(τ_F) بين التصادمات لالكترونات توصيل ذات طاقة فيرمي(E_F) بالصيغة الآتية:

$$\tau_F = \frac{\lambda(E_F)}{S(E_F)} \quad \text{.....(55)}$$

عندئذ يمكن التعبير عن التوصيلية الكهربائية بالصيغة:

$$\sigma = \frac{n e^2 \tau_F}{m} \quad \text{.....(56)}$$

فعلى الرغم من اشتراك جميع الكترونات التوصيل في ميكانيكية التوصيل الكهربائي نجد أن الالكترونات التي تمتلك طاقة مساوية أو مقاربة لطاقة فيرمي هي التي تسهم فقط في التوصيلية الكهربائية ،ويمكن توضيح ذلك بالاستعانة بالشكل (4) حيث تمثل الدائرة الكاملة توزيع فيرمي عند غياب المجال الكهربائي الخارجي ،وعند تسليط مجال كهربائي (E_x) باتجاه المحور السني الموجب يتزحزح توزيع فيرمي أي تتزحزح سرع جميع الكترونات دائرة فيرمي بمقدار متوسط سرعة الانسياق ($\Delta\vec{v}$)كما توضحه الدائرة المنقطة. ان تسليط مجال كهربائي قد احدث تغيرا في توزيع فيرمي (أي اختفاء حالات وظهور حالات جديدة)ولكن ذلك يحدث فقط بجوار مستوى فيرمي ولذلك تكون الالكترونات ذات الطاقة المقاربة لطاقة فيرمي فقط ذات تأثير على قيمة التوصيلية الكهربائية.


شكل (4)

ان الاختلاف بين نموذج سمرفيلد ونموذج درود للتوصيلية الكهربائية ليس بالصيغة الرياضية وإنما هو في كيفية تعريف زمن الاسترخاء،بموجب نموذج سمرفيلد ان متوسط الزمن الحر يكون مهما فقط للأقلية الصغيرة من العدد الكلي لالكترونات الغاز الالكتروني ويجب التمييز بين العدد الكبير(نموذج درود) للالكترونات الحرة في معدن والعدد القليل جدا(نموذج سمرفيلد) من الالكترونات المسؤولة عن التوصيل،في حين ان درود في نموذجه يفترض ان التيار الكهربائي يحمل بالتساوي بوساطة جميع الكترونات التوصيل التي تتحرك بسرعة صغيرة جدا هي سرعة الانسياق بينما يفترض سمرفيلد في نموذجه ان التيار يحمل بواسطة عدد قليل جدا من الالكترونات وجميعها تتحرك بسرعة عالية تعرف بسرعة أو انطلاق فيرمي. كما وان نموذج سمرفيلد يفترض ان المسار الحر ذو قيمة كبيرة مقارنة بما يفترضه درود وسبب ذلك ان الانطلاق لقلة من الكترونات التوصيل يكون اكبر بكثير من متوسط الانطلاق لتوزيع ماكسويل – بولتزمان.

وبالنسبة للموصلية الحرارية وفق نموذج سمرفيلد تعطى بالصيغة:

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$k_{el} = \frac{n\pi^2 K_B^2 T \tau_F}{3m} \quad \text{.....(57)}$$

وهي اكبر من الموصلية الحرارية (k_{el}) وفق نموذج سمرفيلد بحوالي 10% .اما عدد لورنس(L) فيعطى بالعلاقة الآتية:

$$L = \frac{k_{el}}{\sigma}\Big/_T = \frac{1}{T}\frac{\frac{n\pi^2 K_B^2 T \tau_F}{3m}}{\frac{n e^2 \tau_F}{m}} = \frac{1}{3}\left(\frac{\pi K_B}{e}\right)^2 \quad \text{.....(58)}$$

وهو كذلك أكبر من قيمة (L) بموجب نموذج درود بحوالي 10% .

إخفاقات النظرية الكمية للالكترون الحر

يعد نموذج الإلكترون الحر المكمى نموذجا خاما (غير كامل الإتقان) وتقريبا له حدوده التي يكون عندها عاجزا عن الإجابة عن بعض الأسئلة المتعلقة بالمواد الصلبة بصورة عامة وتفسير بعض الخواص المعدنية بصورة خاصة.ومن أهم الصعوبات التي واجهت نموذج الإلكترون المكمى:

أولا : عجز نموذج الإلكترون الحر المكمى عن التمييز بين الموصلات وأشباه الموصلات والعوازل.

ثانيا : افترض نموذج الإلكترون الحر المكمى أن التوصيلية الكهربائية لأي معدن تتناسب فقط هي وتركيز الالكترونات (n) حيث أن $\left(n = \frac{N}{V}\right)$ وتتساوى بقية المقادير مثل τ_m و m لكافة المعادن.

ثالثا : لا يستطيع نموذج الإلكترون الحر المكمى تفسير سبب ظهور القيم الموجبة لمعامل هول لأنه يتنبأ بقيم سالبة لمعامل هول لجميع المعادن.

رابعا : تشير كثير من خواص النقل إلى أن سطح فيرمي يكون غير كروي الشكل في أغلب الأحيان وهذا يتعارض مع تنبأ نموذج الإلكترون الحر المكمى الذي يعد سطح فيرمي سطحا كرويا.

خامسا : أهمل نموذج الإلكترون الحر المكمى الجهد الدوري للبلورة أي إهمال التفاعل بين الكترونات التوصيل والشبيكة الدورية للبلورة لذلك يدعى هذا الجهد بالجهد الدوري.

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة:

نظرية الأنطقة للمواد الصلبة

Band theory of solids

Dr. Ghassan Adnan

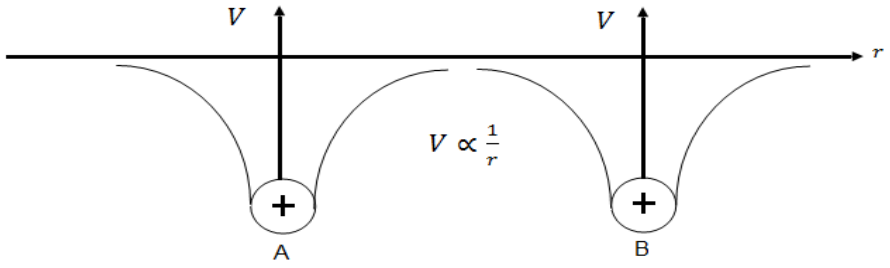
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نظرية الأنطقة للمواد الصلبة

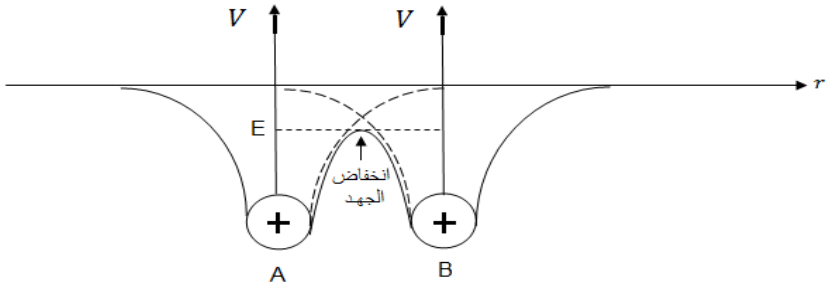
تناولنا في الفصل السابق حركة الالكترونات في المواد الصلبة باستخدام نموذج الإلكترون الحر المكمى ،وهو نموذج مبسط جدا لإهماله جهد البلورة Crystal Potential أي إهمال التفاعل بين الكترونات التوصيل والشبيكة الدورية للبلورة ، إن مبدأ تأثير جهد البلورة الدوري على الالكترونات أي تفاعل الموجات المرافقة لالكترونات التوصيل مع لباب أيونات البلورة ، يعني إن الالكترونات في البلورات ترتب أنفسها ضمن أنطقه أو حزم تسمى أنطقة الطاقة Energy Bands ،إن هذه الأنطقة تكون مفصولة بعضها عن بعض بمناطق طاقة محرمة Forbidden تمنع الالكترونات من احتلالها أو الوجود فيها وتسمى فسح الطاقة أو فجواتها Energy Gaps .

مستويات الطاقة وحزم الطاقة

من المعروف ان الالكترونات في حركتها في الذرة تستقر في أغلفة حول النواة في مجموعات أو مستويات ذات طاقة محددة ، تقل ارتباطها في النواة كلما بعدت مستويات وجودها عن مركز النواة وبذلك يسهل انطلاقها بحرية بمجال نفوذها. وفي حالة ذرة منفردة،فان الالكترون يتحرك حول النواة ويكون تحت تأثير جاذبية النواة فإذا كان لهذا الالكترون ان يتحرر من جذب النواة فعليه أن يعبر حاجز الجهد ،وهذا الجهد يتناسب عكسيا مع المسافة من النواة $\left(V \propto \frac{1}{r}\right)$ وهكذا يبدو منحني الجهد وكما هو واضح في الشكل (1a) .



(1a)

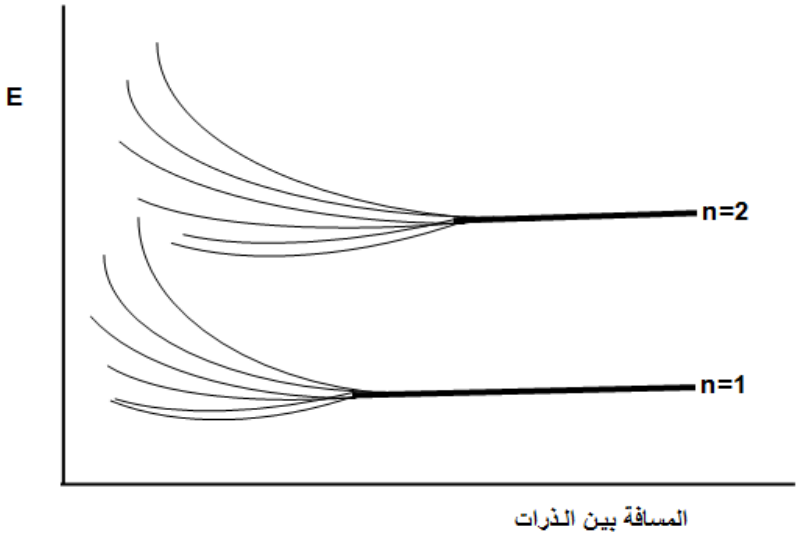


(2a)

والآن اذا الذرتان A و B وجعلناهما تقتربان الواحدة من الاخرى فأنه كلما ازداد التقارب بينهما أصبحت قوة التجاذب بين النواة الواحدة والالكترونات الاخرى أشد وينجم عن ذلك انخفاض حاجز الجهد في المجال بين الذرتين وكما يبدو ذلك في الشكل (1b)، في حين يبقى حاجز الجهد عاليا في الطرف الآخر من الذرتين. ان زيادة التقارب بين الذرتين يؤدي الى تداخل أغلفتهما وبهذا ينخفض حاجز الجهد بينهما الى الحد الذي يصبح فيه مستوي الطاقة E المبين في الشكل (1)موحدا لكل من الذرتين. فإذا كان لكل مستوى الكترون واحد فان تداخل المستويين ينجم عن مستوى الموحد للذرتين سيضم الكترونين وعندئذ يتعذر التمييز بين الكترون الذرة A و الذرة B،ان احتواء المستوي لإلكترون واحد لا يتعارض مع قاعدة الاستبعاد لباولي شرط ان يكون الالكترونين دوران برمي متعاكس$\left(S = \pm\frac{1}{2}\right)$.ولكن الصورة تختلف اذا كان مستوى الذرة المنفردة في الاصل يحتوي على الكترونين فعند تداخل الاغلفة للذرتين يصبح لدينا اربعة الكترونات في المستوي نفسه

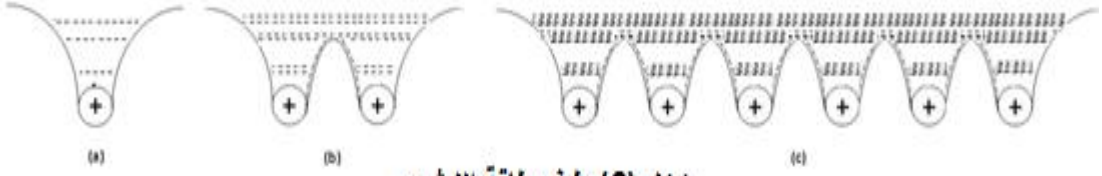
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

وعند تداخل الاغلفة لثلاثة ذرات يصبح لدينا ستة الكترونات في المستوي نفسه وعند تداخل الاغلفة لأربعة ذرات يصبح لدينا ثمانية الكترونات في المستوي نفسه وهذا يتناقض مع قاعدة الاستبعاد لباولي ولهذا يتحتم عندئذ انشطار المستوى n=1 الى مستويين متقاربين في الحالة الأولى و الى ثلاثة مستويات في الحالة الثانية والى أربعة مستويات متقاربة في الحالة الثالثة وهكذا بحيث ان كل مستوى فيه الكترونان وفي كل حالة. ويمكن تعميم هذا المبدأ عند تداخل N من الذرات في مادة فأن كل مستوى ينشطر الى N من المستويات ولكل مستوي الكترونان ،ان المستوى يتحول الى حزمة او نطاق من المستويات Level Band ولها طاقة حزمة Energy Band تقاس بالإلكترون فولت شكل (2).



شكل(2):انشطار المستويات عند تقارب الذرات.

فمن أجل توضيح ذلك لنأخذ فلز الليثيوم Li^3 مثالا حيث تحتوي ذرة الليثيوم على ثلاثة الكترونات موزعة على الاغلفة الثانوية $1S^2\ 2S^1$ وعند حل معادلة شرودنكر نحصل على مستويات طاقة منفصلة لذرة الليثيوم ويرمز لها 1S 2S 2P وكما هو مبين في الشكل (3a)،واذا أخذنا ذرتين من الليثيوم وجعلناهما يقتربان الواحدة من الاخرى لتكوين جزيئة الليثيوم Li_2 فاذا كان لكل غلاف موحد للذرتين يضم الكترونين لهما دوران برمي متعاكس $\left(S=\pm\frac{1}{2}\right)$ ،وعليه ينشطر الغلاف الموحد الى مستويين فرعيين للطاقة وكما هو مبين في الشكل (3b). يعتمد مقدار الانشطار في كل مستوى طاقة (غلاف موحد) اساسا على المسافة بين نواتي الذرتين المكونتين للجزيئة وعلى الغلاف الذري. فمثلا يكون الانشطار في الغلاف الثانوي 1S اوطأ من ذلك الانشطار للغلاف الثانوي 2S .ان تفسير ذلك ان نصف قطر الغلاف الثانوي1S يكون صغيرا جدا ، أي يكون الالكترون في هذا الغلاف مقيدا بقوة الى نواة ذرته ولا يتأثر كثيرا بالمجال الناشئ عن اقتراب ذرة من ذرة اخرى ويكون العكس صحيحا .



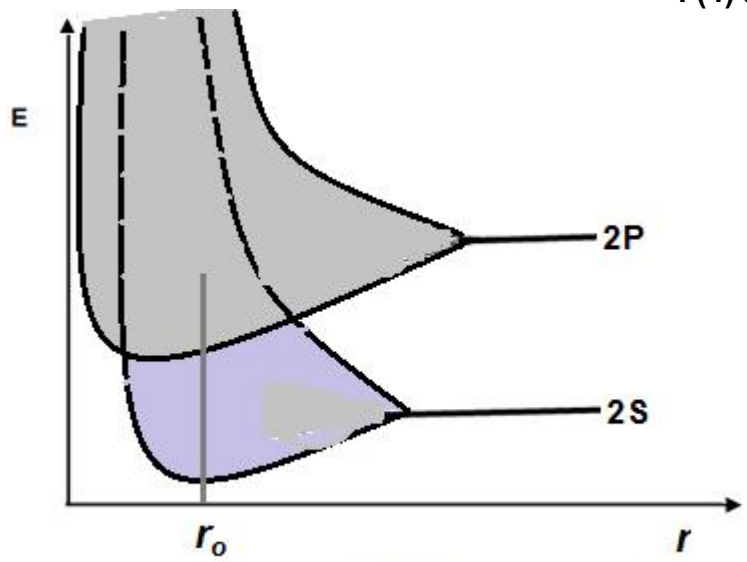
شكل (3):طيف طاقة الليثيوم.

ويمكن تعميم الاعتبارات المذكورة اعلاه لجزيئة Li المتعددة الذرات.فلجزيئة الليثيوم ذات الذرات الثلاثة ينشطر كل غلاف الى ثلاثة مستويات بينما ينشطر كل غلاف في جزيئة ذات أربع ذرات الى مجموعة رباعية.وهكذا يمكن اعتبار الليثيوم الصلب حالة نهائية عندها يصبح عدد الذرات كبيرا جدا وينتج عنها بلورة صلبة.وبموجب ما تقدم تنشطر الاغلفة الموحدة الى N من المستويات الثانوية المتقاربة بعضها مع بعض حيث N تمثل عدد الذرات التي تضمها المادة الصلبة.ولما كان عدد الذرات N في المادة الصلبة كبيرا جدا (حوالي 10^{23} ذرة لكل مول) كانت المستويات الثانوية متقاربة جدا بعضها من بعض حيث يمكنها ان تتداخل

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

بعضها ببعض لتشكل ما يسمى حزمة طاقة Energy Band ،وعلى هذا الاساس تكون كل من الاغلفة الثانوية 1S 2S 2P حزم طاقة 1S 2S 2P على التعاقب كما في الشكل (3c).

ان الفلزات في طبيعة بنيتها البلورية يحتم تقارب ذراتها من بعضها البعض بحيث لا يمكن اعتبار ذراتها معزولة عن بعضها البعض لتكون كل ذرة تؤثر بمجالها على جارتها وهذا التأثير في الحقيقة يكون متبادل فيما بينها.فبدلا من أن تحتل مستويات الطاقة المختلفة في الذرة حدودا ضيقة في حالة الذرة المعزولة نجد أن هذه الحدود أو المستويات تتوسع في حدودها كلما اقتربت ذرتان من بعضها البعض فتأخذ شكل حزم من مستويات عديدة الطاقة ، وهذه الحزم تشتد في توسعها بصفة خاصة في مستويات الاغلفة الخارجية وكما هو مبين في الشكل (4) .



الشكل(4) :اتساع المستويات 2S و2P لتكوين حزمة طاقة في البلورات.

هذا التوسع يتوقف على المسافة الذرية(r) ،فإذا كانت هذه المسافات صغيرة اشتد التوسع في كل مستوى حتى تتداخل الحزم الناتجة عنها ،بينما لو كانت المسافات كبيرة بقي التوسع في حدود ضيقة فلا يحدث التداخل بل تبقى فجوات Gaps بينها.في بعض الفلزات يكون رص الذرات فيها بدرجة كبيرة تجعل من الحزم المتكونة تقترب من بعضها البعض فتتضاءل الفجوات وقد يحدث تداخل بين الحزم ،وفي هذه الحالة لا يبذل الغاز الالكتروني اي مجهود لإيجاد مسارات له اذ ان الحزمة الثانية متصلة وتندرج مستويات طاقتها مع مستويات الحزمة الاولى وبالتالي يتصف الفلز بأنه جيد التوصيل الكهربائي.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة:

نظرية الإلكترون شبه الحر

Nearly Free –Electron Theory

Dr. Ghassan Adnan

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نظرية الإلكترون شبه الحر

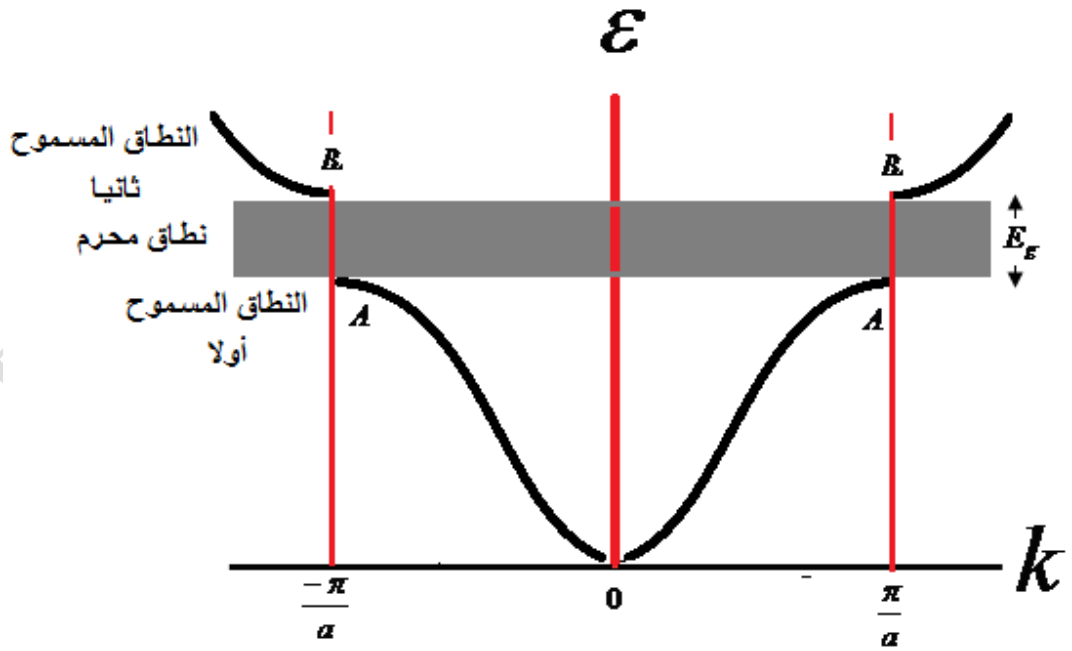
يوصف تركيب أنطقه الطاقة في بلورة غالبا باستخدام نموذج الإلكترون شبه الحر **Nearly Free Electron Model (–)**. إن هذا النموذج يجيب على معظم الأسئلة حول سلوك الالكترونات في المعادن على الرغم من أن هنالك حالات يكون فيها نموذج الإلكترون شبه الحر غير قابل للتطبيق.

يفترض نموذج الإلكترون شبه الحر لحالات إلكترون في صلب حدوث قليل من التشويش **Perturbation** في طيف الحالات الالكترونية لإلكترون حر تماما. يعزى هذا التشويش الضعيف إلى الجهد الدوري للباب الأيونات الموجبة والتراكب القوي (جدير بالاعتبار)بين الذرات المتجاورة الذي يفرض بالقوة كنتيجة لصغر الفسح التي تفصل بين الذرات .والتفسير الأولي لهذه الفرضيات بالنسبة إلى غاز الكتروني في معدن ،على اعتبار أن اللباب الذرية هي مناطق ذات طاقة كامنة سالبة مقارنة بالطاقة الكامنة الالكترونية للمناطق التي تفصل تلك اللباب.ووفقا إلى قانون حفظ الطاقة الكلية يجب أن يتحرك إلكترون ما بسرعة اكبر مما هي عليه (يمتلك طاقة حركية كبيرة)عندما يمر من خلال منطقة اللب الذري .

إن الطاقة الكلية لإلكترون بموجب نموذج الإلكترون شبه الحر ليست حركية تماما.كما هو الحال لإلكترون حر تماما .بسبب الطاقة الكامنة لايونات الشبيكة،إن النتيجة المهمة هي أن الطاقة الحركية لإلكترون شبه حر تعاني من انقطاع أي حدوث فجوة عند قيم محددة لمتجه الموجة $\left(\vec{k}\right)$ لشبيكة خطية ثابتها (a) كالآتي:

$$k = \pm \frac{j\pi}{a}, \; j = 1,2,3 \ldots \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

بينما لا يعاني منحني الطاقة الحركية لإلكترون حر تماما مثل هذه الانقطاعات كما في الشكل (1) ولاحظ الشكل (2)



الذي يوضح تغير الطاقة الحركية (ε) بوصفها دالة لمتجه الموجة $\left(\vec{k}\right)$ لإلكترون شبه حر في شبيكة خطية أحادية الذرات ثابت فسحها البينية (a) ويظهر تأثير الشبيكة على حركة الإلكترون وذلك بتوليد

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

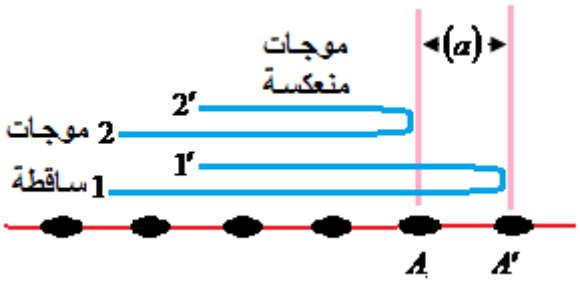
فسحة طاقة (E_g) حيث يقتصر ذلك فقط عندما تقترب $\left(\vec{k}\right)$ من $\left(\pm\frac{\pi}{a}\right)$ أو مضاعفاتها الصحيحة $\left(\pm j\frac{\pi}{a}\right)$ حيث يكون تشويش الشبيكة على الإلكترون عند نهايته العظمى ومن ناحية أخرى تتحرك الالكترونات بحرية تامة خلال الشبيكة عند قيم اصغر من $\left(+j\frac{\pi}{a}\right)$ واكبر من $\left(-j\frac{\pi}{a}\right)$ لانعدام التشويش أو مقاومة الشبيكة.

انعكاس براك ومنشأ فسحة الطاقة

يمكن اعتبار حركة الالكترونات شبه الحرة في شبيكة خطية ثابتها (a) وعند حافات فسح الطاقة $\left(k = \pm\frac{j\pi}{a}\right)$ مشابها لاستطارة الموجة الكهرومغناطيسية بوساطة الذرات في الشبيكة ،حيث تنشأ تقوية الموجات المستطيرة عندما يتحقق شرط براك للحيد القوي :

$$n\lambda = 2a\ Sin \quad \text{..... (3)}$$

حيث (a) تمثل البعد البيني بين السطوح و (θ) تمثل الزاوية التي يصنعها اتجاه انتشار الموجة مع سطوح الشبيكة و (n) يمثل أي عدد صحيح .وعند انتشار الموجة مع سطوح الشبيكة بعد سقوطها عموديا أي $(\theta = 90^{o})$ لذلك يصبح شرط براك $(n\lambda = 2a)$ ،فمثلا عند انعكاس الموجات $(2,1)$ عند ذرات (أيونات) متعاقبة مثل A', A كما في الشكل (3) .



فأن فرق المسار بين الموجات المنعكسة يساوي $(2a)$ وفرق الطور بينهما يساوي $\left(2\pi\frac{2a}{\lambda}\right)$. إن أعظم تداخل تقوية بين الموجات المنعكسة $(2',1')$ تحدث فقط عندما يكون فرق الطور بينهما مساويا $(\pm 2n\pi)$ أو $(\pm 2j\pi)$ أي عندما :

$$\pm\ 2\ j\pi = 2\pi\ \frac{2\,a}{\lambda} \quad \text{..... (4)}$$
$$\pm\ j\lambda = 2\,a$$

Dr. Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

أي يتحقق قانون براك ،ولما كانت $\left(\lambda = \frac{2\pi}{k}\right)$ كان $\left(k = \pm j\frac{\pi}{a}\right)$ وهذا يتفق مع المعادلة (2)

نستنتج مما تقدم انه عند قيم $\left(k = \pm j\frac{\pi}{a}\right)$ تعاق حركة الالكترونات باتجاه معين حيث تجبر على الحركة بالاتجاه المعاكس نتيجة تعرضها لانعكاس براك ويتكرر عكس اتجاه الانتشار كلما تكرر انعكاس براك .ان ذلك يعني ان الدالات الالكترونية عند حافة أية فسحة للطاقة تكون موجات واقفة وليست منتقلة لأنها تحقق شرط براك للحيد القوي الذي يمكن التعبير عنه بدلالة متجه الموجة $\left(\vec{k}\right)$ ومتجه الشبيكة المقلوبة $\left(\vec{G}\right)$ كالآتي:

$$2\,\vec{k}\cdot\vec{G} + G^2 = 0 \quad \text{.....(5)}$$

فضلا عن الصيغة المكتوبة في المعادلة (3)والمكافئة لها ،ولما كان متجه الشبيكة المقلوبة $\left(\vec{G}\right)$ لشبيكة خطية (ذات بعد واحد) ثابتها (a) يساوي $\left(j\frac{2\pi}{a}\right)$ كان :

$$\vec{k} = \pm\frac{1}{2}G = \pm j\frac{\pi}{a} \quad \text{.....(6),}$$

للتمثيل على ذلك إن أول انعكاس (وظهور أول فسحة طاقة)يحدث عند $\left(k = \pm\frac{\pi}{a}\right)$ وينشأ بسبب أن الموجة المنعكسة عن ذرة ما في شبيكة خطية تعاني من تداخل تقوية بفرق طور (2π) مع الموجة المنعكسة من ذرة أخرى مجاورة لها أولا .أن الحل بالنسبة للقيمة $\left(k = \pm\frac{\pi}{a}\right)$ يتضمن مركبتين متساويتين من الأمواج المنتقلة نحو اليسار $\left(k = -\frac{\pi}{a}\right)$ ونحو اليمين $\left(k = +\frac{\pi}{a}\right)$ وان جمعهما لا يؤدي إلى دالات موجية منتقلة كما هو الحال بموجب الإلكترون الحر بل يؤدي إلى دالات لموجات واقفة .ان مدى قيم $\left(\vec{k}\right)$ بين $\left(+\frac{\pi}{a}\right)$ و $\left(-\frac{\pi}{a}\right)$ يشكل منطقة برليون الأولى لهذه الشبيكة أما المنطقة المحددة لقيم $\left(\vec{k}\right)$ بين $\left(\frac{-2\pi}{a}\right)$ و $\left(-\frac{\pi}{a}\right)$ وكذلك بين $\left(+\frac{\pi}{a}\right)$ و $\left(+2\frac{\pi}{a}\right)$ فتشكل منطقة برليون الثانية وهكذا .....بقية المناطق.

دالات بلوخ

يحدد سلوك إلكترون التوصيل في صلب متبلور بدراسة معادلة شرودنكر وإيجاد حلولها المناسبة .وتتطلب كتابة معادلة شرودنكر لإلكترون توصيل تحديد الجهد الكلي المؤثر في ذلك الإلكترون والتغير المكاني لذلك الجهد.ويدعى الجهد الكلي عادة جهد البلورة $V(\vec{r})$.قام فيلكس بلوخ بدراسة جهد البلورة وأستنتج أن $V(\vec{r})$ يتضمن جزأين أساسيين هما:

Dr. Ghasan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

أولا: جهد كهروستاتيكي $V(\vec{r})_i$ ينشأ عن تفاعل إلكترون توصيل مع جميع لباب الايونات التي تؤلف شبيكة البلورة.إن هذا الجزء من جهد البلورة $V(\vec{r})$ يجب أن يمتلك الدورية الانتقالية للشبيكة المثالية نفسها (أي عند إهمال اهتزاز لباب الأيونات).

ثانيا : جهد $V(\vec{r})_e$ ينشأ من تفاعل إلكترون التوصيل وبقية الكترونات التوصيل (الكترونات بلوخ)المتحركة خلال شبيكة البلورة.لقد افترض بلوخ إن إسهام هذا الجزء في جهد البلورة $V(\vec{r})$ يجب أن يكون جهد دوريا (مثل إسهام الجزء الأول) لكي تتحقق متطلبات التعادل الكهربائي في البلورة .وعلى هذا الأساس يعطى جهد البلورة كالآتي:

$$V(\vec{r}) = V_i(\vec{r}) + V_e(\vec{r}) \quad \text{.....(7)}$$

وبموجب فرضيات بلوخ ،وبعد استخدام الطاقة الكامنة الكلية الدورية لإلكترون التوصيل $\left[U(\vec{r}) = -eV(\vec{r})\right]$ تكتب معادلة شرودنكر في فضاء ثلاثي الأبعاد ولإلكترون واحد كالآتي:

$$\left[\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\right)V^2 + U\left(\vec{r}\right)\right]\psi = \varepsilon\psi \quad \text{.....(8)}$$

ولها دورية الشبيكة ذاتها .لقد استنتج بلوخ أن الحلول الممكنة لمعادلة شرودنكر (الدالات الموجية التي تحقق معادلة شرودنكر والخاضعة لجهد دوري)يجب أن تكون بالصيغة الخاصة الآتية:

$$\psi_k(\vec{r}) = U_k(\vec{r})\exp\left(i\vec{k}.\vec{r}\right) \quad \text{.....(7)}$$

أي أن الحلول تكون موجات مستوية ومعدلة بوساطة $U_k(\vec{r})$ وهي دالة تعتمد على قيمة متجه الموجة $\left(\vec{k}\right)$ (الذي ينسب عادة إلى زخم الإلكترون) فضلا عن امتلاكها دورية الشبيكة وهذا يعني أن :

$$U_k\left(\vec{r}\right) = U_k\left(\vec{r} + \vec{T}\right) \quad \text{.....(8)}$$

حيث $\left(\vec{T}\right)$ تمثل المتجه الانتقالي أو ألزخمي للشبيكة ،ومن ناحية أخرى لما كان إلكترون التوصيل يسلك سلوك موجة فأنه ذات متجه موجة $\left(\vec{k}\right)$ رافقه طول موجة ديبرولي أي $\left(\lambda = \frac{2\pi}{k}\right)$ وزخم ديبرولي $\left(\vec{P} = \hbar\vec{k}\right)$ حيث يدعى الزخم $\left(\vec{P}\right)$ الزخم البلوري الالكتروني.

Dr Ghassan Adnan
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة :

العيوب البلورية

Crystal Defects

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

العيوب البلورية Crystal Defects

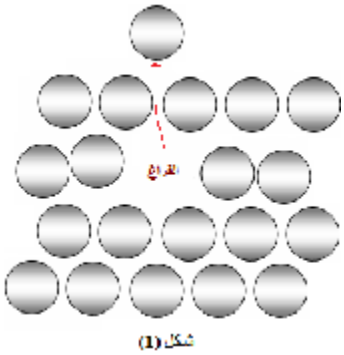
في البلورات المثالية تترتب الذرات بشكل دوري منتظم من دون أي خلل أو عيب إلا انه في الحقيقة لا توجد بلورة خالية من العيوب ،ان المقصود بمصطلح العيب في فيزياء الحالة الصلبة بأنه انحراف أو اختلال في استمرارية الترتيب المنتظم للذرات في الشبيكة ،أي عدم الانتظام في البنية البلورية،تظهر العيوب البلورية على عدة أشكال والشائع منها:

١-العيوب النقطية: مثل الفراغات ،الذرات الإضافية،عيوب شوتكي ،عيوب فرنكل.
٢-العيوب الخطية:مثل الانخلاع الحافي والانخلاع ألبرمي.
٣-العيوب السطحية:مثل خلل التراص،الحدود الحبيبية ،التوائم.
٤-العيوب الحجمية:مثل عناقيد كبيرة لعيوب نقطية.

العيوب النقطية Point Defects

يعرف العيب النقطي على انه انحراف او اختلال في موقع ذرة او مواقع عدد قليل من الذرات المتجاورة.إن سبب تسميته بالعيب النقطي لحدوثه في منطقة صغيرة جدا إذا ما قورنت بحجم البلورة ،لهذا تعد هذه المنطقة كنقطة في فضاء كبير.

إن العيوب النقطية إما أن تكون نتيجة فراغات Vacancies أو نتيجة ذرات إضافية Extra Atoms داخل البنية البلورية.



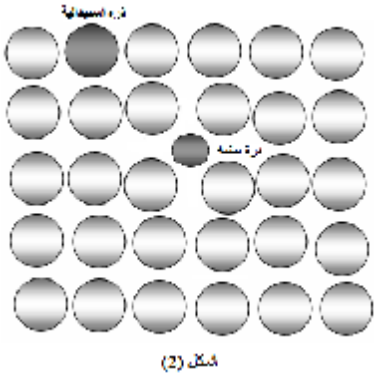
شكل (1)

الفراغات Vacancies

إن ابسط أنواع العيوب النقطية هو الفراغ وهو عبارة عن حيز الذرة المفقودة ضمن الترتيب المنتظم للذرات في الشبيكة كما في شكل (1) وقد يحدث هذا النوع نتيجة لخلل في الرص الذري أثناء عملية النمو البلوري Crystal Growth للمادة او من جراء التذبذب الحراري للذرات حول مواقعها في الشبيكة عند درجات الحرارة العالية فمن المحتمل أن تزاح الذرة عن مكانها تاركة فراغا.

الذرات الإضافية Extra Atoms

إن النوع الآخر من العيب النقطي هو وجود ذرات إضافية داخل البنية البلورية و يطلق عليها بالشوائب . إن الذرة المضافة يمكن لها أن تحتل موقعين متميزين في داخل الشبيكة .فإذا احتلت الذرة الإضافية موقع الذرة الأصلية فإنها تدعى عندئذ بالذرة الاستبدالية أما إذا احتلت الذرة الشائبة موقع بيني الذرات الأصلية فأنها تدعى حين ذاك بالذرة البينية وكما هو واضح من الشكل(2) ،أن الذرات البينية تكون على نوعين فإما أن تكون من نفس النوع من ذرات الشبيكة ويتم ذلك بإزاحة الذرة الأصلية من موقعها الأصلي إلى موقع بيني أوان تكون من نوع آخر يختلف عن الذرات الأصلية للبنية البلورية .ويتم إضافة الشوائب إلى البنية البلورية بطرق دقيقة جداً لإضافة

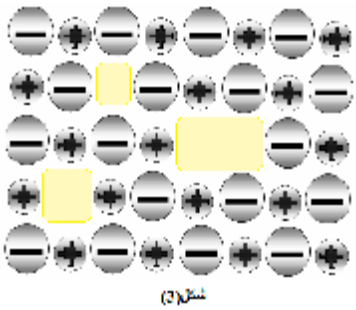


شكل (2)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

الشوائب أهمها طريقة النمو البلوري أو باستخدام طريق الانتشار .وهناك طريقة متطورة دقيقة جداً لإضافة الشوائب يطلق عليها طريقة الغرس الأيوني .تعتمد مواقع الذرات البنية على نوع رص الذرات أو الايونات المكونة للبنية البلورية .ففي المواد الصلبة ذات الرص المحكم من الصعب جداً أن تحتوي بنيتها على ذرات بينية وذلك لصغر الحيز بين الذرات حيث لا يمكن أن يستوعب ذرة إضافية ومن أمثلة ذلك النحاس والخارصين .أما في الرص غير المحكم للذرة الشائبة أن تحتل مكان بينياً خاصة إذا كان حجمها صغيراً أي بنصف قطر A 0.8 .

عيوب شوتكي Schottky Defect

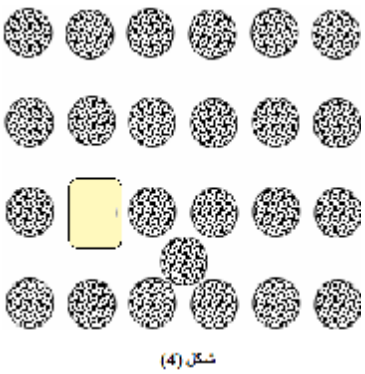


يعرف عيب شوتكي على أنة فقدان إحدى الذرات من موقعها الأصلي تاركة وراءها حيز من الفراغ وكما هو واضح من الشكل (3) ويحدث عيب شوتكي عادة في البلورات الأيونية مثل كلوريد الصوديوم . أن حدوث الفراغات في داخل البلورة يؤدي إلى تغير الطاقة الحرة والتي تعتمد بدورها على تغيير كل من الطاقة الداخلية و الانتروبي.أن المقصود بالطاقة الداخلية هنا في E_P طاقة تكوين زوج من الفراغات فعلية تعرف طاقة التكوين على إنها الطاقة اللازمة لتكوين زوج من الفراغ الموجب والسالب فإذا كانت الطاقة اللازمة لتكوين زوج واحد من الفراغ الموجب و السالب في بلورة كلوريد الصوديوم NaCl هي (2 ev) فيكون عدد الفراغات عند درجة حرارة الغرفة تبعاً للمعادلة:

$$n = N\ e^{-\frac{E_P}{2K_BT}}$$

مساوياً إلى 10^{12} فراغاً لكل متر مكعب.بينما يكون عدد ايون الصوديوم Na وعدد ايون الكلورCL في المتر المكعب مساويا (2.2×10^{28}) لذا فان هناك فراغ واحد لكل 10^{16} أيون .ويزداد عدد الفراغات بازدياد درجة الحرارة . فإذا كان عدد الفراغات عند درجة الحرارة 300K هو 10^{12} فأن عددها سيكون عند 900K ب 10^{22}.

عيوب فرنكل Frenkel Defect



يعرف عيب فرنكل على انه إزاحة أحدى الذرات من موقعها الأصلي إلى موقع بيني تاركه ورآها حيزاً من الفراغ وكما هو واضح في الشكل (4). يحدث عيب فرنكل عادة في البلورات الفلزية وبلورات أشباه الموصلات. أن هناك عيبين يحدثان في البلورة في وقت واحد هما تكوين فراغاً وذرة بينية عندما تزاح الذرة الأصلية من موقعها الأصلي إلى موقع بيني داخل البنية البلورية أن حدوث أزواج من (فراغ - ذرة بينية) في داخل البلورة يودي إلى تغير الطاقة الحرة والتي تعتمد بدورها على تغيير كل من الطاقة الداخلية والانتروبى إن الطاقة الداخلية في عيوب فرنكل تتمثل بطاقة تكوين فرنكل E_i والتي تعرف على إنها الطاقة

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

اللازمة لإزاحة ذرة عن موقعها الأصلي إلى الموقع بيني.وعلى فرض أن الذرة البينية يمكن لها أن تحتل موقع واحد من المجموع الكلي N_i للموقع البنية لذا فأن معادلة فرنكل تعطى بالعلاقة:

$$n = \sqrt{N\ N_i}\ e^{-\frac{E_i}{2K_BT}}$$

عيوب الشبيكة Lattice Defect

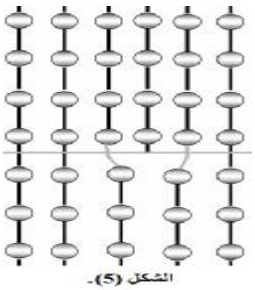
عرفنا أن العيب النقطي يحدث في موقع ذرة أو في موقع عدد قليل من الذرات .أما إذا امتد الاختلال أو العيب ليشمل مساحات عديدة من البلورة فيسمى عندئذ بالعيب الشبيكي . تنقسم العيوب الشبيكة إلى نوعين: ١)العيب الخطي .
٢)العيب السطحي.

العيب الخطي Line Defect

عرف بهذا الاسم نتيجة لطبيعة تطوره أو سريانه التي تكون على امتداد مسارات خطية . وعلية فان البلورات لا تكون مثالية بل يمكن أن تحوي في بنيتها عيوباً خطية تعرف بالانخلاعات و التي تؤثر بصورة كبيرة على الخواص الميكانيكية للمادة الصلبة حيث تضعف من مقاومة المادة تحت تأثير الإجهاد كثيراً ويتم تقسيم الانخلاع إلى نوعين :

١- الانخلاع الحافي .
٢- الانخلاع اللولبي .

الانخلاع الحافي Edge Dislocation

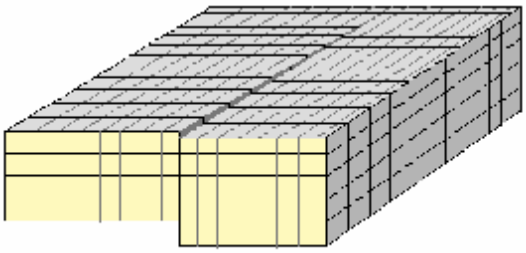

الشكل (5)

يطلق على الانخلاع الحافي باسم انخلاع (تايلور- اوران) والذي يمكن أن يوصف على انه صف من الذرات يميز حدود حافة جزء من المستوى الذي امتد خارج البلورة وكما مبين من الشكل يرمز للانخلاع الحافي بحرف L والذي يسمى بمتجه بيرجيرز وهذا المتجه يشكل زاوية قائمة مع خط الانخلاع في الانخلاع الحافي وكما هو واضح من الشكل (5).

الانخلاع اللولبي Scraw Dislocation

إن ابسط تعريف للانخلاع ألبرمي هو إزاحة جزء من شبكية بالنسبة إلى جزئها الأخر ويكون متجه الإزاحة متجه بيرجيرز موازي إلى خط الانخلاع ، ويطلق على هذا الانخلاع بانخلاع بيرجرز والذي يمكن أن يوصف على انه صف من الذرات المستوي البلوري حوله مساراً لولبياً ،وبتعبير آخر يدل انخلاع ألبرمي على الحد الفاصل بين الأجزاء المنزلقة وغير المنزلقة لبلورة مثالية عندما يكون هذا الحد موازيا إلى اتجاه الانزلاق وعلى عكس الانخلاع الحافي حيث يكون هذا الحد عموديا على اتجاه الانزلاق كما هو واضح من الشكل (6).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



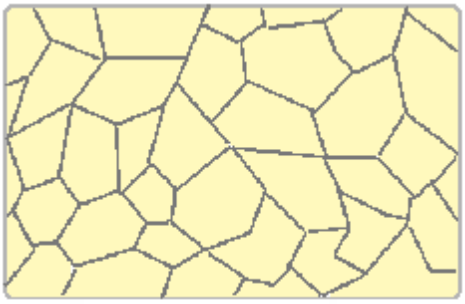
الشكل (6)

العيب السطحي Surface Defect

سمي هذا العيب بهذا الاسم لأنه ينشا من تجمع العديد من العيوب الخطية مكونة سطح من العيوب مثال ذلك حدود الحبيبات وخلل التراص و التوائم.

حدود الحبيبات Grains Boundary

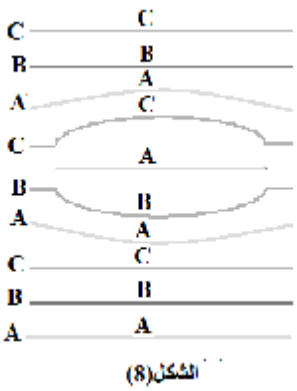
بعض المواد الصلبة لا تتكون بنيتها من بلورة واحدة بل من عديد من البلورات صغيرة الحجم والتي يطلق عليها بالحبيبات . وان كل حبيبة داخل بنية المواد الصلبة تختلف في اتجاهها وحجمها وشكلها و بعدها عن جارتها و بالتالي لابد أن يفصلها عن بعضها البعض حدود فاصله يطلق عليها بحدود الحبيبات كما هو واضح من الشكل (7). تعتبر حدود الحبيبات كمناطق انتقالية تكون الذرات فيها غير مقترن مع أي من البلوريتين المتجاورتين وينتج عن ذلك مقاومة إضافية للمواد حيث يقل التوصيل الكهربائي فيها.



الشكل(7)

خلل التراص Stacking Fault

يعد خلل التراص من العيوب التي تحدث نتيجة لعدم استمرارية تعاف المستويات بسبب خلل في ترتيب الذرات ذات النوع الواحد أو أكثر من نوع فلو فرضنا وجود عدد n من الطبقات التي تتكون من نوع A من الذرات وعدد (n+1) من الطبقات التي تكون من النوع B فعلية يكون تعاقب الطبقات عند أنحاء البلورة على هذا النحو AB AB AB فإذا حدث خلل في ترتيب الطبقات فان احد الطبقات التي ذراتيها من النوع c الموجودة داخل المادة الصلبة كشوائب تنمو بين الطبقات n و n+1 على هذا النحو : AB ABC AB AB ABC AB AB وبهذا تكون الطبقة C هي خلل التراص كما هو واضح من الشكل(8).



الشكل(8)

التوائم Twins

تعد التوائم من العيوب السطحية الشائعة والتي تحدث نتيجة لعدم استمرارية دورية الشبيكة وتعد عملية تكوين التوائم نمطاً من أنماط التشويهات اللدنة وتلاحظ خاصة في بنيات

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

البلورات التي تنتمي إلى المواد البلورية المكعبة ذات الأوجه المتمركزة(F.c.c) فخلال عملية تكوين البلورات التواؤمية تحدث إزاحة صغيرة بين المستويات العديدة المجاورة إن الجزء المشوه من البلورة له تماثلاً مرآتي مع الجزء غير المشوه كما هو في الشكل(9) يتم حدوث عملية التوأمة بالطرق التالية :

١)تتم بطريقة النمو البلوري وتعرف عندئذ بالتوائم النامية
٢)تتم بطريقة التشويه الميكانيكي كالطرق أو الضغط وتسمى بالتوائم المشوهة
٣)يتم حدوث التوأمة عند صهر المادة وإعادة نموها إن مقدار التشويه في الشبيكة البلورية عند الحدود التوأمة يكون بسيطاً لذا تكون طاقة الذرات فيه قليلة تظهر الحدود التوأمة في بعض السبائك بصورة خاصة مثل سبيكة النحاس الأصفر .إن التشوه ألتوأمي أهمية كبيرة في الفلزات مثل الخارصين و المغنسيوم التي يصعب فيها الانزلاق اللدن.

العيوب الحجمية Volume Defect

تمتد هذه العيوب خلال حجوم صغيرة في بلورة، وللتمثيل على ذلك عناقيد كبيرة لعيوب نقطية أو خلوات مقفلة وأنواع أخرى لشوائب دخيلة (inclusions). وتكون جميع البلورات الحقيقية مؤلفة من بلورات مجهريه (microcrystal) صغيرة أو حقول (domains) كل منها قد تكون مثالية تقريبا أو تمتلك أنواعا مختلفة من العيوب . إن حافة كل حقل قد تتغير من بضع مئات من الانكستروومات إلى بضع سنتمترات .ويكون هذا النوع من العيوب مهما في دراسات مثل الانصهار وانتقالات متعددة الشكل البلوري (polymorphic transitions) واستطارة الأشعة السينية فضلا عن تأثيراتها في المواد الصلبة الفيرومغناطيسية.

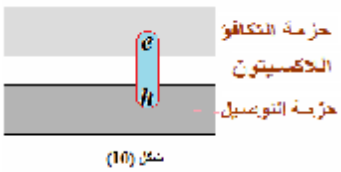
مفاهيم خاصة

البولارون Polaron

عبارة عن إلكترون يرافقه تشوه مرن في البلورة فعند تفاعل الإلكترون في شبيكة البلورة مع ذرات وايونات تلك الشبيكة بواسطة شحنته الكهربائية فانه يسبب تشوه مرنا (استقطاب) موضعيا في شبيكة البلورات الأيونية ،وان هذا التشوه يحاول مرافقة الإلكترون المتحرك ،حيث يتحرك هذا التشوه ضمن البلورة وعليه فان الجمع بين الإلكترون والتشوه المرن (أو مجال الإجهاد الناتج من التشوه)يسمى البولارون.

الاكسيتونات Excitons

يعرف على انه موجة استقطاب تنتج من ترابط بين إلكترون في نطاق حزمة التوصيل وفجوة في نطاق حزمة التكافؤ .إن طاقة الفوتون اللازمة لتوليد هذا الزوج تكون اقل من فجوة الطاقة ،وحيث إن الالكترونات والفجوات متعاكسة الشحنة فان كلا منهما يتحرك في المجال الكهروستاتيكي للآخر ولذلك فان احدهما يجذب الآخر بقوة كولوم فينشا عن ذلك زوج مقيد كما هو واضح في شكل (10) ،وفي هذه الحالة يدور الجسيمان (الإلكترون – فجوة) حول مركز كتلتيهما المشترك بزخم زاوي مكمم يعرف مثل هذا الزوج بالاكسيتون.



شكل (10)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عنوان المحاضرة:

عمق الاختراق

Penetration depth

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

عمق الاختراق Penetration depth (λ)

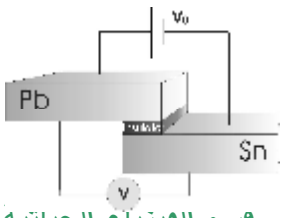
تتضمن ظاهرة مازنر بانعدام الفيض المغناطيسي (B) داخل جسم في حالة التوصيل الفائق عندما يتعرض لمجال مغناطيسي خارجي أو مجال مغناطيسي داخلي ناشئ عن مرور تيارات سطحية ولكن المشاهدات العلمية نصت أن المجال المغناطيسي الخارجي يستطيع النفاذ داخل طبقة رقيقة جدا في القشرة الخارجية للجسم يعبر عن سمكها بما يسمى بثابت عمق الاختراق والذي يرمز له بالرمز (λ) وقد وجد أن قيمة (B_{in})داخل الجسم يقل أسيا مع المسافة (x)على النحو التالي ($B_{in}=B_a\ e^{-x/\lambda}$) وبالتالي فان الثابت ($\lambda$) يعبر عن سمك القشرة الخارجية التي يقل عندها الفيض الداخلي إلى مقدار يساوي ($1/e$) من الفيض الخارجي المؤثر على الجسم ونظرا لان (λ) صغيرة جدا تساوي تقريبا (1×10^{-8} m) فنجد أن الفيض ينعدم تقريبا عند مسافات صغيرة جدا . لذلك أشار مازنر إلى انعدام الفيض داخل الأجسام في الحالة (S.C) .

ظاهرتا الطفو والتعليق المغناطيسيتان

نتج من جراء رفض الموصلات الفائقة للمجالات المغناطيسية وتمغنطها المعاكس ظاهرتا الطفو والتعليق على الترتيب. إن ظاهرة الطفو تحصل عندما يتم محاولة وضع قطعة مغناطيس في أعلى موصل فائق أو العكس. سوف يظل الجسم العلوي معلقاً في الهواء (طافياً) سواء كان المغناطيس أو الموصل نفسه. أنظر الشكل . وأما في ظاهرة التعليق فيتم تقريب مغناطيس دائم من قطبه الجنوبي إلى الموصل أولاً مع إرغام الأخير على عدم الحركة. يؤدي ذلك إلى تمغنطه سلباً، ثم يتم إبعاد المغناطيس الدائم بسرعة معينة .أثناء ذلك تنعكس مغناطيسية الموصل الفائق (بسبب المجال المغناطيسي المحتبس حوله) فتنجذب لقطب المغناطيس الجنوبي. لقد أوقع المغناطيس الموصل في حباله أولاً ثم انسحب فلحق به الموصل راغباً في القرب منه، إن وضع الموصل في هذه الحال مختلف تماماً عن قطعة مغناطيس بقرب مغناطيس آخر حيث يؤدي ذلك – كما هو معروف – إلى انجذاب بعضهما لبعض والتصقهما أخيراً . أما في حالة الموصل والمغناطيس؛ فتقل القوة الجاذبة لدى الموصل كلما اقترب من المغناطيس وتزيد كلما ابتعد فيظل في مكان محدد لا يتعداه معلقاً في الهواء لا هو قادر على الاقتراب ولا على الفراق.

ظاهرة (أو وصلات) جوزيف صن:Josephson Junctions

طلع علينا جوزيف صن بظاهرة صارت تعرف باسمه. لقد تنبأ هذا العالم أنه عندما يتم وضع موصلين فائقين بجانب بعضهما بحيث لا



PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

يفصل بينهما إلا شريحة رقيقة جداً من مادة عازلة؛ فإن بعض الأزواج الإلكترونية تستطيع التنفيق Tunneling من خلال تلك الشريحة غير الموصلة .وقد تم تأكيد تنبؤاته بعد فترة وجيزة من خلال التجربة.وبالطبع فهذه الظاهرة الكمية يمكن الاستفادة منها في عمل كثير من الدوائر الالكترونية السريعة جداً كما في الحاسبات الآلية وكذلك في صنع كواشف للمجالات المغناطيسية المتناهية في الصغر كما سوف نرى .

ظاهرة التكميم المغناطيسي

نلاحظ مما سبق إن المواد فائقة التوصيل مثيرة في كل جوانبها. من تلك الأمور المثيرة هي ظاهرة التكميم المغناطيسي .وفكرة الظاهرة أنه إذا تم صنع موصل فائق على صورة حلقة (مهما كانت متناهية الصغر) يتولد التكميم عند تعرض الحلقة فائقة التوصيل إلى مجال يزيد قليلاً عن عدد صحيح من الكمات (بزيادة أقل من نصف كمة) ؛ فإن الزيادة ترفض ولا تمر من خلاله، في حين أنه لو تعرضت الحلقة ذات التوصيل الفائق لمجال يقل قليلاً عن عدد صحيح من الكمات بمقدار ضئيل (أقل من نصف كمة) فإنها تتكيف بحيث تكمل النقص من تلقاء نفسها من أجل أن تحافظ على العدد الصحيح من الكمات. أي لو مر مجال يساوي إلى مائة كمة مضافاً إليها ربع كمة فإن ذلك الربع يرفض ولا يمر من خلاله في حين لو كان بدل الربع نصف أو أكثر ولكن أقل من واحد صحيح؛ فإن الموصل يكمله إلى واحد صحيح، وهذا بالضرورة يقتضي أن التيار الذي يلف يزيد وينقص بمقدار ضئيل متجاوباً مع المجال الخارجي.

لقد تبين أن هذه الظاهرةذات أهمية بالغة جداً . فهي مبدأ ما صار يعرف بمجس ألسكويد

Superconducting Quantum Interference Device(SQUID) .

عبارة عن جهاز حساس جداً للمجالات المغناطيسية وبإمكانه أن يميز التغير في المجال المغناطيسي ، بمعنى آخر يستطيع قياس مجال شدته تصل إلى :

$$1\times10^{-21}Tesla.m^2$$

والتي تساوي واحد من مليون من وحدة التكميم المغناطيسي نفسها. وهي حساسية مفرطة أكبر بكثير من الإشارات الصادرة عن المخ أو القلب أو سائر الجهاز العصبي في الكائن الحي. ومجس ألسكويد ينقسم إلى نوعين أساسيين حيث يعتمد الأول منهما على التيار المستمر-dc SQUIDفي حين يعتمد الآخر على التيار ذي التردد الراديوي. والفكرة الأخيرة جعلت من المجس أهمية تطبيقية عالية، فهو لا يقيس المجال العام المتوافر، بل يقيس التغير مهما كان صغيراً .

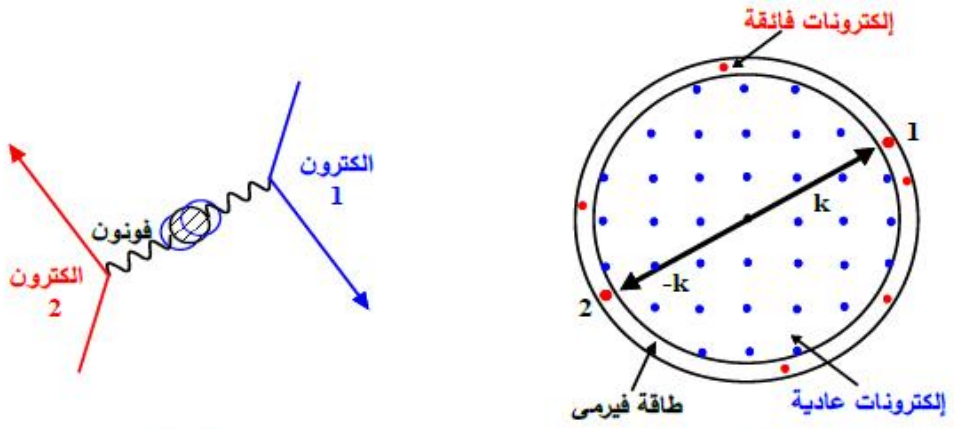
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نظرية الموصلات الفائقة

أن النظرية وضع أسسها ثلاثة من كبار العلماء وهم باردين وكوبر وشريفر J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer وعرفت باسمهم : نظرية باردين-كوبر-شريفر أو اختصاراً بـ BCS Theory ، .إنه من المعلوم بالضرورة أن نقل التيار في الموصلات يتم عادة بواسطة الإلكترونات الحرة، ومصدر المقاومة في الموصلات عادة هو من تصادم تلك الإلكترونات مع إلكترونات أخرى، وأيضاً بالتفاعل مع ما يسمى بالفونونات وهي عبارة عن كمات الطاقة الحرارية في داخل الموصلات.

.أهم أساس قامت عليه النظرية هو فكرة الأزواج الإلكترونية (Cooper Pairs) أو أزواج كوبر. ومن المعلوم أن الإلكترونات تحمل ذات الشحنة وبالتالي فحسب قانون كولوم يفترض أن تتنافر عن بعضها قدر المستطاع.

ولإلقاء الضوء على تركيب زوج كوبر، نفترض معدن تقع إلكترونات التوصيل فيه داخل كرة فيرمى ونفترض أن إلكترونين يقعان بالقرب من سطح فيرمى تماما الشكل(1 أ .) حدث تنافر بين هذين الإلكترونين بسبب تشابه الشحنة وبالتالى توجود قوة كولوم .وبسبب الحجب الذى تسببه الإلكترونات الاخرى الموجودة بين هذين الإلكترونين فإن قوة تنافر كولوم يمكن أن تتناقص وعند أخذ هذا الحجب في الاعتبار فإن قوة التنافر بين الإلكترونين تختفي تماما بالرغم من صغر حجم كرة فيرمى.



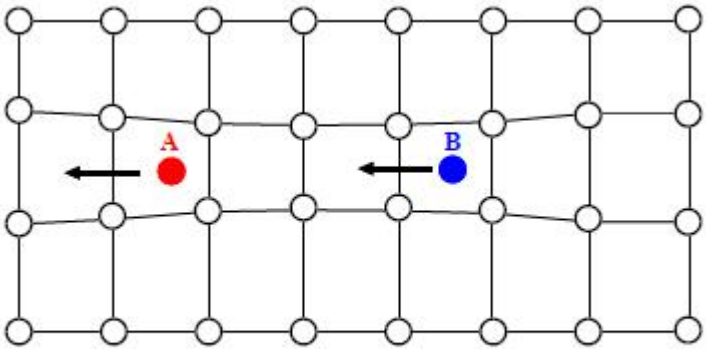
الشكل1(أ) التفاعل بين الإلكترونين الموجودان بالقرب من سطح فيرمى، (ب) مخطط فاينمان لتبادل الفونون.

أفترض العالم كوبر أن الإلكترونين في زوج كوبر يكونان حالة ارتباط فيما بينهما وهذا الارتباط يكون منهما نظاما واحدا وبالتالى ترتبط حركة أحدهما بالأخر ويتفكك زوج ك وبر فقط عندما يأخذ النظام كمية طاقة تساوى طاقة الربط بين الإلكترونين.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

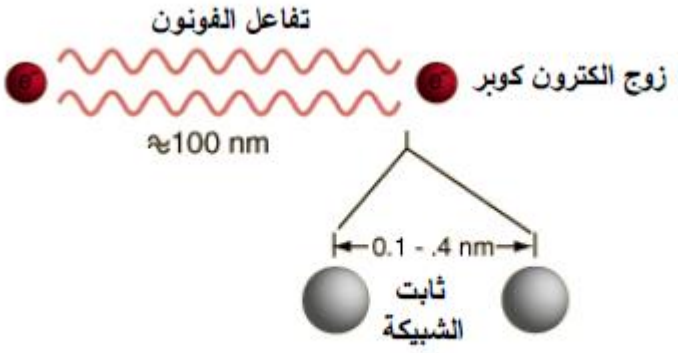
فسر كوبر منشأ قوة الترابط في زوج الإلكترونات على أساس وجود قوة جذب ولفترة وجيزة وتؤثر في إهتزاز الأيون الموجب الذى يمر بالقرب منه الإلكترون ويجذبه نحوه الشكل 19 (١ب) وبالتالى ينتج تجمع(إستقطاب)للأيونات الموجبة بالقرب من الإلكترون المار وهذا الاستقطاب يسبب ظهور جذب إضافي بين الإلكترون والإلكترون الآخر وبالتالى يتولد زوج كوبر، كما هو مبين في الشكل (٢).

تسمى قوة الارتباط بين إلكترونى زوج كوبر بتفاعل الفونون وتكون طاقة الإرتباط في الزوج أكثر قوة عندما تكون عزوم و لف الإلكترونين متعاكسة،بمعنى $k\uparrow$ و $-k\downarrow\uparrow$. بناء على ذلك يمكن القول أن كل الإلكترونات الموجودة بالقرب من سطح فيرمى تتكثف في الحالة الأرضية وتكون أنظمة من أزواج كوبر يبين الشكل هذا المفهوم.



الشكل 2 حركة زوج كوبر.

ويوضح الشكل (٣) أيضا كيف أن أزواج كوبر ترتبط معا على مسافة مئات النانومتر أى على مسافة أكبر من ثابت الخلية بألف مرة ويكون سلوكها مثل سلوك البوزونات (bosons) وتتكثف في الحالة الأرضية .في ضوء نظرية كوبر يمكن القول أن المعدن يتحول من الحالة العادية إلى الحالة الفائقة على هيئة تكثيف للإلكترونات في الحالة الأرضية، أى التى يكونوا فيها أسفل فجوة الطاقة.

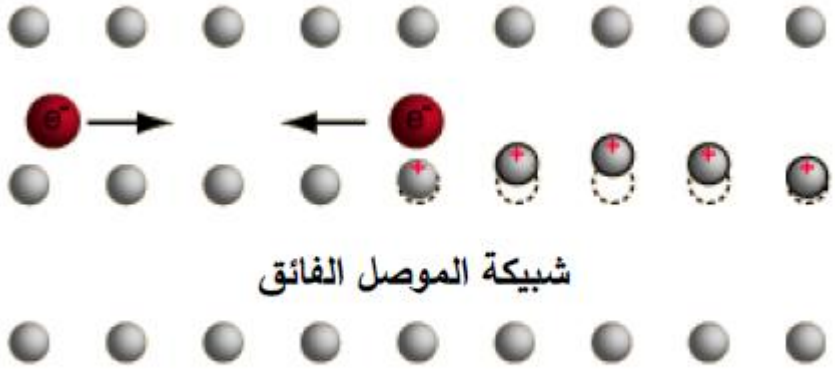


الشكل 3 التفاعل البينى في زوج كوبر ومقارنة مسافة الارتباط مع ثابت الشبيكة.

نظراً لاختلاف اتجاه اللف لإلكترونى كوبر وحيث أن كمية تحرك كليهما متساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه فإن كمية التحرك الكلية لزوج كوبر تساوى الصفر ويكون اللف الكلى

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

للزوج يساوى صفر أيضا وبذلك يعمل الزوج عمل البوزونات وليس كالإلكترونات العادية التى يكون لها لف $\pm 1/2$ والتى تعمل كفرميونات .وبالتالى يمكن تمثيل الإلكترونات في جميع أزواج كوبر بدالة موجية واحدة لها تماثل كروى واحادية الطور وتشمل كل اجزاء الموصل الفائق .كما يمكن اعتبار إلكترونى زوج كوبر على انهما موجتان متساويتان في السعة ومختلفتان في الطور بمقدار π ولذلك فهما يكونان موجة واقفة .
يجب ملاحظة أن زوج كوبر لا يحدث له تشتت كما يحدث للإلكترونات العادية وذلك لأنه إذا أثرت الشبيكة على أحد الإلكترونات وتغيرت كمية تحركه بمقدار معين فإن الشبيكة ذاتها تغير كمية تحرك الإلكترون الآخر في الاتجاه المعاكس بنفس المقدار، أى أن التغير الكلى لكمية تحرك الزوج تكون صفرا، كما يوضح الشكل (4) .



الشكل 4 ارتباط وتحرك زوج كوبر في الشبيكة.

ومما سبق نستخلص، وكما ذكرنا من قبل، أنه ليس للشبيكة أى تأثير على زوج كوبر وبذلك يكون حر الحركة تماما ولا يعانى أى مقاومة عند تحركه في الموصل الفائق.يمكن تخيل حركة الإلكترونات الفائقة مثل حركة متسلقوا الجبال الذين يربطان بعضهم ببعض بحبل، فإذا ترك أحد الإلكترونات موضعه بسبب فوضى المنطقة الناتجة عن اضطراب ذرات الشبيكة فإن جيرانه ستجذبه ليعود إلى مكانه .تجعل هذه الخاصية منظومة أزواج كوبر ذات قابلية صغيرة للتشتت (وربما تنعدم)وتبعا لذلك تكون مقاومته معدومة، بحيث إذا تحرك الأزواج تحت تأثير قوة خارجية سوف يستمر سريان التيار في الموصل الفائق إلى مالا نهاية حتى يتوقف العامل المسبب له (التبريد حتى الدرجة الحرجة) .

ومن جراء فكرة الأزواج الإلكترونية يمكن أن تنقسم الإلكترونات إلى جزء فائق وآخر عادي حيث يقوم الأول بجميع الأعباء الكهربائية ويمنح الموصل جميع الصفات. وتتكون فجوة في طاقة الموصل بين الحالات الحاوية للأزواج وتلك الحاوية للإلكترونات العادية. وهذه الطاقة تمثل الطاقة اللازمة لكسر الرابطة بين الزوجين الإلكترونيين. وتتنبأ نظرية BCS بالعلاقة التالية التي تربط بين طاقة الفجوة وبين درجة التحول للموصل عند درجة الصفر المطلق:

$$E_g = 3.53kT_C$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

حيث k ثابت بولتزمان. إن هذه العلاقة من أهم ما جاءتنا به النظرية. إنها تنص على أن طاقة الفجوة مرتبطة مباشرة بدرجة التحول. بمعنى آخر فإنه لكي نحصل على مواد فائقة التوصيل ذات تحول عال فعلينا أن نوفر موصلات بطاقات فجوة كبيرة. وقد اتفقت تلك المعادلة مع النتائج التجريبية للمواد الموصلة الفائقة التقليدية.

بعض تطبيقات المواد فائقة التوصيل

•المواصلات: وفي القطارات على وجه الخصوص:
من الاستفادة من ظاهرة الطفو المغناطيسي أو التعليق أن توفر قطارات معلقة في الهواء وبالتالي فهي تسير بدون احتكاك مما يعطي توفيراً هائلاً في الطاقة من جهة ويوفر سرعات كبيرة إلى جانب التخلص من الضوضاء. ثم إن تلك القطارات سوف تكون مريحة جداً وخالية من المطبات لأنها تسير على وسادة هوائية. في اليابان تم تجريب هذه الفكرة عملياً شكل ٧، حيث يرتفع القطار حوالي عشرة سنتيمترات عن المسار . والقطار يحوي المواد فائقة التوصيل في حين تتوفر المغناطيسات الكبيرة على الطريق .وفي داخل القطار يتوفر جهاز تبريد وهذا كل ما يلزم حيث يستفاد من قوة التنافر مع المغناطيسات نفسها في دفع القطار وتسييره بسرعات تزيد على ٥٠٠ كم في الساعة.

التطبيقات العسكرية

إن قدرة الموصلات الفائقة 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 ، إن الصورة سوف تصاب بالتشويش والسبب هو المجالات المغناطيسية المجاورة والتي أثرت على حركة الإلكترونات المهبطية التي هي المسؤولة عن الصورة 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

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

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 الفحوصات اللا اتلافية (Non Destructive Testing NDT) وللكاشف القدرة التامة للكشف عن عيوب فنية أو شروخ في داخل أجسام الطائرات ولو كانت متوغلة في عمق يزيد كثيراً عن عشرة سنتيمترات.

التطبيقات الطبية

يمكن الاستفادة من نفس الدروع التي سبقت الإشارة إليها في تطبيقات طبية كثيرة. وبصورة عامة فإنه عندما يراد دراسة الإشارات الكهربائية والمغناطيسية الصغيرة جداً المتولدة من المخ أو القلب أو الجهاز العصبي، فإنه يفضل توفير جو خال من المجالات المغناطيسية الخارجية التي تكون عادة أكبر كثيراً من تلك الإشارات. وقد تم الاستفادة بنجاح في بعض المناطق كما في اليابان من خاصية الدروع المغناطيسية مما وفر قدرات فائقة على قراءة الإشارات الصغيرة المشار إليها مما يوفر مزيداً من التشخيص لتلك الأعضاء الحساسة من جسم الكائن الحي.إذا تمت الاستفادة من قدرة كاشف السكويد الهائلة لقراءة المجالات المغناطيسية المتناهية في الصغر مع استخدام الدروع المغناطيسية، نكون بذلك وفرنا جهازاً متكاملاً يمكن أن يحل محل الأجهزة المستخدمة حالياً ويفوقها من حيث الدقة. وقد تم بالفعل استخدام الكاشف عندما وضعت مجوعة كبيرة منها بشكل نصف كروي تغلف رأس المريض. وصل عددها السكويدات في المجوعة الواحدة إلى ٦٤ في بعض التجارب.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com