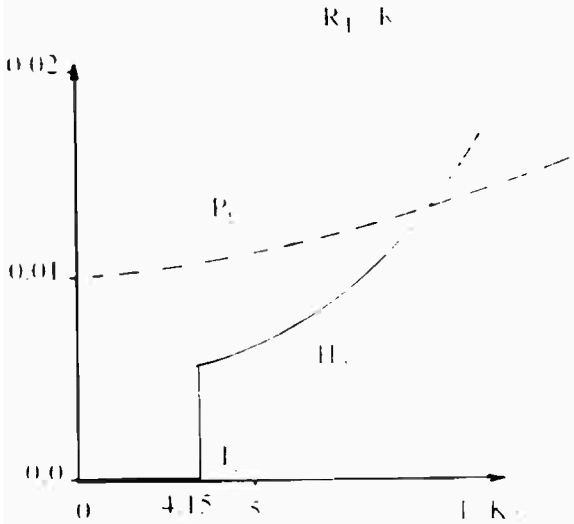
الباب الثالث عشر

الموصلية الفائقة SUPER CONDUCTIVITY

اكتشاف الموصلية الفائقة :

اكتشف اونز Onnes عام ١٩١١ أن المقاومة الكهربية للزئبق المتجمد تنخفض إلى الصفر تقريبا عند درجات حرارة أقل من درجة حرجة $T_c = 4.15\ K$ ، مما يوحى بتغير حالة المادة تغيرا جذريا وتختلف فى تصرفها عن سلوك المادة العادية التوصيل كالبلاتين مثلا ، كما مبين فى شكل (١٣ - ١)

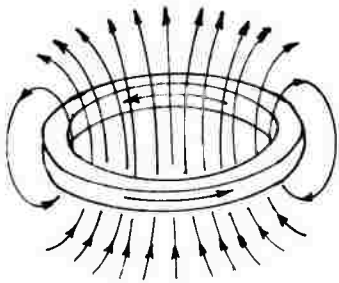


شكل (١٣ - ١)

وبعد اكتشاف ظاهرة التوصيل الفائق فى الزئبق وجد أن مواد أخرى كثيرة تتمتع بنفس الخاصية ، كما وجد أن بعض السبائك والمركبات السيراميكية تظهر موصلية فائقة عند درجات حرارة أعلى بكثير من تلك التي تظهر عندها فى الفلزات النقية .

ليس للموصل الفائق أية مقاومة كهربية على الإطلاق لذلك إذا أدخلنا تيارا كهربياً فى دائرة تتكون من سلك فائق التوصيل فإن التيار الكهربى يستمر فى السريان طالما استمرت للسلك موصليته الفائقة ، ويسمى التيار حينئذ بالتيار المداوم persistent current شكل

(١٣- ٢) ، وقد أمكن فى أحد المعامل استمرار سريان تيار مداوم بدون انقطاع لمدة سنتين ونصف ، دون أى مصدر كهربى ولم يقف التيار إلا بعد الامتناع عن التبريد للموصل الفائق ما حوله لموصل معتاد له مقاومة للتيار تسببت فى إيقافه .

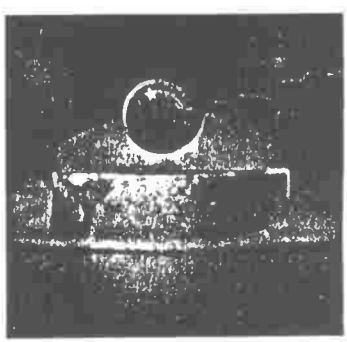


شكل (١٣ - ٢)

خواص الموصلات الفائقة

١ - ظاهرة الرفع Levitation effect

تحدث التيارات المداومة فى دوائر الموصلات الفائقة مجالات مغنطيسية ، ينشأ عنها ظاهرة الرفع المثيره التى تظهر بعض الأجسام وكأنها عائمة فى الهواء فوق الموصل الفائق. فإذا أسقطنا مثلا مغنطيسيا صغيرا فوق موصل فائق ينشأ محال مغنطيسى تأثيرى يقاوم حركة السقوط ، وذلك لتكون تيارات مداومة تأثيرية على سطح الموصل الفائق ، وتزداد شدة هذه التيارات باقتراب المغنطيس من الموصل وفقا لقانون لنز Lenz's يكون التنافر قويا مع المغنطيس وينتج عن ذلك رفعه فى الهواء وكأنه عائما غير مرتكز على شىء. شكل(١٣-٣).



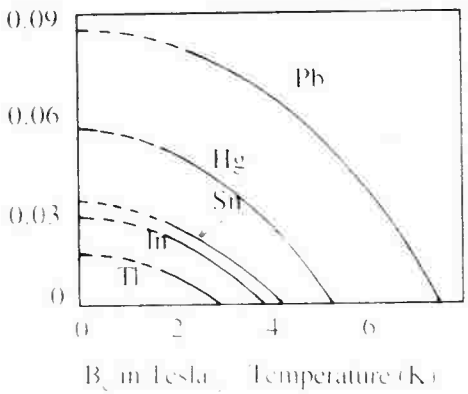
شكل (١٣ - ٣)

وتستفيد حاليا التكنولوجيا الحديثة من ظاهرة الرفع فى تصميم قطار يتحرك مرفوعا فوق القضبان مما يجعل حركته أسهل وأسرع ، ولذلك يطلق عليه اسم القطار الرصاصه أو القطار بدون احتكاك . Frictionless train .

٢ - المجال المغنطيسى الحرج .

تتكون مجالات مغنطيسية قوية عند مرور التيارات المداومة فى ملفات من موصلات فائقة . من الناحية النظرية يمكن زيادة شدة التيار المداوم ، وبالتالى شدة المجال المغنطيسى المصاحب بدرجة لانهائية . ولكن وجد عمليا أنه إذا زاد المجال المغنطيسى عن حد معين

يسمى بالمجال الحرج H_c ، تختفى تماما ظاهرة التوصيل الفائق وتتحول المادة إلى مادة عادية التوصيل . ويعرف المجال الحرج بأنه أقل مجال مغنطيسى يفقد عنده الموصل الفائق موصليته الفائقة . ويطلق على الموصلات الفائقة التى لها مجال حرج واحد بأنها من النوع الأول Type I superconductor.



وتختلف قيمة المجال الحرج باختلاف الموصل ، كما أنها تقل كلما ارتفعت درجة الحرارة كما مبين بشكل (١٣ - ٤) وقد وجد أن شدة المجال الحرج المزيل للموصلية الفائقة تتغير مع درجة الحرارة المطلقة وفقاً للمعادلة التقريبية :

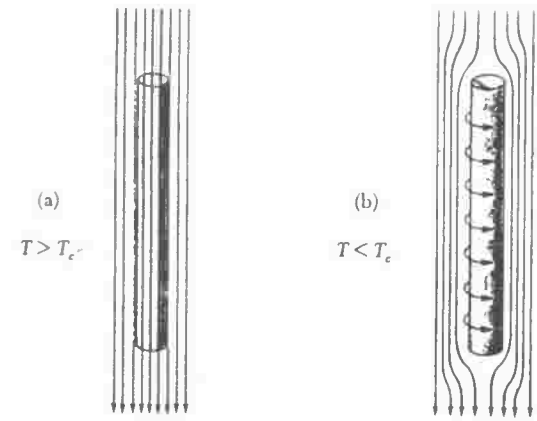
$$H_c(T) = H_c(0)\left[1 - (T/T_C)^2\right]$$

شكل (١٣ - ٤)

حيث $H_c(T)$ هو المجال الحرج عند درجة T ، $H_c(0)$ عند الصفر المطلق.

٣ - أثر ميزنر Meissner Effect

عند وضع اسطوانة من موصل فائق فى مجال مغنطيسى ينعدم بداخلها المجال الكهربائى نتيجة لمقاومته الصفرية . وهذا يعنى أن معدل تغير المجال المغنطيسى يتلاشى داخل الموصل الفائق . أى أن خطوط القوى المغنطيسيه تطرد خارج الاسطوانه ولا تستطيع أختراقها كما مبين فى شكل (١٣ - ٥)



شكل (١٣ - ٥)

عند ملامسة المجال المغنطيسى لاسطوانة الموصل الفائق تتكون تيارات تأثيرية على السطح تمنع نفاذ خطوط القوى المغنطيسية داخلها ، وهذا هو تصرف الموصل التام الذى لا يتكون بداخله أية مجالات مغنطيسية . وتؤدى التيارات السطحية على الموصل الفائق عملية التوصيل الكهربائى .

تسمى ظاهرة طرد الموصل الفائق لجميع خطوط القوى المغنطيسية لخارجه بأثر ميزنر Meissner effect . ويلاحظ أن تصرف الموصل الفائق فى المجال المغنطيسى يشبه تماما تصرف المادة الديامغنطيسيه من حيث تنافرها مع المجال ، إذ يعتمد الحث المغنطيسى B فى أى مادة على المجال المغنطيسى المؤثر H والعزم المغنطيسىM وفقا للمعادلة :

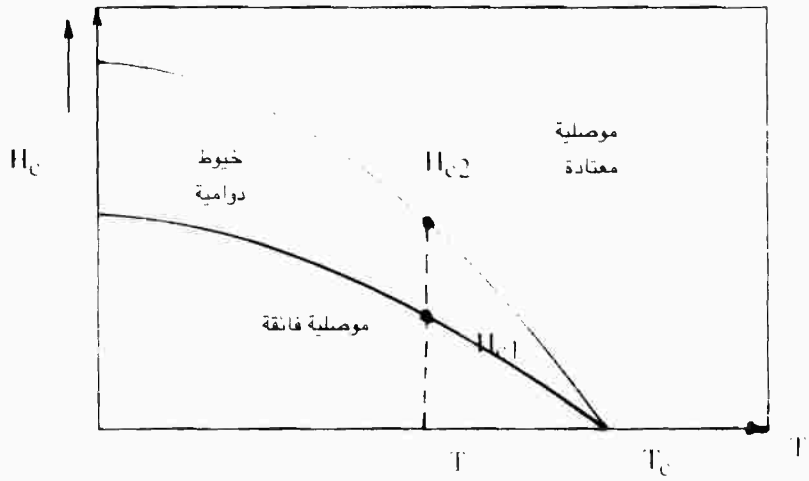
$$B = \mu_0 H + M$$

وبتطبيق أثر ميزنر للموصل الفائق يكون $B = 0$ وبالتالى تكون $M = - \mu_0 H$ أى أن القابلية المغنطيسية سالبة ، ولذلك فالموصل الفائق مادة ديامغنطيسية تامة .

تكملة الفيض المغنطيسى

النوع الثانى من الموصلات الفائقة Type II Superconductors

يميز الموصل الفائق من النوع الأول مجالا مغنطيسيا حرجاً واحداً ، يتحول بعده الموصل الفائق إلى موصل معتاد . أما الموصلات الفائقة من النوع الثانى فلها مجالان مغنطيسيان حرجان H_{c1} & H_{c2} عند درجة حرارة معينة (شكل ١٣ – ٦) . عند زيادة شدة المجال المغنطيسى عن H_{c1} تبدأ خيوط دوامية vortex lines فى إختراق الموصل الفائق وتنقسم المادة إلى مناطق ذات توصيل فائق واخرى موصليتها معتادة . وعند زيادة شدة المجال يزداد حجم المناطق ذات الموصلية المعتاده على حساب مناطق الموصلية الفائقه حتى اذا ما وصلت شدة المجال المغنطيسى إلى القيمة الحرجه الثانيه H_{c2} تكون جميع اجزاء الموصل الفائق قد تحولت إلى التوصيل المعتاد . لذلك يتميز النوع الثانى من الموصلات الفائقه بوجود مجالين مغنطيسيين حرجين لكل درجة حرارة .



شكل (١٣ ـ ٦) المجالات الحرجة لموصل فائق من النوع الثانى عند الدرجات المختلفة

شكل (١٣ - ٦)

المجالات الحرجة لموصل فائق من النوع الثانى عند الدرجات المختلفة

تعمل الخيوط الدوامية على إمرار بعض الفيض المغنطيسى خلال الموصل الفائق . وبدهى أن تكون مادة الموصل الداخلة فى هذه الخيوط ذات موصليه معتاده لتسمح بمرور خطوط القوى المغنطيسية . ولما كانت هذه الخيوط تشكل حزما من خطوط القوى المغنطيسيه الملامسه للموصل الفائق لذلك تتكون تيارات تأثيرية على سطوحها كالدوامات تحمى باقى اجزاء الموصل التى لا تزال على حالتها من الموصليه الفائقة ، تحميها من اختراق المجال المغنطيسى لها . (انظر شكل ١٣ - ٧) .

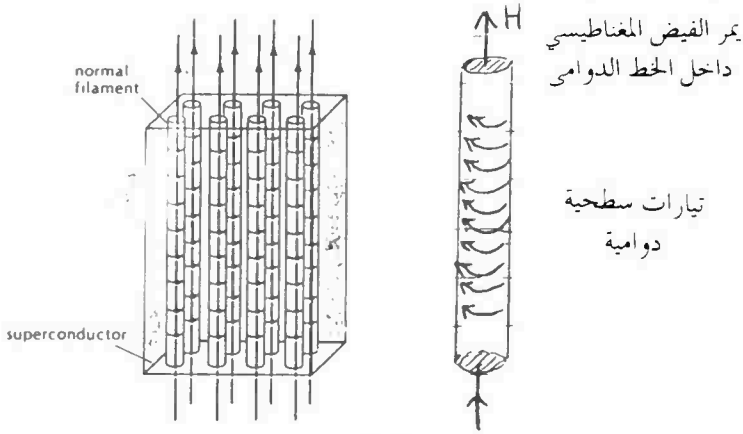
وقد وجد أن كل خيط دوامى يحتوى على كمة واحدة من الفيض المغنطيسى تساوى ثابت بلانك مقسوما على ضعف شحنة الإلكترون

$$\phi_0 = h / 2e$$

$$= 2.07 \times 10^{-7} \quad T \cdot m^2$$

كما وجد بالتجربة أن زيادة شدة المجال المغنطيسى لا يزيد من كثافة الفيض المغنطيسى فى كل خيط دوامى ، ولكن يزداد عدد الخيوط التى تخترق الموصل الفائق وتصير كالحزمة

الكثيفة . وفى النهاية عندما تصل شدة المجال إلى قيمته الحرجة الثانية H_{c2} تكون المادة قد تحولت إلى مادة عادية التوصيل تخترق جميع أجزائها خطوط القوى المغنطيسية وتختفى الموصلية الفائقة من المادة .

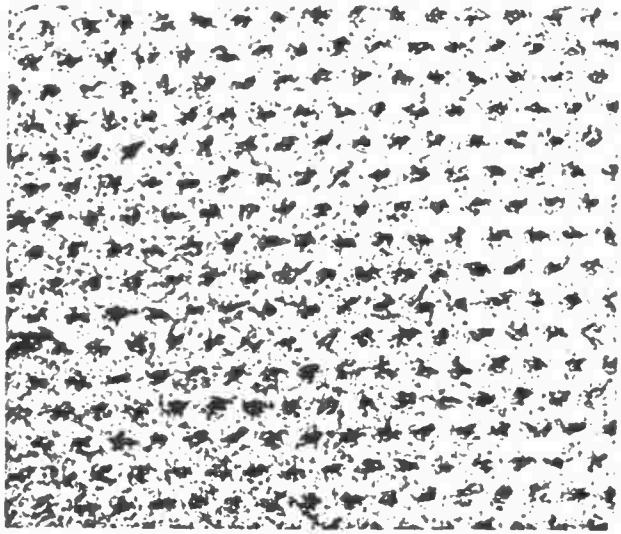


شكل (١٣ - ٧)

وتجرى التجربة البسيطة التالية لإثبات أن كل خط دوامى لا يمر فيه سوى كمة واحد من الفيض المغنطيسى $(\phi_0 = 2.07 \times 10^{-7})$ وهى تجربة شبيهة بتجربة بيتر لإظهار الحدود المغنطيسية .

يوضع محلول غروى به مسحوق من مادة مغنطيسية كالمجنتيت فوق سطح أملس من موصل فائق من النوع الثانى ، ونؤثر عليه بمجال مغنطيسى تقع شدته بين H_{c1} & H_{c2} أى فى المنطقة التى تحدث فيها الخطوط الدوامية . تنجذب ذرات المسحوق المغنطيسى لنهايات الخطوط الدوامية ، حيث يمر المجال المغنطيسى ، فيظهر شكل منتظم من الأكوام للمسحوق الأسود اللون ، وإذا ازدادت شدة المجال الخارجى المؤثر تزداد الكثافة العددية للأكوام كما مبين بشكل (١٣ - ٨) . ويمكن إيجاد عدد الخطوط الدوامية من عدد هذه النهايات وأيضا بقياس شدة المجال المغنطيسى المؤثر يمكن إيجاد كثافة الفيض المغنطيسى فى كل خط دوامى ، تساوى $\phi_0 = h / 2e$ ، ولا تندمج أبدا الخطوط بزيادة المجال ولكن

تكون حزما كثيفة ، حتى تتحول المادة إلى موصل معتاد إذا ما زادت شدة المجال على القيمة الحرجة الثانية H_{c_2} .



شكل (١٣ - ٨)

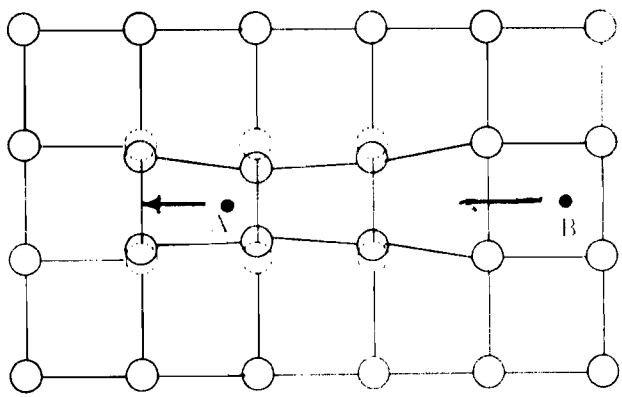
ميكانيكية التوصيل فى الموصلات الفائقة : The BCS Theory

يحدث التوصيل الكهربائى فى الموصلات الإلكترونية بانتقال إلكترونات التوصيل تحت تأثير المجال الكهربائى فيمر التيار . وتبين المقاومة الكهربية مقدار استطارة الإلكترونات بالفعل البينى مع فونونات الشبيكة وكذلك بتصادمها مع بعضها البعض ومع الشوائب وعيوب الشبيكة وقد وجد أنه حتى عند درجة الصفر المطلق ، حيث تسكن حركة الإلكترونات والفونونات تظهر بعض المقاومة المتبقية فى جميع الموصلات المعتادة .

إذا كيف نفسر تلاشى المقاومة تماما في الموصل الفائق عند درجات الحرارة بين الصفر المطلق والدرجة الحرجة ؟ لقد وضع باردين وكوبر وشريفر نظرية تعرف باسمهم BCS theory لتفسير ميكانيكية التوصيل فى الموصل الفائق على أساس الفعل البينى بين الإلكترونات الحرة وفونونات الشبيكة وإمكان تكون أزواجا من الإلكترونات توجد بين إلكترونى

كل زوج قوة ترابط بخلاف ما تمليه النظريات الكلاسيكية من وجود تنافر كولومى بين الشحنات المتشابهة وسميت هذه الأزواج الإلكترونية بأزواج كوبر Cooper pairs ، وهى التى تشكل حاملات الشحنة عند التوصيل الفائق ، وينشأ عن حركتها التيار المداوم وظاهرة الموصلية الفائقة .

ولكى نفهم كيف يحدث تجاذب بين الكترونى كوبر نبدأ بالإلكترونات الحرة داخل الموصل ، هذه الإلكترونات تؤثر على الأيونات الموجبة للشبيكة محدثة بها استقطابا فى شحناتها الموجبة ، فيزداد تركيز الشحنات الموجبة مكان مرور الإلكترون (A مثلا فى شكل (١٣ - ٩) فتعمل هذه الزيادة على جذب الكترون آخر B يكون فى الجوار حينئذ ، وبذلك يتبع الإلكترون A الإلكترون B فيظهر كما لو كانت هناك قوة تجاذب بينهما ، والحقيقة أن ترابط الإلكترونين يكون بواسطة الفعل البينى للإلكترون مع فونونات الشبيكة ، ويوضح شكل (١٢ - ٩) كيفية تكون أزواج كوبر .



شكل (١٣ - ٩)

ويجب ملاحظة إنطباق قاعدة باولى Pauli exclusion principle التى تنص على عدم جواز أن يكون لإلكترونين نفس الإعداد الكمية ، وعلى ذلك يجب أن يختلف اللف لإلكترونى كوبر ، ولما كانت كميتا حركتهما متساويتين مقدارا ومتضادتين إتجاها ؛ لذلك فإن

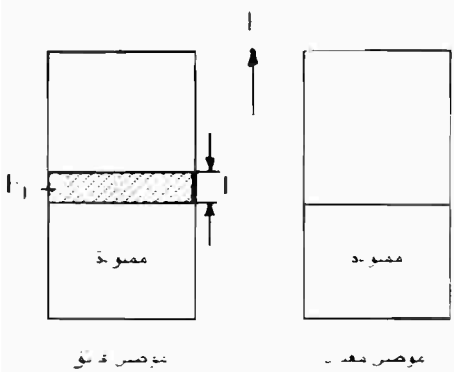
كمية الحركة الكلية لزوج كوبر تساوى الصف ، كما أن لفه أيضا مساوٍ للصفر أى أنه يعمل عمل البوزونات وليس كما فى الإلكترونات ذات اللف 1/2 ± والتى تعمل كفرميونات ، ولذلك يمكن تشبيهها فى الموصل الفائق بعملية تكثف لجميع أزواج كوبر فى الحالة الأرضية ground state ويمثلهم دالة موجية واحدة تمثلها كروى كما أنها أحادية الطور ، وتشمل كل أجزاء الموصل الفائق ، وبالنسبة للميكانيكا الموجية يمكن اعتبار الكترونى زوج كوبر على أنهما موجتان متساويتان فى السعة ويختلفان فى الطور بمقدار π ويكونان لذلك موجة موقوفة .

لا تحدث استطارة لأزواج كوبر كما هو الحال بالنسبة للإلكترونات الحرة وذلك لأنه إذا أثرت الشبيكة على الإلكترون الأول فى الزوج وغيرت من كمية حركته بقدر معين فإن الشبيكة ذاتها تغير من كمية حركة الإلكترون الثانى بنفس المقدار ولكن فى اتجاه معاكس تماما لاتجاه التغير الأول . وهذا يعنى أن التغير الكلى لكمية الحركة للزوج تساوى صفرا ، وبذلك لا يكون هناك أى تأثير للشبيكة على زوج كوبر الذى يكون له حرية الحركة تماما بداخلها فلا تكون هناك استطارة أو أى مقاومة لحركة ناقلات الشحنة ، وعلى ذلك تصير مقاومة الموصل الفائق صفرية .

طاقة الثغرة للموصل الفائق Energy gap :

يعتمد استقرار الموصل الفائق على قوة الرابطة بين الكترونى زوج كوبر . وتفسر النظريات حالة الموصل الفائق بوجود طاقة ثغرة بين الحالة الأرضية ground state والحالة المثارة للنظام كما هو مبين بالشكل (١٣ – ١٠) .

وتعرف طاقة الثغرة بأنها الطاقة اللازمة لكسر الرابطه بين الكترونى كوبر ، وقد أثبتت



شكل (١٣ – ١٠)

نظرية باردين كوبر شريفر BCS لميكانيكية التوصيل فى الموصلات الفائقة ، إن طاقة الثغرة عند T = O K تتناسب مع درجة الحرارة الحرجة T_c حيث $E_G = 3.53\ T_c$

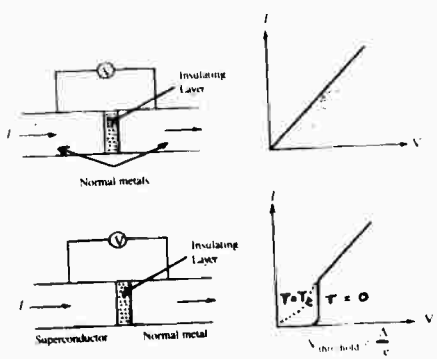
وطاقة الثغرة فى الموصل الفائق صغيرة فى حدود $k\,T_c$ (0.001 eV) عند الصفر المطلق ولذلك فهى لا تقارن بطاقة الثغرة فى شبه الموصل ، ولذلك عند التأثير على موصل فائق بمجال مغناطيسى تزداد طاقة أحد الكترونى زوج كوبر ، بينما تنقص طاقة الثانى . فإذا كانت شدة المجال كبيرة بما فيه الكفاية ينفصل الإلكترونين وتنتهى حالة الموصليه الفائقة .

ولقياس طاقة الثغرة عمليا نجرى التجربة الآتية :

إذا أحضرنا فلزين توصليهما معتاد وجعلنا منهما وصلة كهربية بينهما طبقة رقيقة من مادة عازلة . تتبع العلاقة بين التيار والجهد على الوصلة قانون أوم كما فى الشكل (١٣-١١) بينما إذا كان أحد طرفى الوصلة من مادة موصليتهما فائقة فإننا بزيادة فرق الجهد على طرفى الوصلة لا يمر أى تيار حتى نصل إلى جهد معين threshold V_e حيث

$$V_E = E_G / 2\ e$$

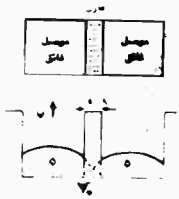
وقد استخدمنا هنا نصف طاقة الثغرة $E_G / 2$ حيث إننا بصدد الكترون واحد يخترق الطبقة العازلة بواسطة نظرية الأنفاق ، أى أنه عندما تكون الطاقة e . V مساوية نصف طاقة ترابط الكترونى كوبر على الأقل ينفصل الإلكترونين ويتحول التوصيل إلى توصيل معتاد .



شكل (١٣ - ١١)

أثر جوزيفسن D C & A C Josephson Effect :

أولا : اكتشف جوزيفسن أنه عندما يتلامس موصلان فائقان بينهما طبقة رقيقه من مادة عازلة ، كأكسيد مثلا سمكه ١-٢ نانومتر ، يتولد تيار فائق I_s دون التأثير على الوصلة بأى فلطية خارجية وتزداد شدة التيار بزيادة سطح التلامس بينهما ، ولكنها تقل بزيادة سمك الطبقة العازلة ، وتفسر هذه الظاهرة بميكانيكا الكم عن طريق إختراق أزواج كوبر للطبقة العازلة بظاهرة الأنفاق المعروفة Tunnel effect . ويبين شكل (١٣ - ١٢) وصلة جوزيفسن مع اختراق حاجز الجهد بظاهرة الأنفاق ، وتكون الدالة الموجية جيبيه داخل بئر الجهد ودالة أسية داخل حاجز الجهد أى الطبقة العازلة .



شكل (١٣ - ١٢)

إذا اعتبرنا أن الدالة الموجية لزوج كوبر داخل حاجز الجهد هى :

$$\psi = \psi_0 \exp (i \phi)$$

حيث ϕ هو الطور ، وهو أحادى لجميع أزواج كوبر ، وأن طورا الموصلين الفائقين على جانبى الوصلة (ϕ_1 , ϕ_2) يكون التيار I_s المار فى الوصلة هو :

$$I_s = I_m \sin \left(\phi_2 - \phi_1 \right)$$
$$= I_m \sin \delta$$

حيث I_m هو أكبر تيار حادث عندما لا تؤثر على الوصلة بأى فلطية خارجية

ثانيا : عند التأثير على الوصلة بفلطية ثابتة V (d.c. voltage) يتكون فى الحال تيار متردد I يعطى بالمعادلة

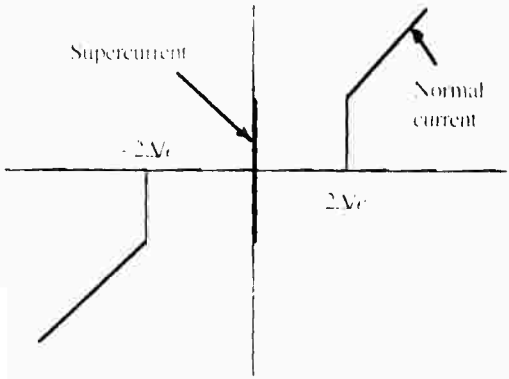
$$I = I_m \sin (\delta - 2 \pi f t)$$

حيث δ هو الطور عند الزمن $t = 0$ ، f هو تردد جوزيفسن ويعطى بالمعادلة

$$f = \frac{2 e V}{h}$$

حيث h ثابت بلانك ، e شحنة الإلكترون . ويبين شكل (١٣ - ١٣) منحنى تغير التيار

مع الجهد على وصله جوزيفسن المكونة من مادتين فائقتى التوصيل بنهما طبقة رقيقة عازلة.



وقد وجد أنه بالتأثير على الوصلة بفلطية واحد ميكروفولط ينشأ تيار تردده $f = 483.6\ MH_z$ ونظرا للدقة الكبيرة الممكنة فى قياس كل من التردد وفرق الجهد لذلك

يمكن تعيين قيمة : (e/h) بدقة لم يسبق أن حصلنا عليها . شكل (١٣ - ١٣)

وتستخدم وصلة جوزيفسن فى تطبيق هام آخر .

إذا شععنا الوصلة بإشعاع كهرمغنطيسى تردده f^1 فإننا نحصل على منحنى بين التيار والجهد يتميز بقفزات كمية كلما كان تردد جوزيفسن f مساويا مضاعفات للتردد الساقط f^1 أى كلما كان : $V = hf/2e = nhf^1/2e$

وتتصرف الوصلة كتصرف ذرة مثارة لها مستويات كمية فكلما عبر زوج كوبر الوصلة ينبعث أو يمتص فوتون تردده $f = 2eV/h$

السكويد The SQUID :

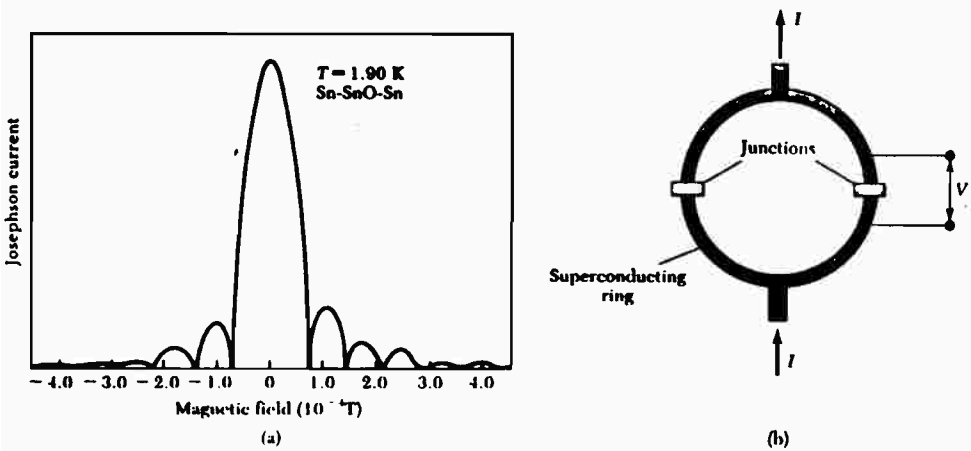
عندما تتعرض وصلة جوزيفسن لمجال مغناطيسى يتوقف شدة التيار الحرج على عدد كمات الفيض المغناطيسى المؤثر عليها فالتيار يتغير دوريا مع الفيض ، وتستخدم هذه الظاهرة فى القياس المتناهي فى الدقة للمجالات المغناطيسية الصغيرة جدا كتلك المصاحبة للتيارات المخية فى الإنسان فى حدود $10^{-14}\ T$.

والسكويد تركيب من وصلتى جوزيفسن يكونان حلقه كما فى شكل (١٣ - ١٤) والاسم سكويد SQUID يأتى من الاختصار الانجليزى للاسم :

Superconducting Quantum Interference Device

شدة التيار فى حلقة السكويد تساوى مجموع تيارى وصلتى جوزيفسن ، عندما تؤثر على السكويد بمجال مغناطيسى فإنه يحدث تيارا مداوما فى الحلقة يكفى لطرد الفيض المغناطيسى من الحلقة (ظاهرة ميزنر) طالما استمرت الحلقة فى موصليتها الفائقة ، أما إذا ازدادت شدة التيار عن التيار الحرج تحولت الحلقة لحظيا إلى مادة عادية التوصيل تسمح بالفيض المغناطيسى لاختراقها ، ويمكن لدائرة الكترونية تسجيل التغيرات فى شدة التيار المصاحبة للتغير فى شدة المجال .

ويكثر استخدامات السكويد حاليا لدراسة المجالات المغناطيسية الحيوية كتلك المصاحبة لتيارات القلب والمخ ، للكشف عن مصادر الصرع والسكتات القلبية عند الانسان .



شكل (١٣ - ١٤)

وحدات مرجعيه كميه للجهد والمقاومة :

Reference Quantum Standards of voltage and Resistance

أولا : أثر جوزيفسن والقياسية المرجعية للجهد :

رأينا مما سبق أن شريحتين من مادة ذات موصلية فائقة كالنيوبيوم يفصلهما طبقة رقيقة عازلة ذات سمك حوالى 1 n m تكون وصلة جوزيفسن التى تتسبب ظاهرة الأنفاق

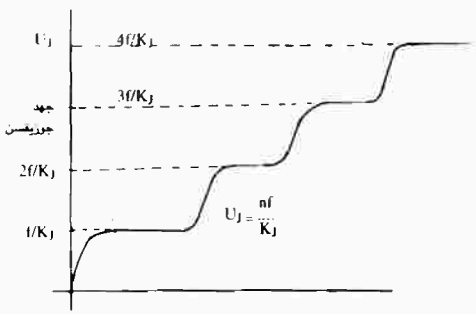
tunnel effect من أن تخترق الأمواج الإلكترونية العازل بين الشريحتين وبذلك يمر جزء كبير من تيارات التوصيل الفائق .

عند تشعيع هذه الوصلة بأمواج كهرمغناطيسية ترددها f وبقياس شدة التيار المار I وفرق الجهد على الوصلة و U_J يكون منحنى العلاقة بين التيار ، وجهد جوزيفسن كما مبين بشكل (١٣ - ١٥) حيث يظهر فيه سلميات على محور التيار تظهر عند قيم متعاقبة لجهد جوزيفسن لا تتغير مواقعها ، ويرتبط الجهد U_J الذى يحدث عنده السلمة النونيه (n th step) بتردد الأشعة الساقطة بالعلاقة :

$$U_J\ (n) = n\ f\ /\ K_J$$

حيث K_J هو ثابت جوزيفسن ، n عدد صحيح

ومن المعادلة السابقة ، وبوضع n = 1 يكون تعريف ثابت جوزيفسن هو النسبة بين التردد إلى جهد جوزيفسن عند السلمة الأولى . وقد وجد بالتجربة أن ثابت جوزيفسن K_J لا يتوقف على المتغيرات التجريبية مثل نوع الموصل الفائق أو درجة الحرارة أو تردد الإشعاع الساقط أو القدرة ، وعلى ذلك فقد اعتبر ثابت جوزيفسن كمية قياسية عالمية International quantity



شكل (١٣ - ١٥)

كما أثبتت التجربة أن القيمة المقاسة لثابت جوزيفسن تتطابق مع القيمة المحسوبة نظريا والتى تساوى ضعف شحنة الإلكترون e إلى ثابت بلانك h أى إن

$$K_J = 2\ e\ /\ h$$

وبالتعويض عن قيم h & e نجد أن قيمة هذا الثابت هى :

$K_J = 483954 \quad G\ H_Z / V$

وعلى ذلك فقيمة الثابت K_J يمكن استخدامها فى تعريف الوحدة القياسية للجهد أى الفلط (volt) .

ثانيا : أثر هول الكمى والقياسية المرجعية للمقاومة :

يعتبر اكتشاف فون كليتزنج لأثر هول الكمى طريقة جديدة للتعريف بالمقاومة القياسية المرجعية كما سبق بالنسبة للجهد فى وصلة جوزيفسن ، لقد عرفت مقاومة هول ρ_H بأنها النسبة بين جهد هول U_H إلى شدة التيار I المار فى العينة أى أن

$$\rho_H = U_H / I$$

وعند تثبيت شدة التيار I وتغيير شدة المجال المغناطيسى وجدت مصطبات فى المنحنى بين جهد هول U_H وشدة المجال المغناطيسى H حيث يستمر الجهد ثابتا مع زيادة شدة المجال خلال كل سلمة .

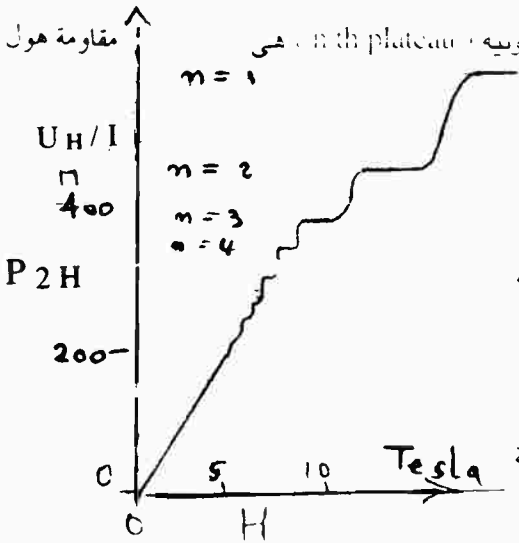
وتكون قيمة مقاومة هول عند المصطبة النونيه (n th plateau) هى

$$\rho_H (n) = U_H (n) / I$$

$$= R_k / n$$

حيث تأخذ n القيم n = 1, 2, 3, 4, ...

ويسمى R_k ثابت كليتزنج الذى يعرف بأنه قيمة مقاومة هول عند أول مصطبة أى عندما تكون n =1



شكل (١٣ - ١٦)

ويبين شكل (١٣ - ١٦) نتائج تجربة أجريت عند درجة حرارة 1.39 K لقياس جهد هول ، وكانت شدة التيار المار بالعينة 25.52 μ A ووجد أن مقاومة هول تظهر المصطبات المبينة بالشكل عند قيم مكماة

R_H / n حيث n = 1, 2, 3, ...

وأن قيمة ثابت كليتزنج للسلمة n = 1 هو :

$R_H = 25813$ ohm

وأن هذه القيمة تتطابق مع النتائج النظرية لأثر هول الكمى ، وهى :

$R_H = h / e^2$

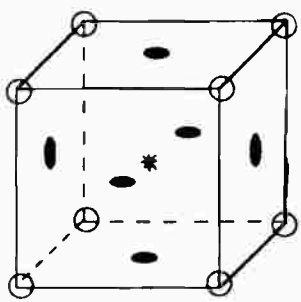
حيث h ثابت بلانك ، e الشحنة الإلكترونية .

ومما سبق نرى أن أثر جوزيفسن ، وأثر هول الكمى أوجدا قياسية كمية Quantum standards للجهد وللمقاومة على الترتيب ، وعلى ذلك أمكن تحديد قيمة الوحدة لكل من الجهد والمقاومة أى الفلط والأوم على أساس قيم الثابتين الكميين R_k ، K_J وهما ثابت جوزيفسن وثابت كليتزنج للفولط والمقاومة .

الموصلية الفائقة عند درجات الحرارة المرتفعة

High Temperature Superconductivity

حتى عام ١٩٨٦م ، كانت أعلى درجة حرارة أمكن عندها الحصول على الموصلية الفائقة فى بعض المواد هى $T_c = 23.2$ K . وكانت المادة هى نيوبيوم جرمانيوم ($Nb_3 Ge$) . وكانت معظم البحوث متجهة إلى دراسة الأكاسيد ذات التركيب بيروفسكايت Perovskite الذى يمثله تركيب تيتنات الباريوم المبين بشكل (١٣ - ١٧) ومن أمثلة تلك المواد تيتنات السترنشيوم وتنجستات الصوديوم .

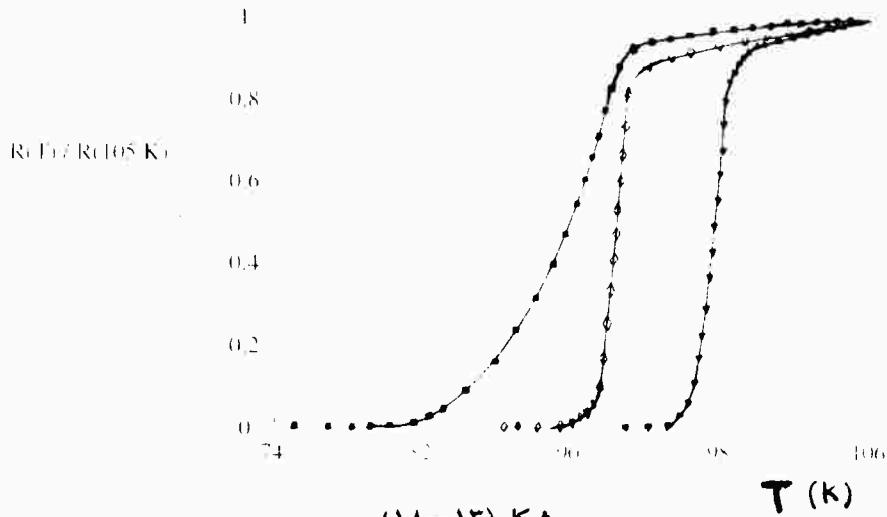


شكل (١٣ - ١٧)

وبنهاية عام ١٩٨٦م اكتشف بدنورز ومولر Bednorz & M`üller مادة سيراميكية (LaBCO) أظهرت موصلية فائقة ابتداء من الدرجة ٣٥ كلفن وقد أمكن بعد ذلك بالتأثير على المادة بضغوط كبيرة رفع درجتها الحرجة إلى $T_c = 57$ K . وقد أثبت ذلك أن إنقاص البعد الشبيكى والمسافة بين الذرات يؤدى إلى

رفع الدرجة الحرجة للموصل الفائق ، وقد دفع ذلك العلمـــاء إلى استبـــدال ذرة اللانتانـام (La) بذرة أصغر حجما منها وإن كانت تماثلها كيميائيا هى ذرة الايتريوم (Y) وعندئذ تكون المركب (Y B CO) الذى أظهر نقصا حادا فى المقاومة الكهربية عند درجة 93 K انتهت بمقاومة صفرية تماما عند درجة80 k كما مبين بشكل (١٣ – ١٨) .

وقد أثبتت القياسات المغناطيسية على هذا المركب ظهور أثر ميزنر عند درجات أقل من 90 K .



شكل (١٣ – ١٨)

البنية التركيبية للموصلات الفائقة عند الدرجات المرتفعة :

أظهرت الدراسة بالأشعة السينية أن الموصل الفائق Y B C O يتركب من طبقات ثلاث لكل منها تركيب بيروفسكيت :

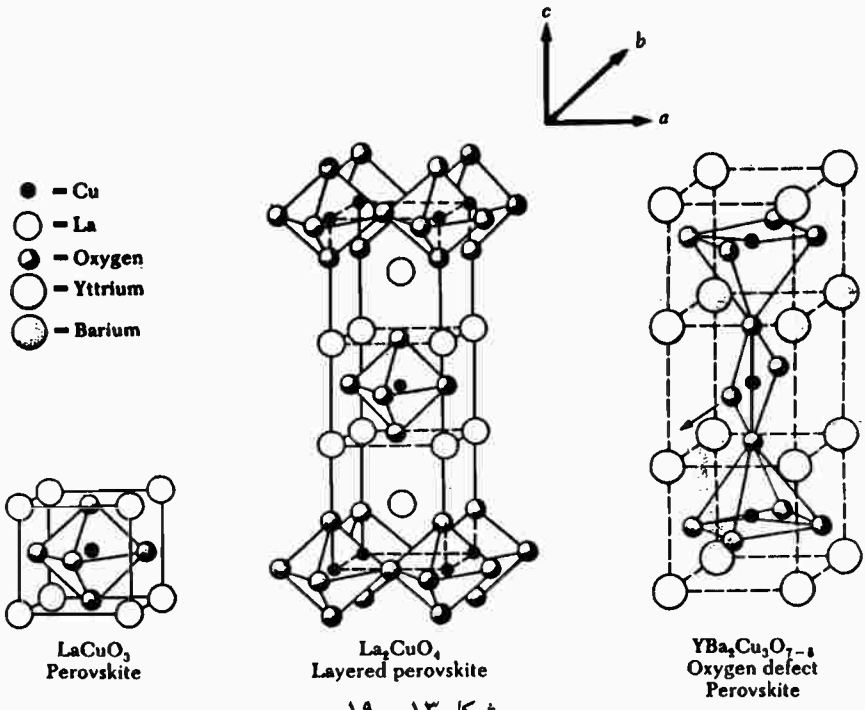
١ – طبقة من أكسيد النحاس Cu - O

٢ – طبقة من أكسيد الباريوم Ba - O

٣ – طبقة من ذرات الايتريوم Y

ويكون ترتيب هذه الطبقات كما مبين بشكل (١٣ – ١٩) كالآتى :

$Cu O_{1-\delta}$: Ba O : $Cu O_2$: Y : $Cu O_2$: Ba O



شكل ١٣ - ١٩

يختلف تركيب البنية للمركب وفقا للكمية δ التى تحدد عدد ذرات الأكسجين :

١ - إذا كانت $\delta \leq 0.5$ كانت البنية متماثلة من نوع orthorhombic

٢ - وإذا كانت $\delta \geq 0.5$ يكون للبنية تماثلا من نوع tetragonal

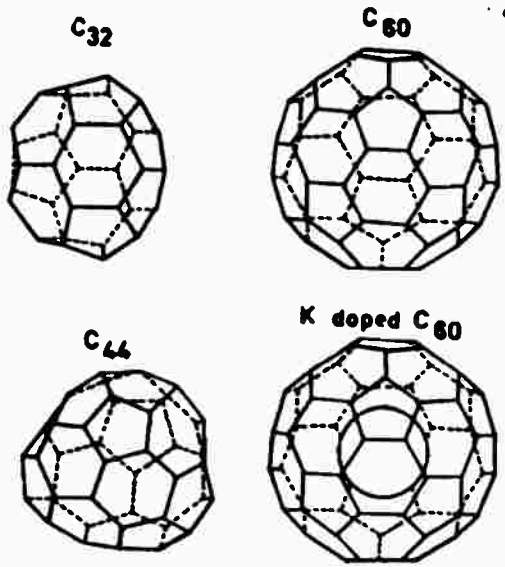
فى التركيب الأول ($\delta \leq 0.5$) تكون ذرات النحاس والأوكسجين سلاسل خطية فى اتجاه y كما فى الشكل وقد تثبت عمليا أن التوصيل الفائق يتم فى هذا التركيب orthorhombic من خلال طبقات أوكسيد النحاس $Cu\ O_{1-\delta}$ وفى اتجاه سلاسل Cu O فى هذه الطبقات .

أما عن ميكانيكية التوصيل الفائق فى مثل هذه المواد فقد أظهرت الحسابات النظرية للبنية النطاقية Band Structure على هذه الأكاسيد أنه من الصعب جدا تفسير ميكانيكية التوصيل الفائق على أساس نظرية الفعل البينى للإلكترونات مع فونونات الشبيكة B C S Theory وعلى أساس تكون أزواج كوبر .

وهناك نظريات شتى وافكار غير تقليدية لتفسير هذه الميكانيكية منها تأثير المستقطبات الثنائية bipolarons وتذبذبات اللف الإلكترونى spin fluctuations ورنين روابط التكافؤ resonating valence bonds . ولا يزال البحث جاريا .

الفولرين موصل فائق جديد Fullerine - C_{60} :

يعتبر اكتشاف الفولرين C_{60} من أهم اكتشافات الكيمياء الفيزيائية لعام ١٩٨٥م . فقد وجد مجموعة من العلماء أنه بتبخير الجرافيت بشعاع ليزر فى وجود غاز الهليوم يتكون جزىء عملاق من ذرات الكربون له بنيه كرويه مغلقه مجوفة من الداخل ، وقد سمى الجزىء بالفولرين تكريما لاسم فولر الذى وضع التصميم الهندسى لهذا الجزىء ، فلكى يتكون الجزىء يجب أن يتوفر إثنا عشر حلقه خماسية pentagons تتصل بعدد من الحلقات السداسية hexagons يتحدد بعددها شكل وحجم الجزىء . وأكثر هذه الجزيئات ثباتا واستقرار هو C_{60} الذى يتكون هيكله من ١٢ حلقه خماسية تتصل بعدد ٢٠ حلقه سداسيه لتكوين هيكل كرى تمام مثل كرة القدم . يوجد عند كل نقطة التقاء لهذه الحلقات ذرة من ذرات الكربون . وشكل (١٣ - ٢٠) يبين أشكال مختلفة من جزيئات الفولرين التي تتركب من عدد ٣٢ ، ٤٤ ، ٦٠ ذرة كربون .

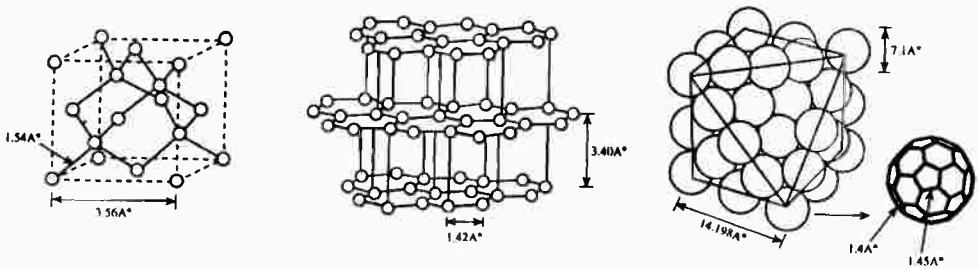


شكل (١٣ - ٢٠)

قوى الترابط فى الفولرين :

من المعترف به حاليا أن الفولرين هو الطور الثالث للكربون بعد الجرافيت والماس ، وبنية الفولرين تربط بين مستويات الجرافيت وتساهميه الماس . فقوى الترابط بين ذرات كربون الفولرين تساهمية بين ثلاثة ذرات فقط ، بينما الإلكترون الرابع يكون حرا لعمل رابطة π (π orbital) مع جزيئات فولرين مجاورة فى الشبيكة التى ثبت أنها تكعيبية متمركزة الوجه f°. c. c. ، حيث تكون القوى بين جزيئات الفولرين التى تشغل نقاط الشبيكة هى قوى فإن درفال .

ويبين شكل (١٣ – ٢١) مقارنة بين أطوار الكربون المختلفة :



الفلورين – ٦٠ الجرافيت الماس

شكل (١٣ – ٢١)

خواص الفولرين وموصليته الفائقة :

بعد أن اكتشفت طريقة سهلة لتحضير الفولرين عكف العديد من العلماء فى شتى أنحاء العالم على دراسة خواصه ، وقد كانت طريقة تحضيره تعتمد على إشعال قوس كهربائى فى جو من الهليوم ، وجمع المادة المتجمعة وإذابتها فى البنزين أو التولوين . فلا يتبقى دون ذوبان إلا الفولرين ، وبذلك يتم فصله عن الشوائب الأخرى .

وبدراسة خواص الفولرين وجد أن معامل أنضغاطه الطولى صغير جدا بينما معامل

إنضغاطه الحجمى كبير جدا نظرا لتجوف الجزىء . ولذلك فيعتبر الفولرين أفضل من الجرافيت من حيث قدرته التشحيمية – لأجزاء الالات المتحركة خاصة إذا كانت الحركة مع درجة حرارة مرتفعة .

ومن أهم صفات الفولرين قابليته للتفاعل مع الذرات المعطاءة لإلكتروناتها مثل : الهاليدات القلوية ، مثل الليثيوم والصوديوم والبوتاسيوم والروبيديوم والسيزيوم . وتعطى ذرات هذه المواد ألكتروناتها الخارجية (s - electrons) للفولرين مما يملأ جزئيا نطاق التوصيل ، وبذلك يتحول الفولرين إلى موصل جيد للكهرباء .

وقد ظهر للبوتاسيوم فولرين $K_X\ C_{60}$ خواص موصلية فائقة درجتها الحرجة $T_c = 18\ k$ ، وبالتجربة أمكن رفع الدرجة الحرجة لتصبح $T_c = 28\ k$ فى حالة $Rb_x\ C_{60}$ فولريد الروبيديوم . وباستخدام الاشعة السينية وجد أن الطور الموصل الفائق ينشأ عند اتحاد ثلاث ذرات من الهاليدات القلوية مع الفولرين ، مثلا : $K_3\ C_{60}$ ، أما إذا اتحد ستة ذرات مع جزىء الفولرين $K_6\ C_{60}$ ينتج طور عازل كهربيا ، وكلما إزداد البعد الشبيكى فى بلورة الفولرين التكعيبيه كلما ازدادت الدرجة الحرجة T_c للموصل الفائق .

ويتوقع العلماء للفولرين مستقبلا تكنولوجيا عظيما عن جميع الأنواع الأخرى من الموصلات الفائقة .

مسائل وتمارين علي الباب الثالث عشر

١ – سلك من الرصاص نصف قطره 3 m m فى درجة حرارة 4.20 K أوجد :

أ – المجال المغناطيسى الحرج عند هذه الدرجة .

ب – أكبر تيار يمكن للسلك أن يمرره عند هذه الدرجة .

٢ – ملف لولبى عدد لفاته 150 لفه لكل سم^{٢} يتكون سلكه من مادة ذات موصليه فائقة من النوع الأول مجالها الحرج $H_c = 32\ T$ عند الصفر المطلق ودرجة حرارتها الحرجة $T_c = 18\ K$ أوجد :

أ – شدة التيار المداوم الذى يحدث مجالا مغناطيسيا 5 T داخل الملف .

ب – أكبر تيار يمكن إمراره فى الملف إذا حفظت درجة حرارته عند 15 K

$\left(\mu_0 = 2\,\pi \times 10^{-7}\ \ N / A^2\right)$

٣ – أثبت بالإستعانة بقاعدة أمبير أن تيارات التوصيل تكون دائما تيارات سطحية لا تخترق قلب الموصل .

٤ – أوجد طاقة الشغرة للرصاص فائق التوصيل إذا كانت درجته الحرجة $T_c = 7.193\ K$ ثم أوجد أقل طاقة فوتونية يمكن أن تمتص بالرصاص عند الصفر المطلق؟

٥ – أوجد شدة التيار المداوم الذى يتكون فى حلقة من النيوبيوم الموصل الفائق قطرها 2 cm إذا وضعت عموديه على مجال مغناطيسى شدته 0.02 T ، ثم أزيل المجال فجأة علما بأن الحث الذاتى للحلقة $L = 3.1 \times 10^{-8}\ H$ ؟

٦ – أوجد طاقة الثغرة للموصل الفائق عالى الدرجة $Y\,Ba_2\,Cu_3\,O_{7-\delta}$ إذا كانت درجته الحرجة $T_c = 92\ K$ بفرض صحة نظرية B C S .

٧ – سكويد نصف قطره 2 mm يمكنه قياس فيض مغناطيسى $10^{-4}\ \phi_0$ ما هو أقل تغير فى مجال مغناطيسى يمكن أن يسجله ؟

٨ – تتغير الأنتروبيا لوحدة الحجوم من الحالة المعتادة للتوصيل إلى حالة الموصلية الفائقة وفقا للمعادلة :

$$\frac{\Delta S}{V} = -\frac{\delta}{\delta T}\left(\frac{B^2}{2\mu_0}\right)$$

حيث $\frac{B^2}{2\mu_0}$ هى الطاقة المغناطيسية لوحدة الحجوم اللازمة لإزالة الموصلية الفائقة .

أوجد مقدار التغير فى الأنتروبيا فى حالة 1 mol من الرصاص عند درجة 4 K إذا كان المجال المغناطيسى الحرج والدرجة الحرجة $B_C(0) = 0.08\ T\ ;\ T_C = 7.2\ K$

٩ – عند درجة حرارة أقل من الدرجة الحرجة لموصل فائق تكون طاقة ترابط الكترونى كوبر 0.1 m eV أقل من طاقة الإلكترونين عندما لا يكونا مترابطين ، أى أن هناك ثغرة بين مستوى طاقة زوج كوبر والمستوى الإلكترونى فى نطاق الكترونى .

ارسم مستويات الطاقة فى النطاق الإلكترونى لزوج كوبر مع توضيح على الشكل مستوى طاقة التهيج الحرارى $k\,T$ عند درجة 1 K . واشرح لماذا يكون زوج كوبر مستقرا عند درجة 1 K .

١٠ – أسطوانة مجوفة من مادة ذات موصلية فائقة القطر الداخلى لها 25 μ m . يوجد مجال مغناطيسى فى المنطقة المفرغه من الاسطوانة فى اتجاه المحور ، أوجد شدة

هذا المجال إذا مر بالمنطقة المجوفة بالأسطوانة كمة واحدة من الفيض المغنطيسى .

١١ – ملف من مادة موصلة فائقة عدد لفاته 3000 لفة لكل متر يمر به تيار فائق شدته 12 A . للملف قلب مفرغ نصف قطره 7.5 mm .

أ – أوجد شدة المجال المغنطيسى داخل الملف ؟

ب – أوجد مقدار الفيض المغنطيسى المار فى قلب الملف المفرغ ؟

جـ – أوجد عدد الكمات من الفيض التى تمر بالقلب المفرغ ؟

د – ماذا يكون التغير فى الفيض المغنطيسى إذا زاد عدد الكمات للفيض بمقدار كمة واحدة؟

١٢ – سلك من موصل فائق من النوع الثانى نصف قطره R يحمل تيارا موزع بانتظام على مساحة مقطعة إذا كان التيار الكلى المار بالسلك هو I أثبت أن الطاقة المغنطيسية لوحدة الطول من السلك داخلة هى $\left(\mu_0 \ I^2 \ / \ 16 \ \pi\right)$ ؟