وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعـــة القادسيـــة

كلـــيـــة الـــتربيـــه
قسم الفيزياء

م البحث / المواد فائقة التوصيل

مقدم البحث / الطالب: ضرغام حسن غازي

مقدم البحث / الطالب : كرار محمد صالح

شكر وتقدير

إلى أساتذة قسم الفيزياء المحترمين وأخص بالشكر الجزيل

الدكتوره هناء سلمان حسين

على كل ما بذلته من جهد وعناء كبيرين فأدامها الله لخدمة

العلم أنه نعم المولى ونعم المجيب.

الاهداء

إلـــــى مـــــن أعـــــيش لرؤيـــــاهم وتحـــــت حنـــــانهم (والـــــــــــــــدتي ووالـــــــــــــــدي).

إلى من ترى العيون بنورهم وتفرح لوجودهم وتحزن لفراقهم إلى من لا طعم للحديث بدونهم ولا معنى للحياة بغيرهم إلى من هم مني وأنا مـــــنهم إلـــــى شـــــموع حيـــــاتي (أخـــــوتي واخـــــواتي).

إلى من امتلكتهم وامتلكوني إلى من بطيبهم ملكوني إلى من سالت وتسيل لأجلهم عيوني إلى من بفراقهم يعذبوني طلبي منهم لا تنسوني (أصـــــــــــــــــــــــــدقائي).

بسم الله الرحمن الرحيم

اقْرَأْ بِاسْمِ رَبِّكَ الَّذِي خَلَقَ * خَلَقَ الْإِنْسَانَ مِنْ عَلَقٍ * اقْرَأْ وَرَبُّكَ الْأَكْرَمُ * الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ * عَلَّمَ الْإِنْسَانَ مَا لَمْ يَعْلَمْ*

صدق الله العظيم

الخلاصة

لقد فتحت التجارب في السنوات الأخيرة مجالاً واسعاً للتعرف على أكثر من ٣٠ عنصراً ومئات من المركبات تصلح لان تكون فائقة التوصيل عند درجات حرارة حرجة. وتشهد ظاهرة التوصيل الفائق هذه الأيام تنافسا دولياً إذ إن تطبيقاتها ستشكل ثورة حقيقية في نهاية القرن العشرين حيث إنها ستفتح افاقاً في عدة مجالات.

كذلك فإن هذه المواد لها تطبيقات عديدة في مجال الالكترونيات لما تمتاز به من قدرة عالية في فتح وإغلاق الدائرة الكهربائية لتمرير التيار ومنعه، وهذا يشكل العنصر أساسي في بني الكمبيوتر والبحث جار الآن لإدخال هذه المواد في صناعة السوبر كمبيوتر، وإذا ما توصل إلى ذلك فإن هذا سوف يؤدى إلى تطور كبير في مجال الكمبيوتر. أما في مجال الطب فقد تم صناعة أجهزة ذات حساسية عالية جداً للمجالات المغناطيسية المنخفضة الشدة، وتستخدم الآن كبديل للمواد المشعة المستخدمة في تشخيص الأمراض التي قد تصيب الدماغ، حيث يتم الكشف عن التغير في المجال المغناطيسي المنبعث من الدماغ والتي تبلغ شدته(١٠-١٣) تسلا، وهذا مقدار صغير جداً لكن تلك الأجهزة قادرة على قياسه، كذلك يمكن بدقة تحديد مصدر الإشارات العصبية الصادرة من الدماغ وأيضا يمكن أن تستخدم في البحث عن المعادن الدفينة في باطن الأرض وعن مصادر المياه والنفط لأنها تحدث تغيراً طفيفاً في المجال المغناطيسي للأرض وهذا التغير يمكن التقاطه بواسطة هذه الأجهزة.

المحتويات

الفقرة	العنوان	الصفحة
	شكر وتقدير	٢
	الاهداء	٣
	الاية القرآنية	٤
	الخلاصة	٥
	المحتويات	٦
	الفصل الاول المقدمة	٧
١-١	مقدمة	٨
١-٢	تأريخ الموصلات الفائقة	٨
١-٣	خصائص المواد فائقة التوصيل	١٠
١-٤	المواد ذات التوصيلية الفائقة	١١
	الفصل الثاني	١٢
٢-١	ظاهرة التوصيلية الفائقة	١٣
2-٢	ظاهرة الطفو	١٥
٢-٣	طاقة الفجوة	١٦
٢-٤	ازواج كوبر	١٦
٢-٥	المواد الفائقة ذات الحرارة العالية	١٧
٢-٦	نظرية المواد فائقة التوصيل	١٨
٢-٧	طرد المجال المغناطيسي من داخل الموصلات الفائقة	٢٠
	الفصل الثالث تطبيقات المواد فائقة التوصيل	٢٥
٣-١	تطبيقات المواد فائقة التوصيل	٢٦
٣-٢	الاستنتاجات	٢٨
	المصادر	٣٠

الفصل الاول

المقدمة

١-١ المقدمة

إن ظاهرة التوصيلية الفائقة مثيرة من جميع جوانبها سواء ما يتعلق بدراستها أو ما يتعلق بتطبيقاتها. فسلوكها الكهربي (عدم المقاومة للتيار) وسلوكها المغناطيسي (رفض المجال المغناطيسي) وهما السمتان البارزتان لها؛ جعلا منها مواد ذات تطبيقات غير محصورة. فمن المعلوم أن مقاومة التيار الكهربي في جميع المواد العادية هي السبب في ضياع وفقد الكثير من الطاقة الكهربائية وهي السبب أيضاً في عطل كثير من الأجهزة الكهربائية وارتفاع حرارتها. ومن جهة ثانية فالمجال المغناطيسي اعتاد على التغلغل في جميع المواد العادية بدون استثناء. وأما المواد الفائقة فمقاومتها للتيار الكهربائي تصل إلى الصفر، وهو صفر غير مبالغ فيه من الناحية العملية، مع أن البعض ذكر أنه ربما توجد مقاومة في حدود ومن ناحية أخرى فالمجالات المغناطيسية لا تستطيع الدخول إلى جسم الموصل الفائق مادام بصورته الفائقة مما يبشر بتطبيقات كثيرة تعتمد على تلك الخاصية على وجه التحديد. ومن التطبيقات ما يتعلق بالنواحي العسكرية ومنها ما يتعلق بالنواحي المدنية والصحية والمواصلات وغير ذلك .

١-٢ تأريخ الموصلات الفائقة

في عام ١٩٠٨ م نجح العالم الهولندي الشهير هيك كامرلين أونيس في ضغط ثم إسالة غاز الهليوم الذي يتحول من الحالة الغازية إلى السائلة عند درجة ٤,٢ كالفن (-٢٦٨ درجة مئوية) وبعدها بثلاث سنوات وأثناء دراساته على مقاومية بعض العناصر، لاحظ انعدام المقاومة لمادة الزئبق النقي عندما تقترب درجة حرارته من الصفر المطلق .وقد استحق هذا العالم جائزة نوبل في الفيزياء بسبب هذين الاكتشافين. واصطلح بعد ذلك على تسمية درجة الحرارة التي تفقد المادة عندها مقاومتها وتتحول من مادة عادية إلى موصل فائق بدرجة حرارة التحول (Critical Temperature)، أو اختصاراً بدرجة التحول ويرمز لها بالرمز TC . وأطلق على تلك المواد بالمواد فائقة التوصيل. وبعد هذا الاكتشاف استمر العلماء بالبحث عن مواد ذات درجات تحول أعلى. غير أن هذا البحث استمر لفترة طويلة دون كسر حاجز العشر درجات كالفن حتى اكتشف مركب النايوبيوم NbN في أول الأربعينيات حيث

وصلت درجة التحول إلى حوالي ١٥ درجة كالفن واستمرت كذلك ولمدة ثلاثين سنة وبالتحديد حتى عام ١٩٧٣ حيث أضيف مركب جديد ذو درجة تحول تصل إلى ٢٣ كالفن. والمركب المقصود هو.Nb3Ge.

وحصلت بعد ذلك قفزة متميزة في سجل المواد فائقة التوصيل عندما قام كل من جورج بدنورز وكارل ميولار (J. George Bednorz and Kark Alex Muller) في عام 1986بنشر تقرير حول نجاحهما في تحضير مركب سيراميكي هو La-Ba-Cu-O درجة تحوله في حدود ٣٠ كالفن تم تحضيره في معامل شركة IBM في سويسرا وقد استحق العالمان جائزة نوبل بالمشاركة ليس للقفزة في حرارة التحول ولكن لأنهما فتحا المجال لتحضير مواد سيراميكية لأول مرة. وسرعان ما قاد ذلك الاكتشاف مجموعة البحث في جامعة هيوستن بالتعاون مع مجموعة مماثلة في جامعة ألاباما الأمريكيتين إلى استبدال عنصر اللانثانيوم بعنصر اليتريوم للحصول على السيراميك Y-Ba-Cu-O والذي فاقت حرارة تحوله ولأول مرة في التاريخ درجة الغليان لغاز النيتروجين والبالغة ٧٧ كالفن. لقد وصلت حرارة التحول إلى أكثر من ٩٠ كالفن لذلك المركب الذي اكتشف في يناير من عام ١٩٨٧ والذي سرعان ما صار أساساً لعدة مركبات تلته على الفور عندما التفت عدد ضخم من الباحثين وعلى طول العالم وعرضه إلى دراسة ذلك الجيل الجديد من المركبات يحدوهم أمل كبير بالحصول على مركبات تتحول عند حرارة الغرفة.

بعد سنة تقريباً تم اكتشاف مركب Bi-Sr-Ca-Cu-O ذي درجة التحول البالغة 110درجات كالفن وبعده بقليل اكتشف مركب الثاليوم Tl-Ba-Ca-Cu-O والذي يفقد مقاومته الكهربائية نهائياً عند ١٢٥ كالفن وازدادت بذلك القوة الحثية التي كانت قوية من الأصل والتي حولت الأنظار إلى تلك المركبات غير العادية .غير أن إضافة مركبات جديدة لم يتحقق إلا بعد عدة سنوات في حوالي عام ١٩٩٣ عندما أضيف مركب الزئبق-Hg-Ba : Ca-Cu-Oوالذي يتحول عند ١٣٥ درجة كالفن ولم تتم أية إضافة تذكر حتى يومنا هذا. و قد يصح لي أن أقول: إننا بدأنا بالزئبق وانتهينا به !والحق أن درجة الحرارة التحولية وصلت إلى ١٦٠ كالفن لبعض المركبات والتي منها مركبات الزئبق خاصة، غير أنه هذا عندما يتم تسليط ضغوط عالية جداً.

وباكتشاف المركبات التي تفوق حرارتها ٧٧ درجة كالفن وهي درجة غليان النيتروجين؛ دخلنا عصراً جديداً من الموصلات وهو ما اصطلح على تسميته بالموصلات فائقة التوصيل عالية الحرارة High Temperature Superconductors واختصاراً بـ HTSفي حين حملت الفئات السابقة لذلك التاريخ اسم: الموصلات فائقة التوصيل التقليدية Low Temperature Superconductorsواختصاراً بـ .LTS :إن لاكتشاف الموصلات الجديدة أهمية خاصة حيث أن استخدام النيتروجين المسال رخيص جداً وغير مكلف في نقله وحفظه مما يبشر بتطبيقات كثيرة. لقد كانت فكرة الحصول على موصلات فائقة عند حرارة الغرفة فكرة سخيفة تنال الضحك من سائر العاملين في مجال المواد حتى عام ١٩٨٧ عندما صار الحلم أقرب ما يكون إلى الحقيقة!

٣-١ خصائص المواد فائقة التوصيل

عند درجة حرارة معينة تعرف بدرجة حرارة التحول تصبح مقاومته هذه المواد للتيار الكهربي مساوية للصفر. اكتشف كذلك أن هذه المواد عند درجة حرارة التحول حساسة جداً للمجال المغناطيسي، حيث تنفر المجال المغناطسيى الخارجي أي أنها تعكس المجال المغناطيسي مهما ضعفت شدته.

هاتان الخاصيتان فتحت الأبواب أمام العلماء لاستغلالها في ابتكارات واختراعات ذات كفاءة عالية تدخل في معظم مجالات العلوم والتكنولوجيا، حيث أن هذه المواد (Superconductors)سوف تحل محل أنصاف الموصلات (Semiconductors) التي تدخل الآن في صناعة الترانزيستور و الدوائر الالكترونية المتكاملة.

ان المقاومة الكهربية للموصلات المعدنية تنخفض تدريجيا مع انخفاض درجة الحرارة، وفي حالة الموصلات العادية كالنحاس أو الفضة فإن الشوائب الموجودة في المادة تساعد على الوصول لحد أدنى من المقاومة على درجات الحرارة المنخفضة ولكن حتى على ما يقارب درجة الصفر المطلق فإن عينة من النحاس مثلا لا يمكن أن تتوصل لدرجة ممانعة تساوي الصفر. أما في حالة الموصلات الفائقة فإن الممانعة تنخفض على نحو مفاجيء إلى الصفر عندما يتم تبريد المادة إلى درجة حرارة أقل من الدرجة الحرجة لهذه المادة، غالبا ٢٠ كلفن أو أقل.

ففي حالة التوصيل المطلق يمكن لتيار كهربائي يمر في حلقة من مادة فائقة التوصيل أن يستمر في السريان إلى وقت نحو غير محدود وبدون وجود مصدر للطاقة. وتعد ظاهرة التوصيل الفائق ظاهرة ميكانيكا كمية ولا يمكن فهما على أساس أنها تجسيد لظاهرة الموصل المثالي ضمن إطار الميكانيكا الكلاسيكية.

وتحدث حالة التوصيل الفائق في تشكيلة واسعة من المواد مثل: المواد الخفيفة كالقصدير والألمنيوم، والسيراميك والسبائك الثقيلة، وبعض أشباه الموصلات ولكن لا يمكن صنع موصلات فائقة من المعادن النبيلة كالذهب والفضة، ولا من المعادن الفرومفناطيسية.

٤-١ المواد ذات التوصلية الفائقة

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

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

أما النوع الثاني type II superconductor فإنه يطرد الحقل المغنطيسي حتى تبلغ شدته قيمة تدعى الحقل الحرج السفليHc1 ، يبدأ عندها الحقل بولوج المادة جزئياً، وذلك على شكل كمّات من التدفق تدعى الدوامات المغنطيسية .vortex ويزداد عدد هذه الكمّات ضمن المادة كلما ارتفعت شدة الحقل إلى أن تبلغ قيمة الحقل الحرج العلوي Hc2 الذي تفقد المادة عنده حالة الناقلية الفائقة لتعود إلى الحالة الطبيعية .

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

.

الفصل الثاني

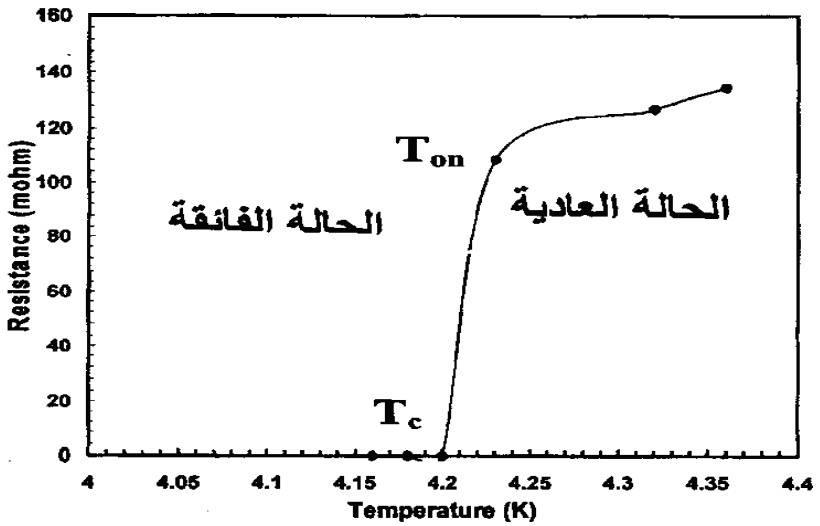
١-٢ ظاهرة التوصلية الفائقة

من المعلوم أن المقاومة الكهربية للجوامد تنشأ أثر حيود البلورات الحقيقية عن سلوك الشبيكة البلورية المثالية للمواد والتي تساعد علي تشتت الإلكترونات أثناء عملية التوصيل الكهربي مما يؤدي إلي فقد جزء كبير من الطاقة الكهربية علي شكل حرارة . ولذلك فقد كان الاعتقاد السائد هو استحالة انعدام المقاومة الكهربية (الموصلية الكهربية تساوي مالا نهائية) لتلك البلورات مع انخفاض درجة الحرارة حتى عند الصفر المطلق نظرا لعدم إمكانية تحضير بلورات مثالية تكون خالية تماما من العيوب البلورية . علاوة علي ذلك فإن تشتت الإلكترونات علي بعضها البعض ينشىء هو الآخر قدراً ملموسا من المقاومة الكهربية حتى في إهمال تشتت الإلكترونات علي الفونونات وعيوب الشبيكة البلورية . الجدير بالذكر أن المقاومة الكهربية للمواد وحتى نهاية القرن الثامن عشر كانت تقاس حتى درجات حرارة منخفضة والتي كانت درجة حرارة النتروجين السائل 77 درجة مطلقة (أي ما يعادل 196 درجة تحت الصفر المئوي) . لكن مع بداية القرن التاسع عشر تمكن الباحثين من الحصول علي الهليوم السائل والذي وصلت درجة حرارته إلي 4.2 درجة مطلقة (أي ما يعادل 268.8 درجة تحت الصفر المئوي) . وبالتالي تمكن الباحثين من قياس المقاومة الكهربية للمواد عند درجات حرارة منخفضة حتى هذه الدرجة .

في عام 1911 بينما كان العالم الهولندي هيك كامرلين أونيس يقوم بقياس المقاومة الكهربية للزئبق النقي عند درجة حرارة الهليوم السائل وجد أن المقاومة الكهربية للزئبق تنهار وتؤول إلى أقل من 0.00001 أوم (الصفر تقريبا) كما يتضح في شكل (١) . ولذا أطلق أونيس علي هذه الظاهرة بالموصلية الفائقة لأن التوصيل الكهربي يصل للما لانهاية عند هذه الدرجة . كما أطلق علي درجة الحرارة التي تتحول عندها المادة من الحالة العادية إلي الحالة الفائقة بدرجة الحرارة الحرجة T_c . بينما درجة الحرارة التي تبدأ عندها المقاومة الكهربية في الانخفاض المفاجئ سميت بدرجة حرارة التحول T_{on} كما يعرف الفرق بين درجة الحرارة الحرجة ودرجة حرارة البداية بعرض الانتقال .

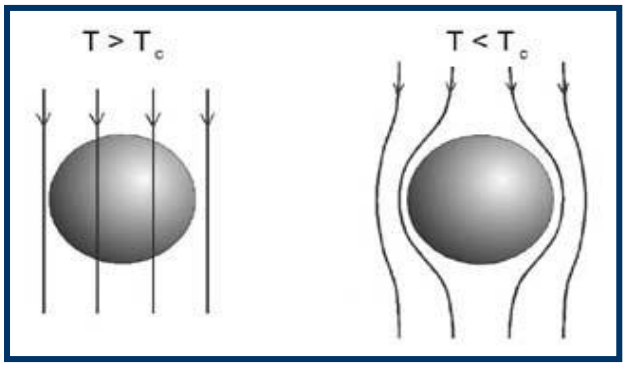
أما سلوك المقاومة الكهربية خلال المنطقة من درجة حرارة الغرفة وحتى درجة حرارة التحول يسمي بالحالة العادية نظرا لأن المادة تسلك سلوك الموصلات حيث تزداد المقاومة مع زيادة درجة الحرارة . بينما يعرف سلوك المادة عند درجة حرارة أقل من أو

تساوي الدرجة الحرجة بالحالة الفائقة حيث تنعدم المقاومة الكهربية للمادة تماما في تلك المنطقة . وبالطبع كان أونيس أول عالم أكتشف هذه الظاهرة وقد حصل علي جائزة نوبل عن استحقاق لهذا الإنجاز العظيم في عام 1913 .



شكل (١) : سلوك المقاومة الكهربية مع درجة الحرارة للزئبق فائق التوصيل

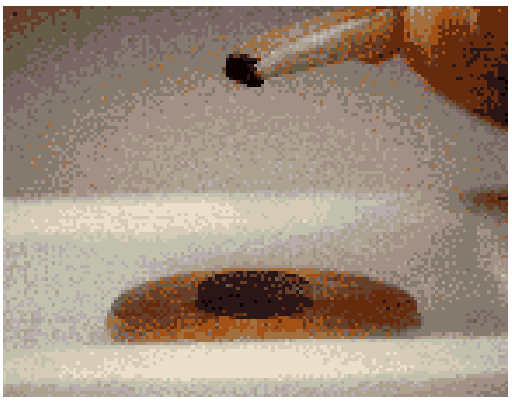
علي الجانب الأخر فإنه في عام 1933 وجد العالمان الألمان ميز نر و أوشنفيلد أن المواد فائقة التوصيل تطرد المجال المغناطيسي المطبق عليها إلي الخارج و ذلك عند تبريدها حتى درجة الحرارة الحرجة وفي وجود المجال المغناطيسي كما يتضح في شكل (٢) . ونظراً لحدوث هذه الظاهرة فقد صنف ميزنر وأوشنفيلد المواد الفائقة علي أنها من عائلة المواد الدايامغناطيسية . ويختلف هذا السلوك تماما مع ما يحدث في الموصلات حيث تنشأ تيارات تأثيرية عند وضعها في المجال المغناطيسي ولكن سرعان ما يزول هذا التيار أثر المقاومة الكهربية للمادة ويستطيع المجال اختراق المادة . لكن في المواد فائقة التوصيل فإن هذه التيارات التأثيرية تكون دائمة ولا تنعدم نظرا لانعدام المقاومة الكهربية لتلك المواد مما يساعد في إنتاج عزوم مغناطيسية تعاكس المجال المغناطيسي الخارجي فتمنعه من اختراقها . وقد سميت هذه الظاهرة بتأثير ميزنر نسبة إلى العالم ميزنر . هذا وقد وجد أن القابلية المغناطيسية للمادة الفائقة تساوي سالب الواحد الصحيح مما يؤكد على أن المادة الفائقة تولد عزم مغناطيسي مضاد ومساو للمجال المغناطيسي الخارجي وبالتالي لا يستطيع المجال اختراقها كما هو الحال في المواد الدايامغناطيسية .



شكل (٢) : سلوك المجال المغناطيسي للمواد في الحالة العادية والحالة الفائقة

٢-٢ ظاهرة الطفو Floating phenomena

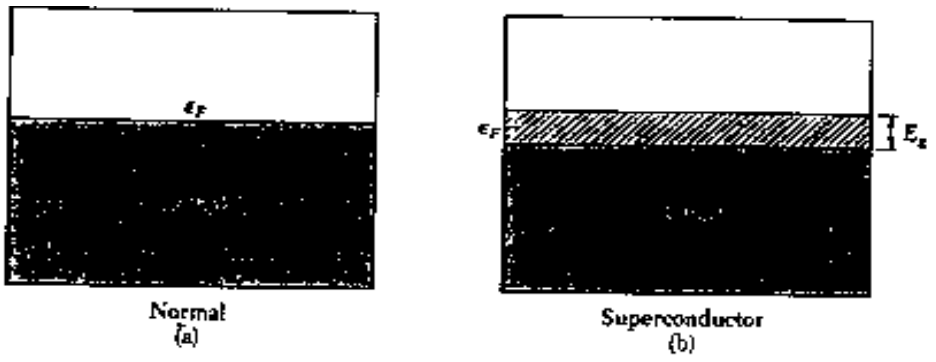
من المعلوم أن الموصل الفائق هو موصل تام التوصيل و تنعدم مقاومته الكهربية عند درجة الحرارة الحرجة. ولذا فإننا إذا أدخلنا تياراً كهربياً في حلقة من سلك فائق التوصيل فإن هذا التيار سوف يستمر في السريان إلى ما شاء الله طالما أن السلك يظل محتفظاً بموصلتيه الفائقة. في احدي التجارب استمر سريان التيار بدون انقطاع في حلقة من سلك فائق التوصيل لمدة عامين ونصف دون أي نقص في شدته و دون تغذية الحلقة بأي مصدر كهربي خارجي. و لقد تم تسمية التيارات التي لا تجد أية مقاومة لسريانه في موصل فائق بالتيارات الدائمة والتي تحدث عند مجالات مغناطيسية متغيرة مما ينشأ ظاهرة الطفو المثيرة الموضحة بالشكل (٣) . عند وضع مغناطيس صغير فوق موصل فائق فإن المجال المغناطيسي علي سطح الموصل الفائق يسبب تيارات دائمة تُنشئ قوي تنافر مع المغناطيس بحيث تقوي وتشتد كثيراً باقتراب المغناطيس من الموصل الفائق حتى يتم رفع المغناطيس في الهواء فيظهر وكأنه عائم في الهواء .



شكل (٣) : ظاهرة الطفو في المواد فائقة التوصيل

٢-٣ طاقة الفجوة : Energy gap

في الموصلات تنعدم تقريبا طاقة الفجوة ويكون شريط التكافؤ ملاصق لشريط التوصيل . ولقد كان المعتقد عدم وجود طاقة فجوة في المواد فائقة التوصيل كما هو الحال في الموصلات . ولكن تبين العكس ووجد أن هناك طاقة فجوة تنشأ من خلال التفاعل بين الإلكترونات لتكوين ما يسمي بأزواج كوبر مما يتسبب في وضع الإلكترون في مستوي فارغ بالنسبة لموضعه في مستوي فيرمي للغازات كما يتضح في شكل (٤) .



شكل (٤) : شريط التوصيل للحالة العادية و طاقة الفجوة للحالة الفائقة

٢-٤ أزواج كوبر Cooper Pair

في 1957 حدث تقدم ملحوظ في علم الموصلية الفائقة بواسطة الفيزيائيين الأمريكان Bardeen, Cooper and Schrieffer Theory (BCS) . هؤلاء العلماء الثلاثة أسسو نظرية BCS للموصلية الفائقة للمواد عند درجات الحرارة القريبة من الصفر المطلق . لقد وجدت النظرية حلاً يفسر ميكانيكية التوصيل الكهربي في المواد الفائقة والتي تبنى على فكرة أزواج كوبر نسبة إلى العالم كوبر أحد مؤسسي النظرية .

لقد أشارت النظرية إلي أن هناك قوي ترابط تنشأ بين الإلكترونات في المواد فائقة التوصيل بخلاف ما تمليه النظرية الكلاسيكية من وجود قوي التنافر لكولوم بين الإلكترونات سالبة الشحنة بحيث يحدث تجاذب بين الإلكترون ونظيره لتكوين ما يسمي بأزواج كوبر . هذه العملية تحدث نتيجة تفاعل الإلكترون مع الشبيكة البلورية والتي تعمل

علي جعل أحد الإلكترونات كما لو كان محاط بحاجز من الشحنات الموجبة بحيث تكون أكبر بكثير من الشحنات السالبة التي يمتلكها الإلكترون الثاني . وبذلك تطغي قوي التجاذب علي قوي التنافر مما يؤدي إلي تقارب الإلكترونين من بعضهما مكونين أزواج كوبر .

٢-٥ المواد الفائقة ذو الحرارة العالية : High T_c superconductors

جدول (١) يوضح أهم أنظمة المواد فائقة التوصيل التي تم التوصل إليها منذ اكتشافها حتى الآن وكذلك درجة الحرارة الحرجة لكل نظام .

سنة الاكتشاف	أسم المكتشف	النظام	الدرجة الحرجة بالكلفن
1986	Bednorz and Muller	$La_{2-x}Ba_xCuO_4$	35
1987	M.Tarascon et.al.	$La_{2-x}Sr_xCuO_4$ (La: 214)	38
1987	M.K.Wu et.al.	$YBa_2Cu_3O_7$ (Y: 123)	90
1988	M.Maeda et.al.	$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (Bi: 2223)	110
1989	Z.Z. Sheng et.al	$TI_2Ba_2Ca_2Cu_3O_8$ (TI: 2223)	127
1993	A. Shilling et.al	$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ (Hg: 1223)	134
1994	B.A. Hunter et.al. [13]	(Hg:1223) under pressure	164
2001	J.Akimitsu et.al.	$Mg\ B_2$	39

جدول (١) : أنظمة المواد فائقة التوصيل ذو الحرارة العالية

٦-٢ نظرية المواد فائقة التوصيل

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 ومع الأيونات والذرات التي تخرج عادة عن النظام الدوري الشبيكي المنتظم للمادة. وأيضاً بالتفاعل مع ما يسمى بالفونونات وهي عبارة عن كمات الطاقة الحرارية في داخل الموصلات. ولم يخطر على بال أحد أن تخرج مادة من المواد عن هذا الوضع الذي يسبب حصول مقاومة محدودة مهما كانت صغيرة. وتم وضع نظريات كثيرة يكمل بعضها بعضاً تصف ظاهرة التوصيلية والمقاومة في الموصلات بجدارة وكفاءة تامة. إلا أن تلك النظريات التقليدية وجدت نفسها وجهاً لوجه أمام ظاهرة لم تستطع تفسيرها على الإطلاق، ألا وهي ظاهرة التوصيلية الفائقة. أين ذهبت التصادمات بين الإلكترونات بعضها مع بعض؟ أين ذهبت الفونونات؟ بل أين ذهبت الحدود الشبيكية والعيوب التي لا تخلو منها في العادة الموصلات العادية؟ والتي هي السبب وراء حصول المقاومة.

أهم أساس قامت عليه النظرية هو فكرة الأزواج الإلكترونية (Cooper Pairs) أو أزواج كوبر نسبة إلى العالم كوبر أحد المؤسسين. ومن المعلوم أن الإلكترونات تحمل ذات الشحنة وبالتالي فحسب قانون كولوم يفترض أن تتنافر عن بعضها قدر المستطاع. إلا أن الظروف المواتية تعكس نتيجة القانون بميكانيكية خاصة لوحظت بسبب اعتماد التوصيلية الفائقة على أثر النظائر .والنظائر هي مواد من نفس النوع ولكن تختلف في العدد الذري. فقد وجد أنه كلما زاد العدد الذري لنظير كلما قلت (اقتربت من الصفر المطلق) درجة تحوله .وكان في هذا دليل كاف بأن الإلكترونات المسؤولة عن التوصيلية الفائقة لابد وأنها تتفاعل بطريقة أو أخرى مع الشبيكة بحيث تكون المحصلة لصالح الإلكترونات نفسها. فجاءت فكرة الأزواج لتفسر الأمر. فعندما يمر الإلكترون الأول بين الأيونات فإنه ولزمن قصير جداً يؤدي إلى انجذابها إليه ولكنه يمر بسرعة فيتركها وهي مازالت متقاربة من بعضها مما يؤدي إلى زيادة تركيز الشحنة الموجبة لحظياً في المنطقة. تلك الشحنة المركزة بدورها تجذب إلكترونا آخر إليها. وبهذه الطريقة يظل الجو مهيئاً لإلكترون آخر بحيث يكون الاثنان في وضع ارتباط دائم بصورة زوج. وهذا ما يطلق عليه حسب النظرية الكمية بمبدأ تبادل التفاعل من

خلال الفونون الذي هو وجه عملة آخر للقول بأن الإلكترون الأول يؤدي إلى اهتزاز الأيونات لصالح الإلكترون الثاني.

بالطبع الأزواج الإلكترونية تحمل شحنة مساوية إلى ضعف شحنة الإلكترون الفرد –٢ eولفاً مغزلياً مساوياً للصفر حيث أن أحد الزوجين لفه إلى أعلى (+٢/١ (والآخر لفه إلى أسفل (-٢/١) ولهما اندفاعان متضادان فيلغي بعضهما بعضاً .وكما هو معلوم في الفيزياء الإحصائية فإن الجسيمات الأولية في تجمعها في حالة واحدة ذات ظروف متشابهة تخضع للتوزيع الإحصائي بحسب لفها المغزلي .فإذا كان اللف كسرياً فإنه يستحيل – حسب مبدأ باولي – أن يجتمع أكثر من جسيمين في حالة واحدة وتسمى الجسيمات من هذا النوع فرميونات. أما عندما يكون اللف رقماً صحيحاً بما في ذلك الصفر؛ فإنه يجوز أن يجتمع عدد غير محدود من تلك الجسيمات في نفس الحالة كما في الفوتونات التي تجتمع فتشكل أشعة الليزر. وتسمى الجسيمات من هذا النوع بالبوزونات. وبالتالي فقد توصلنا إلى أن عدداً غير محدود من الأزواج الإلكترونية يجوز أن يتكثف في حالة كمية واحدة.

إن وضع الأزواج الإلكترونية جعل الشبيكة لا تؤثر في حركتها على الإطلاق وبالتالي فهي تتحرك دون مقاومة. ومن العجيب أن تلك الشبيكة باهتزازاتها هي المسؤولة عن المقاومة عند درجة حرارة الغرفة لنفس الموصل، فإذا هي تصبح العلة الكامنة وراء حصول ظاهرة التوصيل الفائق بمجرد التبريد إلى درجة حرارة معينة. وكان من جراء فكرة الأزواج الإلكترونية 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 الفجوة Eg هي ميزة خاصة بالموصلات الفائقة لا يشاركها فيها غيرها، أنظر الشكل ٣. حيث تتكون فجوة في الطاقة بين الحالات المملوءة تماماً بالإلكترونات وبين الحالات الفارغة تماماً قيمتها في حدود ١ . meV وهذه الطاقة تمثل الطاقة اللازمة لكسر الرابطة بين الزوجين الإلكترونيين. وتتنبأ نظرية BCSبالعلاقة التالية التي تربط بين طاقة الفجوة وبين درجة التحول للموصل عند درجة الصفر المطلق:

$$E_g = 3.53kT_c \qquad \text{---------- (1)}$$

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. وهناك علاقة أخرى تتوقع قيمة للمجال المغناطيسي الحرج للموصلات الفائقة التقليدية وهي:

$$H_C(T) = H_C(0)\left[1 - a\left(\frac{T}{T_C}\right)^2\right] \qquad \text{---------- (2)}$$

حيث تعبر T عن درجة الحرارة و HC(0) عبارة عن المجال الحرج عند الصفر المطلق. وهي مفيدة في حساب المجال الحرج الجوهري غير المتعلق بالشوائب والأخلاط لأن من شأن تلك الأمور أن تؤثر ظاهرياً في قيمة المجال الحرج.

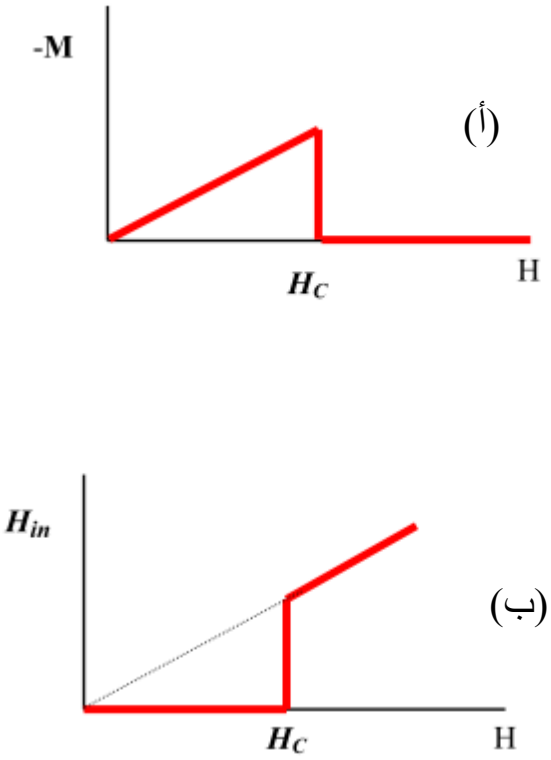
٢-٧ طرد المجال المغناطيسي من داخل الموصلات الفائقة

من أهم ميزات الموصلات الفائقة قدرتها على طرد المجالات المغناطيسية من داخلها أو من الوسط الذي تحتويه. والمسألة يمكن النظر إليها بالصورة التالية: عندما يتعرض موصل ما (من النوع الديامغناطيسي) إلى مجال مغناطيسي خارجي فإن ذلك الموصل يحاول التخلص من المجال باستحداث تيارات كهربائية تلف حول سطحه تسمى بالتيارات السطحية. ومن المعلوم أن التيار الكهربي يسبب حصول مجال مغناطيسي، وهو في حالة الموصل يكون بالضبط بعكس اتجاه المجال الأصلي (الخارجي). غير أن الموصلات العادية –كما هو معلوم – ذات مقاومة للتيار الكهربائي بما في ذلك التيارات المضادة للمجالات المغناطيسية . والنتيجة هي أن المجال المضاد يكون أقل كثيراً من المجال الخارجي وبالتالي فيدخل الأخير في قلب وبنية الموصل. والصورة تختلف تماماً عند الحديث عن الموصل الفائق. إن التيارات المضادة في هذه الحالة لا تقابل بأية مقاومة كهربية وبالتالي فلديها القدرة على الاستجابة التامة لشدة التيار الخارجي؛ فتزيد بزيادته وتقل بنقصانه بحيث توجد مجالات تتساوى معه بالضبط وتضاده في اتجاهها فيسلم جرم الموصل من المجال الخارجي حسب المعادلة التالية

$$M=-H \qquad \text{----------} \qquad (3)$$

حيث تمثل الـ M التمغنط (المجال المغناطيسي المضاد) وتمثل H المجال الخارجي المطبق. و من إشارة السالب ندرك أن التمغنط مساو تماماً للمجال الخارجي ومضاد له في الإشارة . والعجيب في الأمر أنه حتى لو كان هناك مجال مغناطيسي يتعرض له الموصل الفائق قبل تبريده؛ فإنه بمجرد التبريد تحت درجة التحول سوف يتم طرد المجال المغناطيسي الذي كان في داخله وتعرف الظاهرة بظاهرة مايزنار وهي أكثر وضوحاً في الموصلات من النوع الأول.

وهذا وتنقسم المواد الفائقة من حيث سلوكها مع المجال المغناطيسي الخارجي إلى قسمين رئيسيين: النوع الأول Type-I والنوع الثاني . Type-II ففي النوع الأول (معظم الموصلات التقليدية من هذا النوع)؛ يرفض الموصل المجال الخارجي تماماً حتى الوصول إلى مجال مغناطيسي معين يسمى المجال الحرج Critical Magnetic Field ورمزه H_C وعند هذا المجال يتم تدمير التوصيلية الفائقة تماماً ويدخل المجال المغناطيسي الخارجي إلى قلب الموصل ولا يعود الموصل بعدها إلى التوصيل الفائق مرة أخرى إلا بعد تسخينه فوق درجة تحوله ثم تبريده ثانية، وحيث أن التيار المار في الموصل يحدث مجالاً مغناطيسياً؛ فإن هذا النوع من المواد غير ملائم لكثير من التطبيقات التي تحتاج إلى تيارات عالية إذ إن تلك التيارات سوف تعود على الموصل بالتدمير وإنهاء خاصية التوصيل الفائق.



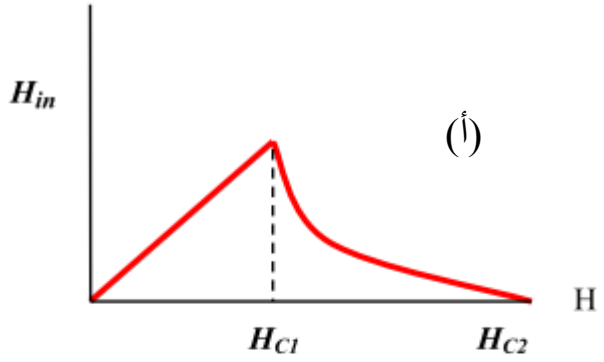
شكل (٥)

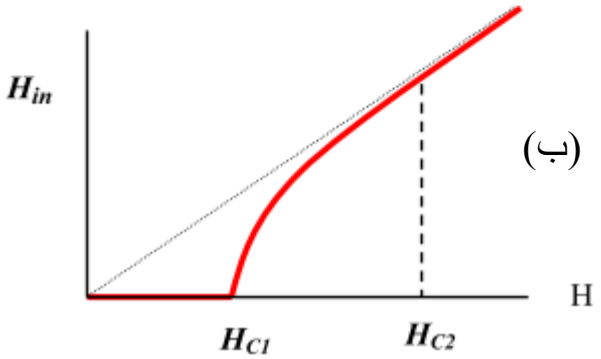
(أ) التمغنط مساو تماماً للمجال الخارجي ومختلف عنه في الأشارة حتى وصول لحظة المجال الحرج حيث يصبح التمغنط مساوياً للصفر بصورة فجائية. وفي الشكل نفسه جزء (ب) عند ذلك المجال الحرج يصبح المجال المغناطيسي في داخل الموصل الفائق فجأة مساوياً للمجال الخارجي وقد كان قبله مساوياً للصفر.

وأما الموصلات من النوع الثاني فهي مختلفة تماماً. إن لديها مجالان مغناطيسيان حرجان. فعند وصول المجال الخارجي إلى المجال الحرج الأول HC1 ، وهو عادة صغير؛ فإن التوصيلية الفائقة لا تفقد وإنما يتحول جزء من الموصل إلى موصل عادي. إن ذلك الجزء المتحول يظهر موزعاً بصورة بؤر منتظمة على طول وعرض الموصل بحيث يمر خط مغناطيسي واحد فقط من خلال كل بؤرة. يطلق على البؤرة الواحدة (فورتكس Vortex) ويطلق على الموصل الذي هو في الحالة الجامعة للتوصيل الفائق والعادي بأنه في الحالة المختلطة . Vortex State إن عدد البؤر الطبيعية تزداد كلما زاد المجال المغناطيسي الخارجي وتستمر في الزيادة حتى يأتي المجال على الموصل بكامله محولاً إياه إلى موصل عادي عند المجال الحرج الثاني . HC2 وهذا المجال الثاني كبير جداً إذا ما قورن بالمجال الحرج للموصلات من النوع الأول ويصل إلى عشرات التسلا. وحيث أن جميع الخواص المميزة للتوصيل الفائق تظل موجودة أثناء الحالة المختلطة وأن تلك الحالة تستمر إلى

حصول مجالات عالية جداً؛ صار هذا النوع من الموصلات مرشحاً لتطبيقات كثيرة جداً بغض النظر عن شدة التيار اللازمة .مشكلة بسيطة حصلت بسبب الحالة المختلطة وهي أن تلك البؤر تبدأ في الحركة عندما يمر التيار بقربها بسبب قوة لورانتس محدثة ضياعاً في الطاقة وبالتالي مدمرة للموصل نفسه. غير أن تلك المشكلة تم التغلب عليها بدراسة خواص الموصلات ووضع إسفينات خاصة تمسك بالبؤر كل إسفين يمسك بواحدة. تلك الإسفينات ويطلق عليها Pinning Centers تقوم بدور مهم وهو منع البؤر من الحركة. وزرع الإسفينات في الموصل يتم عادة بطرق كثيرة منها الإشعاع النيوتروني العمودي ومنها إضافة مواد معدنية على شكل مساحيق تخلط مع المادة الموصلة أثناء التحضير وغير ذلك الكثير من الطرق .

جميع الموصلات الفائقة عالية الحرارة تعد من النوع الثاني. ومن أهم فوائد الطرد المغناطيسي الاستفادة من الموصلات من هذا النوع في صنع دروع مغناطيسية توفر مناخاً خالياً من المجالات المغناطيسية. وبالتحديد فقد أمكن الحصول على دروع تصل قدرتها على العزل إلى ١٨٠. dB





شكل (٦)

(أ) التمغنط مساو تماماً للمجال الخارجي ومختلف عنه في الأشارة حتى وصول لحظة المجال المغناطيسي الحرج الأول حيث يقل التمغنط فجأة من حيث المقدار عن المجال الخارجي غير أنه لا يصل إلى الصفر تماماً إلا بعد زيادة المجال الخارجي بصورة كبيرة ووصوله إلى المجال الحرج الثاني. وفي الشكل نفسه جزء (ب) عند المجال الحرج الأول يصبح المجال المغناطيسي في داخل الموصل الفائق فجأة غير مساو للصفر إلا أنه أقل بكثير من المجال الخارجي حتى وصول المجال الحرج الثاني.

الفصل الثالث

تطبيقات المواد فائقة التوصيل

١-٣ تطبيقات المواد فائقة التوصيل : Superconducting application

١- جهاز سكويد :

يتركب جهاز سكويد لقياس شدة التمغنط من حلقة من الموصل الفائق مكونة من وصلتين من المواد فائقة التوصيل تسمي وصلات جوزيف صن . يتمكن جهاز سكويد من رصد التغير في الفيض المغناطيسي في ضوء الجهد المتردد الناتج أثر التغير في الطور بين أزواج كوبر عبر الوصلتين . ويتميز جهاز سكويد بحساسية عالية جدا لقياس الفيض المغناطيسي تصل إلى حوالي 10^{-14} تسلا . هذه المجالات تعتبر أقل من المجال المغناطيسي للأرض بمقدار 10^{11} مرة علي الأقل . وبالتالي فقد أستطاع الباحثين من استخدام جهاز سكويد في رصد المجالات المغناطيسية الناتجة عن أعضاء جسم الإنسان مثل القلب والمخ والجهاز العصبي والتي كان من الصعب رصدها بالأجهزة المعتادة حيث أنها كانت تتطلب حساسية عالية جدا في القياس نظرا لأن المجال المغناطيسي الناتج عن هذه الأعضاء يكون محدود جدا ويحتاج لدقة وحساسية عالية في القياس . على سبيل المثال المجال المغناطيسي للقلب يكون في حدود 10^{-10} تسلا و عن المخ يكون في حدود 10^{-13} تسلا .

٢- أجهزة الميكروويف Microwaves :

تتميز المواد الفائقة بصغر قيم المقاومة الكهربية عند درجات حرارة الغرفة . من المعلوم أيضا أنة يحدث فقد في شدة الميكروويف بالقرب من سطوح المواد نظرا للمقاومة الكهربية والتي تضعف من شدة الميكروويف بالقرب من سطوح تلك المواد . بمقارنة المقاومة النوعية للمواد الفائقة مع نظيرتها في المعادن عند الترددات العالية للميكروويف وجد أن مقاومة المواد الفائقة تكون أقل بكثير من المعادن مثل النحاس . وبالتالي فإنه يمكن طلاء أسطح أجهزة الميكروويف بمواد فائقة التوصيل لتلاشي الفقد في شدة الميكروويف عند الترددات العالية .

٣- كابلات القدرة : Power cables

لقد وجد أن المواد الفائقة تتحمل تيارات كهربية عالية مما أدي إلي تصنيع كابلات من المواد الفائقة بحيث تتمكن هذه الكابلات من حمل تيارات كهربية تصل إلي خمسة أضعاف ما يتحمله كابل من النحاس بنفس الأبعاد والمواصفات . وبالتالي تتمكن هذه الكابلات من نقل الطاقة من مكان لأخر بدون أي فقد يذكر مما سوف يساهم في نقل خطوط الطاقة بين الدول المختلفة إذا ما توفر الدعم اللازم لذلك .

٤- المغناطيس الفائق :Superconducting magnets

تستخدم المواد فائقة التوصيل في تصميم المغناطيس الفائق بحيث يتم تبريد المغناطيس الفائق في الهليوم السائل بحيث تكون المقاومة الكهربية للملفات مساوية للصفر مما يجعل الطاقة المفقودة مساوية للصفر حتى عن تسخين الأسلاك . ومن هنا فإن مصدر تيار منخفض يكون مناسب لمرور التيار بشرط المحافظة على درجة حرارة الهليوم السائل . وبالتالي فإنه يمكن الحصول علي مجالات مغناطيسية تفوق المغناطيس المصنوع من الموصلات بعشرات المرات .

٥- أجهزة الرادار : Radar apparatus

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

٦- القطار الفائق : Superconducting train

بنيت فكرة تصميم هذه القطارات علي ظاهرة الطرد المغناطيسي بحيث تطفو أو تعوم عجلات القطارات المصنوعة من المواد فائقة التوصيل علي مغناطيس فائق شديد . وبالتالي ينعدم الاحتكاك بين عجلات القطارات والقضبان مما يساعد في زيادة سرعة القطارات ولذا سميت بالقطارات العائمة أو الفائقة . وقد كان الاختبار الحقيقي عام 1986 حيث تم اختبار قطار فائق مكون من ثلاث عربات حيث وصلت سرعته إلي (Km/h) 352.4 . ولقد تم البدء في تنفيذ ذلك تجاريا عام 1990 في مشروع قومي مدعم في اليابان أطلقوا علية Maglev . ولقد تمكنت وزارة النقل من تبني الفكرة وتم افتتاح أول خط سكة حديد من المواد الفائقة واختبارها في إبريل 1997 . في نفس العام ديسمبر 1997 تم تنفيذ عجلات قطار من المغناطيس الفائق أطلقوا عليها MLX01 حيث يتكون القطار من ثلاث عربات سجلت سرعة قدرها (Km/h) 531 . وفي شهر مارس من عام 1999 تم تصنيع قطار فائق مكون من خمس عربات حيث وصلت سرعته (Km/h) 548 وفي ديسمبر 2003 وصلت سرعة القطار الفائق إلي (Km/h) 581 . في سول بكوريا الجنوبية هناك قطار فائق سرعته (Km/h) 300 وسوف تصل سرعته في 2008 إلي (Km/h) 412 . هذا القطار طوله 388 m ووزنه 771 طن ويحتوي علي 18 عربة ويسع 935 راكب.

٢-٣ الاستنتاجات :

بالرغم من هذا النجاح الباهر في مجال الموصلية الفائقة إلاّ أنه ما زالت هناك مشكلات عديدة تتعلق بالمواد الفائقة مثل صعوبة تشكيل هذه المواد في صورة أسلاك أو دوائر كهربية بحيث يمكنها حمل تيارات كهربية عالية غير مسموح بها في الموصلات العادية . ولذا فإن البحث جاري على قدم وساق للحصول علي مواد فائقة عند درجة حرارة الغرفة وفي الوقت ذاته تكون قابلة للتشكل بحيث يمكن بناء أجهزة تدخل في تصميمها دوائر كهربية من المواد الفائقة دون خشية الآثار السلبية المترتبة عن ارتفاع درجة الحرارة أو غير ذلك من آثار تزول بفعل استخدام هذه المواد . إضافة إلي ذلك فإنها سوف تساهم في توليد مجالات مغناطيسية قوية جدا تكون قادرة علي احتواء بلازما الاندماج النووي ذو الحرارة العالية والتي من الصعب حتى الآن إيجاد مواد تتحمل هذه الحرارة العالية . علي الجانب الأخر

فإنه يمكن توظيف هذه المجالات المغناطيسية في تطوير أجهزة التشخيص الطبي بالرنين النووي المغناطيسي والتي تمكننا من الحصول علي صور تشريحية مفصلة ودقيقة لأي عضو من أعضاء جسم الإنسان . علاوة علي ذلك فإنه يمكن استخدامها في تطوير وسائل النقل مثل بناء القطارات العائمة بدون تكاليف باهظة مثلما يحدث الآن . بالفعل سوف يكون حدث علمي غير مسبوق ويفوق الوصف والخيال .

إن التقدم يجري ببطء ولكن تتحقق نسبة من النجاح كل فترة إلاَّ أن غاية الطموح المتمثلة في الحصول علي تركيبية تتحقق فيها الموصلية الفائقة عند درجة حرارة الغرفة لم تتحقق بعد . لكن عندما يتحقق هذا الهدف سوف تدخل الصناعة المعاصرة ثورة تكنولوجية جديدة لم يشهدها التاريخ من قبل وتكون الموصلية الفائقة يوم ذاك هي العمود الفقري للتكنولوجيا الجديدة في جميع المجالات . ولكن المطلوب الآن هو توفير الوسائل الضرورية التي تمكن الباحثين من تصنيع هذه المواد وتشكيلها بالكيفية المطلوبة فقد تكون تلك المواد في صورة أسلاك أو كابلات وقد تدخل في تركيب الشرائح الإلكترونية وقد تكون جزءاً رئيسياً من أجزاء محرك الطائرة وغير ذلك .

المصادر

1- A.Bourdillon and N.X. Tan Bourdillon, High Temperature Superconductors, New York (1994).

2- Charles Kittel, Introduction to Solid state Physics, Jokn Wiley & Sons, Inc. (1986).

3- M.F. Crommie, L.C. Bourne, A.Zetti and A.Stacy, Phys. Rev. B 35, 1987.

4- J. Bardeen, L.N. Cooper and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. 106, 162 (1957); 108,1175 (1957).

5- J.G. Bendnortz and K.A. Muller, Z.Phys. B 64, 189 (1987).

6- J.M. Tarascon, L.H. Greene, W.R. Mckinnon, G.W. Hull and T.H. Geballe, Science 235, 1373 (1987).

7- M.K. Wu, J.R. Ashburn, C.J. Torny, F.H. Hor, R.L. Meng, L. Gao,Z. J. Huang, Y.Q. Wang and C.W. Chu, Phys.Rev. Lett. 58, 908 (1987).

8- H.Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano, JPN.J. Appl. Phys. 27, L209 (1988).

9- Z.Z. Sheng and A.M. Hermann, Nature 332, 138 (1988).

10- A.Shilling, M.Cantoni, J.D. Guo and H.R. Ott, Nature 363, 56 (1993); S.N. Putiling , E.V. Antipov, Chmaissen and M. Marezio, Nature 362, 226 (1993).

11- B.A. Hunter, J.D. Jorgensen, J.L. Wanger, R.L. Hitterman and R.B. Von Dreele, Physica C 221, 1 (1994).

12- http://repository.uobabylon.edu.iq/papers/publication.aspx?pubid=587

١٣- http://www.uae7.com/vb/t10676.html