



جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة القادسية - كلية التربية - قسم الفيزياء

**دراسة لتأثير زمن التبيد في درجة الحرارة**  
**الحرارة لمركب  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  (BSCCO)**  
**لفاق التوصيل**

بحث مقدم الى مجلس كلية التربية / قسم الفيزياء كأحد متطلبات نيل شهادة

البكالوريوس في علوم الفيزياء

مقدم من قبل

**هبة قاسم**

**حسن كامل تايه**

**ايمان رياض**

باشرافه السيد

**م. حيدر جواد مكطوف**

٢٠١٨م

١٤٣٩هـ

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

﴿وَقُلْ رَبِّ اَدْخِلْنِيْ مَدْخَلَ صِدْقٍ وَّاَخْرِجْنِيْ مَخْرَجَ صِدْقٍ﴾

وَاَجْعَلْ لِّيْ مِنْ لَّدُنْكَ سُلْطٰنًا نَّصِيْرًا﴾

صَدَقَ اللّٰهُ الْعَلِيَّ الْعَظِيْمَ

سورة الاسراء الآية (٨٠)

## الاهداء

الى الينبوع الذي لا يمل العطاء الى من حاك سعادتي بخيوط منسوجة من قلبه

والدي العزيز

الى القلب الناصح بالبياض مرمر الحب وبلسم الشفاء الى من ارضعتني الحب والحنان

والدتي العزيزة والمحبية

الى من هم ملاذي اذا جار الزمن

اخواني واخواتي

الى من هم عوني في وقت الضيق ومن اعطاني النصيح السديد

اصدقائي واحبابي

واهدى ثمرة جهدي الى من بعثوا في العلم والمعرفة

اساتذتي

## شكر وتقدير

تقدم بـجـاـلـص شـكـرنا واعتراننا الى جميع اساتذتنا لما بذلوه من جهد صادق طوال سنين دراستنا ونخص بالذكر رئيس قسم الفيزياء المتمثل (أ.م. د.سليم عنارة حسين) والمشرف (م. السيد حيدر جواد مكطوف) لجهوده القيمة في اعداد البحث بالشكل الامثل وفقه الله لكل خير

## خلاصة البحث

دراسة لتأثير زمن التلييد في درجة الحرارة الحرجة في المركب (BSCCO)  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$  لفائق التوصيل المقدم الى مجلس كلية التربية / قسم الفيزياء كأحد متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في تربية الفيزياء المقدم من قبل كل من الطلاب

١. حسن كامل تايه البديري

٢. ايمان رياض كاظم مدلول

٣. هبة قاسم حسين

باشراف الاستاذ م. حيدر جواد مكطوف

في هذا البحث جرت دراسة خصائص للتوصيل الفائق والخصائص التركيبية لمركب البزموت غير المشاب  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_y$  تمثلت خصائص التوصيل الفائق المعتمدة في الدراسة بالتأثيرية المغناطيسية والمقاومية الكهربائية وكثافة التيار الحرج وخصائص تيار-فرق جهد. واعتمدت مجموعة متغيرات حرجة مثل زمن التلييد وقيمة الاشابة التي تراوحت بين  $X=0.00$  و  $X=0.25$  وبواقع زيادة  $0.05$ . علاوة على دراسة امكانية ترصيف الحبيبات لاعتماد تقنية مبتكرة وكفوءة.

كرست جهود البحث لايجاد علاقة بين خصائص التوصيل الفائق وسلوكية البنية الدقيقة لمركب البزموت ، وتمت دراسة سلوكية البنية الدقيقة باعتماد أثر مجموعة متغيرات حرجة في آلية التلييد ونمو الحبيبات.

اجمعت خصائص التوصيل الفائق على إن قيمة الاشابة  $X=0.1$  تقسم مخططات الاشابة-خصائص إلى منطقتين هما منطقة تحت الاشابة و منطقة فوق الاشابة، وتم تأويل ذلك استنادا إلى نسبة زيادة اونقصان كثافة الحاملات من جهة واثر الاشابة في ثوابت الشبيكة البلورية من جهة اخرى. قيست ثوابت الشبيكة للمركب من تحليلات حيود الأشعة السينية بالاستعانة بطرائق التحليل العددي.

أظهرت نتائج تحليلات البنية الدقيقة بالتوافق مع تحليلات البنية الطورية إن البنية الطورية لمركب البزموت تمتاز بتعقيد شديد وتعددية طورية عالية. كما انها تبدي سلوكية تلييد فريدة، إذ يؤدي زمن التلييد إلى حصول تخشين للحبيبات و عدم حصول عملية تصلب، وقد أعزي ذلك إلى إن آلية التلييد المتوقعة هي عملية التبخير-التكثيف، بينت قياسات كثافة التيار الخرج ومقاومة انسياب الفيض المغناطيسي إن كثافات التيار العالية لا يمكن الحصول عليها الا باعتماد تقنيات تشكيل معقدة.

## الفهرست

رقم الصفحة	الموضوع	ت
1	الفصل الاول مواد فائقة التوصيل	
2	مقدمة عامة عن مواد فائقة التوصيل	
4	تاريخ الموصلات الفائقة	
9	اهمية خاصية الموصلات الفائقة	
10	ظواهر مواد فائقة التوصيل	
17	خصائص التوصيل الفائق	
١٨	الفصل الثاني الجانب النظري	
١٩	مقدمة	
٢٧	الخواص المغناطيسية للموصلات فائقة الكثافة	
٣٣	البنية البلورية للسيراميك	
٣٦	البنية الدقيقة للسيراميك	
٣٧	عناصر البنية الدقيقة	
٣٨	تحولات البنية الدقيقة	
٤٠	تلييد المواد السيراميكية	
٤٣	اليات ومراحل التلييد	
٤٨	الفصل الثالث الجزء العملي	
٤٨	تهيئة واعداد العينات	
٥١	عمليات ترصيف الحبيبات	
٥٢	قياسات التوصيل الفائق	

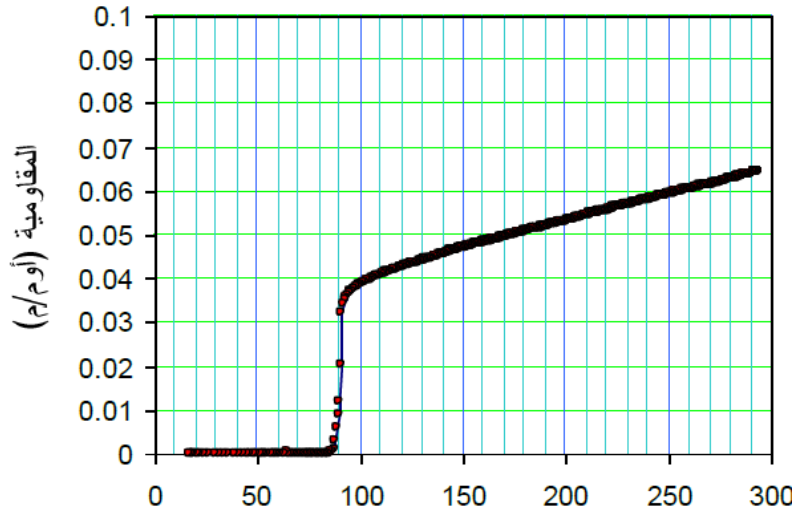
٥٣	قياسات المقاومة الكهربائية
٥٥	قياسات التأثيرات المغناطيسية
٥٦	تعيين درجة حرارة التعادل الحرج
٥٧	مقاومة انسياب الفيض
٥٩	القياسات التركيبية
٦٢	مقدمة
٦٢	قياسات التوصيل الفائق
٦٤	القياسات التركيبية
٦٥	المقاومة الكهربائية
٦٨	البنية الطورية
٧٠	الفصل الخامس
٧٠	الاستنتاجات والتوصيات
٧٢_٨٢	المصادر

## الفصل الاول

### ( مواد فائقة التوصيل وتطبيقاتها )

#### مقدمة عامة:

إن ظاهرة التوصيلية الفائقة مثيرة من جميع جوانبها سواء ما يتعلق بدراستها أو ما يتعلق بتطبيقاتها. فسلوكها الكهربائي (عدم المقاومة للتيار) وسلوكها المغناطيسي (رفض المجال المغناطيسي) وهما السمات البارزتان لها؛ جعلتا منها مواد ذات تطبيقات غير محصورة. فمن المعلوم أن مقاومة التيار الكهربائي 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 شكل 1. 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 مما سوف نتطرق إليه في حينه.



الشكل (1-1) درجة الحرارة - كالفين



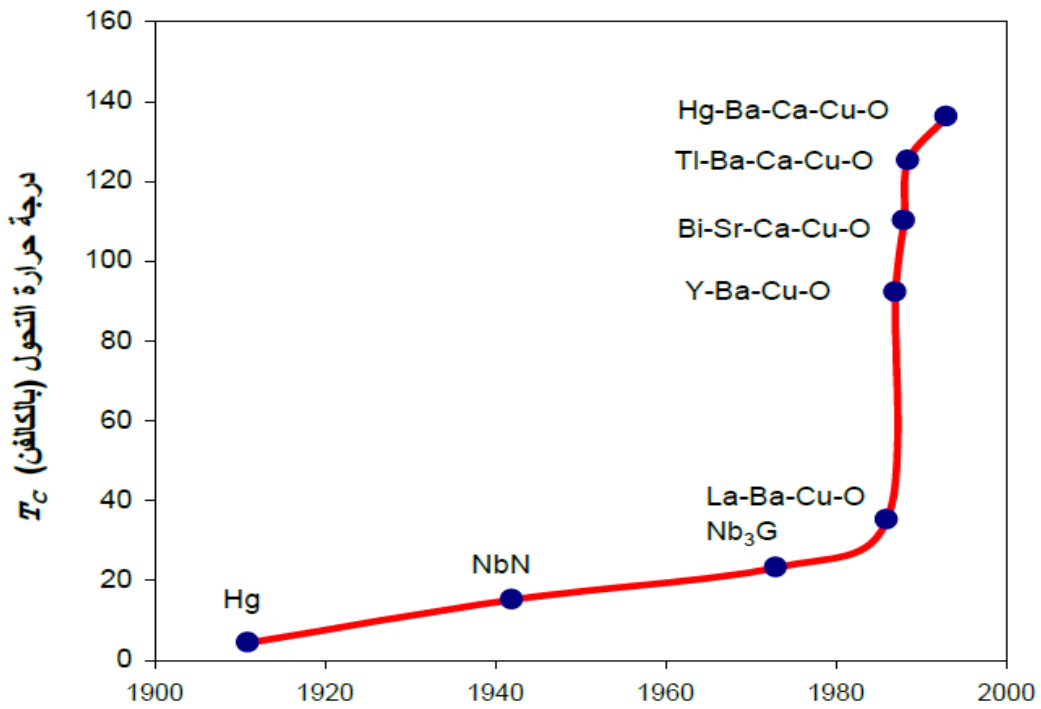
## تاريخ الموصلات الفائقة:

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 مقاومة بعض العناصر، لاحظ انعدام المقاومة لمادة الزئبق النقي عندما تقترب درجة حرارته من الصفر المطلق (A). 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 Nb<sub>3</sub>Ge.

وحصلت بعد ذلك قفزة متميزة في سجل المواد فائقة التوصيل عندما قام كل من جورج بندورز وكارل ميولار (J. George Bednorz and Kark Alex Muller) في عام 1986 بنشر 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 (B) 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 (C) والذي سرعان ما صار أساساً لعدة مركبات تلتها على الفور عندما التقت عدد ضخم من الباحثين وعلى طول العالم وعرضه إلى دراسة ذلك الجيل الجديد من المركبات يحدهم أمل كبير بالحصول على مركبات تتحول عند حرارة

وبعد سنة تقريباً تم اكتشاف مركب Bi-Sr-Ca-Cu-O ذي درجة التحول البالغة 110 درجات

كالفن (D) وبعده بقليل اكتشف مركب الثاليوم  $Tl-Ba-Ca-Cu-O$  والذي يفقد مقاومته الكهربائية نهائياً عند ١٢٥ كالفن (E) 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  $Hg-Ba-Ca-Cu-O$  والذي يتحول عند ١٣٥ درجة كالفن (F) ولم تتم أية إضافة تذكر حتى يومنا هذا. وقد 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 أنظر شكل ٢.



الشكل (2-1) تاريخ الاستكشاف

وباكتشاف المركبات التي تفوق حرارتها ٧٧ درجة كالفن وهي درجة غليان النيتروجين؛ دخلنا عصرًا جديدًا من الموصلات وهو ما اصطلح على تسميته بالموصلات فائقة التوصيل عالية الحرارة High Temperature Superconductors واختصاراً بـ HTS في حين حملت الفئات السابقة لذلك التاريخ اسم: الموصلات فائقة التوصيل التقليدية Low Temperature Superconductors واختصاراً 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!

### أهمية خاصة للموصلات الفائقة عالية الحرارة:

- أنها سهلة التحضير ويستطيع جميع المهتمين بالحصول عليها ببسر.
- أنها رخيصة الثمن حيث أن أكبر مكوناتها هو النحاس والباريوم والكالسيوم وهي رخيصة ومتوفرة
- أنها تتحول فوق درجة غليان النيتروجين وهو رخيص الثمن ومتوفر في كل مكان وسهل النقل والحمل ويبقى لفترات طويلة مقارنة بسلفه الهليوم المسال.
- أن الفرق بين درجات تحولها ودرجة الوسيط المبرد (النيتروجين) كبير (في حالة مركبات الزئبق تفوق الخمسين درجة) مما يجعلها أكثر استقراراً حيث أن ذلك الاستقرار يزيد بتزايد الفرق بين درجة حرارة العمل ودرجة حرارة التحول. • أنه يسهل تشكيلها بأشكال مختلفة مثل الرقائق والأفلام أو المواد المكسدة وكذا وحيدة التبلور.

### بعض تطبيقات المواد فائقة التوصيل:

#### •المواصلات: وفي القطارات على وجه الخصوص:

هل تستطيع تصور قطار يطير في الهواء كما تفعل الطائرة ويسير بسرعة كسرعتها؟ نعم إنه القطار الطافي. إن من شأن 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 التناثر مع المغناطيسات نفسها في دفع القطار وتسبيره بسرعات تزيد على 500 كم في الساعة.

#### •عجلات الطاقة:

عندما يدور قرص ضخ الكتلّة حول محوره فإنه يقال إن لديه طاقة حركية. ولديه الاستعداد للتخلي عن تلك الطاقة لصالح شئ آخر متى ما لزم الأمر. لقد تمت الاستفادة من هذه الفكرة في تخزين كمية كبيرة من الطاقة في عجلات ضخمة الكتلّة تدور بسرعات عالية جداً وتحفظ في داخل كبسولات خاصة، استفيد منها ولوقت طويل في تحريك القطارات خاصة. غير أن المشكلة التي كانت تقابل دائماً هي أن الاحتكاك الداخلي يستمر في استنزاف الطاقة الحركية مع مرور الزمن. غير أن الاستفادة من ظاهرة الطفو المغناطيسي يجوز أن تمكننا من صنع عجلات دوارة في جو خال من الاحتكاك تماماً مما يجعلها تحتفظ بطاقتها إلى الأبد. وهكذا جميع الحركات والآلات يمكن أن تستفيد من الظاهرة في أن تكون لا احتكاكية مما يقلل الحاجة إلى كثير من الصيانة والأعطال ويجعل عمرها يتضاعف إلى عدة مرات.

### •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. وحتى تتصور المشكلة راقب ما يحصل لجهاز التلفاز عندما يتم تشغيل جهاز كهربائي يعتمد على التيار المتردد، إن الصورة سوف تصاب بالتشوش والسبب هو المجالات المغناطيسية المجاورة والتي أفسدت الجو على حركة الإلكترونات المهبطية التي هي المسؤولة عن الصورة. وهذا هو ما يحصل مع الرادار بالضبط غير أن الأخير أكثر حساسية بشكل كبير. 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. 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 الكشف غير الضار (R) (Non Destructive Testing NT) وللكشف 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 متكاملًا يمكن أن يحل محل الأجهزة المستخدمة حالياً ويفوقها من حيث الدقة. وقد تم بالفعل استخدام الكاشف عندما وضعت مجموعة كبيرة منها بشكل نصف كروي تغلف رأس المريض. وصل عددها السكويدات في المجموعة الواحدة إلى ٦٤ في بعض التجارب.

### تطبيقات أخرى:

عدد آخر من التطبيقات لم نتعرض له مثل الاستفادة من قدرات كواشف السكويد في الدراسات الجيولوجية والدراسات المتعلقة بالنفط والكشف عنه، وكذلك في دراسات تتعلق بقياس مغناطيسية المواد (القابلية المغناطيسية) (S) وأما تطبيقات وصلات جوزيف صن في الإلكترونيات فلو لم يكن منها إلا التغلب على التشتت والفقد التي تشكو منها تلك الأجهزة عندما يتم تصغيرها بشدة لكفاها. إن من شأن تلك المشكلة في الموصلات وأشباه الموصلات العادية أن تحد في نهاية المطاف من التردد الأعلى المسموح به في شرائح الحاسبات الآلية على سبيل المثال. ونحن نسمع كل يوم عن زيادة هائلة في سرعات تلك الحاسبات التي يتوقع لها أن تقف في يوم من الأيام بسبب المشاكل التي أشرنا إليها. إن استخدام وصلات جوزيف صن من شأنه أن يوفر سرعات مضاعفة دون التورط في مشاكل كتلك وبالتالي فمن الممكن أن تطلق للإنسان الحرية من جديد لكي ينطلق في تطوير أجهزته لتحقيق مزيداً من السرعات. على سبيل المثال فقد نجحت شركة فوجستو اليابانية في عام ١٩٩٠ في تصنيع شريحة تحتوي على ٢٠،٠٠٠ وصلة جوزيف صن وكانت سرعتها ١ جيجاهيرتز ١ GHz وهي تفوق السرعات العادية المتوفرة آنذاك بعشرات المرات ولا تستهلك إلا ١٢ ملي واط! أي أقل استهلاكاً للكهرباء من شرائح السليكون المشابهة بأكثر من سبعة آلاف مرة! وقد تم حديثاً (G) الحصول على شرائح تعتمد على تقنية التكميم الفردي السريع للمجال المغناطيسي (RSFQ) Rapid Single Flux Quantum للحصول على سرعات وصلت إلى ١٠٠ جيجاهيرتز ١٠٠ GHz وهي سرعات يستحيل نظرياً الحصول

عليها باستخدام التقنية القديمة، تقنية شرائح السيليكون أو الجرمانيوم. أيضاً تستخدم المواد فائقة التوصيل كمغناطيسات قوية جداً. والسبب في ذلك أن النوع الثاني منها Type II له قابلية على الاحتفاظ بكمية كبيرة من المجالات المغناطيسية حيث يشكل ما يشبه المصيدة عندما تمر من خلاله ثم تبريده بعد ذلك. وهي فكرة على بساطتها يمكن استخدامها للاحتفاظ بسجلات إلكترونية لشدات المجال المغناطيسي الأرضي في أماكن متعددة. حيث تؤخذ الموصلات إلى المكان المعين وعندما تتعرض للمجال يتم تبريدها بعد ذلك وتحتفظ بالمجال المسجل أثناء عملية التبريد إلى الأبد. كذلك يمكن استخدام الموصلات لصنع ملفات ذات تيار عال جداً مما يوفر مجالات مغناطيسية كبيرة (ربما عشرات التسلا) بسبب شدة التيار الهائل الذي يمر دون مقاومة والذي قد يزيد على ثلاثة آلاف أمبير للمليمتر المربع  $3000 \text{ A/mm}^2$  في المواد الجيدة. (G)

## ظواهر مواد فائقة التوصيل :

### ١- 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 شكل ٦. وأما في ظاهرة التعليق فيختلف الأمر في المبدأ الذي يعتمد عليه وهو أصعب كثيراً في شرح فكرته من مسألة الطفو. في هذه الحال يتم 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) فتصبح إيجابية (شمالية) فتتجذب لقطب المغناطيس الجنوبي. إنها قصة حب لم تكتمل! لقد أوقع المغناطيس الموصل في حباله أولاً ثم انسحب فلقق 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 ولصوقهما أخيراً. أما في حالة الموصل والمغناطيس؛ فنقل 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.

خاصيتان مميزتان للموصلات الفائقة لا يشاركونها فيهما أي مادة أخرى عرفها الإنسان. وسوف نتحدث عن فوائد هاتين الخاصيتين عند الحديث عن التطبيقات بعد قليل.

## ٢- ظاهرة (أو وصلات) جوزيف صن: Josephson Junctions

جوزيف صن أحد التلاميذ الإنجليز النابهين وكان طالباً في مرحلة الدراسات العليا عندما طلب الأستاذ من الطلاب القيام بمشاريع بحثية صغيرة. فخرج علينا هذا الطالب الذي صار بعد ذلك من أشهر العلماء وفاز بالمشاركة في جائزة نوبل في الفيزياء لعام ١٩٧٣، طلع علينا بظاهرة صارت تعرف باسمه. لقد تنبأ هذا العالم أنه عندما يتم وضع موصلين فائقين بجانب بعضهما بحيث لا يفصل بينهما إلا شريحة رقيقة جداً من مادة عازلة؛ فإن بعض الأزواج الإلكترونية تستطيع التملص Tunneling من خلال تلك الشريحة غير الموصلة (N). وقد تم تأكيد تنبؤاته بعد فترة وجيزة من خلال التجربة.

وبالطبع فهذه الظاهرة الكمية يمكن الاستفادة منها في عمل كثير من الدوائر الإلكترونية السريعة جداً كما في الحاسبات الآلية (P) وكذلك في صنع كواشف للمجالات المغناطيسية المتناهية في الصغر كما سوف نرى.

## ٣- ظاهرة التكميم المغناطيسي:

كما سبق فإن المواد الفائقة 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) فإن مقدار المجال المغناطيسي الذي يمر من خلال تلك الحلقة يجب أن يكون مساوياً تماماً لعدد صحيح من الكمات  $\phi$  المغناطيسية يطلق على كل منها الرمز  $\phi_0$  ويبلغ مقدار الكمة الواحدة وتسمى أيضاً بالفلاكسويد (G) ومعنى التكميم أنه لو تعرض الموصل 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 تعرض لمجال يقل قليلاً عن عدد صحيح من الكمات بمقدار ضئيل (أقل من نصف كمة) فإنه يتكيف بحيث يكمل النقص من تلقاء نفسه! من أجل أن يحافظ 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 الظاهرة ذات أهمية بالغة جداً. فهي مبدأ ما صار يعرف بمجس السكويد Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) إن السكويد



(بسكون السين) عبارة عن جهاز حساس جداً للمجالات المغناطيسية وبإمكانه أن يميز التغير في

المجال المغناطيسي إذا زاد عن أي بحساسية تفوق ، بمعنى آخر يستطيع قياس مجال شدته تصل إلى 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 السكويد ينقسم إلى نوعين أساسيين حيث يعتمد الأول منهما على التيار المستمر-dc SQUID في حين يعتمد الآخر على التيار ذي التردد الراديوي . rf-SQUID وفي حين ينتشر استخدام الأول على نطاق واسع بصور أفلام رقيقة من المادة الفائقة يوضع بينها مواد عازلة من أجل توفير التملص الإلكتروني فإن النوع الثاني يعمل أيضاً من الأفلام الرقيقة أو بالاعتماد على فكرة عمل خرق أو أكثر في مادة موصلة فائقة تعمل على صورة قرص مثل حبة الأسبرين. وقد وجد أنه كلما زاد عدد الخروم زادت الحساسية تبعاً لذلك. ووجود خرم واحد يعني قياس المجال المغناطيسي مباشرة في حين أن وجود أكثر من خرم يعني قياس التغير (التدرج) في المجال المغناطيسي. والفكرة الأخيرة جعلت من المجس أهمية تطبيقية عالية، فهو لا يقيس المجال العام المتوافر، بل يقيس التغير مهما كان صغيراً. والأجهزة المعتمدة على مجس السكويد صارت متوفرة تجارياً وبأسعار منافسة ويقدمها عدد من الشركات العالمية.

#### ٤- نظرية الموصلات الفائقة:

في حين يصح القول بأن نظرية 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 ، أقول في حين يصح القول بأن تلك النظرية التي وضعت في عام ١٩٥٧ استطاعت أن تفسر معظم جوانب الموصلات الفائقة التقليدية (J)؛ فإنها بالتأكيد لم تستطع التغلب على الصعوبات التي واجهتها فيما يتعلق بالموصلات من الجيل الجديد، الموصلات الفائقة عالية الحرارة. لقد عجزت عن تفسير الظاهرة من أساسها، بل إنها كانت تتوقع استحالة الحصول على موصلات فائقة عند درجات عالية مثل ١٣٥ كالفن في حالة مركبات الزئبق. غير أن تلك الموصلات الجديدة حازت مزيداً من الاهتمام من جانب النظريين من العلماء دون التوصل إلى نظرية مرضية إلى يومنا هذا. ولذلك فإنها مازالت تحمل المزيد من التحدي العلمي و تعطي مثلاً للتخلف الشديد للنظرية عن التطبيق في هذا المجال. ففي حين نجحنا في جعل تلك الموصلات حقيقة قائمة؛ فإننا لم نستطع بعد فك طلاسمها. وكلما عكف

العلماء على وضع نموذج جديد؛ أصيبوا بضربة قوية من جانب التجريبيين الذين سرعان ما يعلنون عن مواد جديدة أو خواص جديدة.

في هذه المقدمة المختصرة؛ دعونا نلقي بعض الأضواء على نظرية BCS . 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 الشبكي 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 الشبكية والعيوب التي لا تخلو منها في العادة الموصلات العادية؟ والتي هي السبب وراء حصول المقاومة.

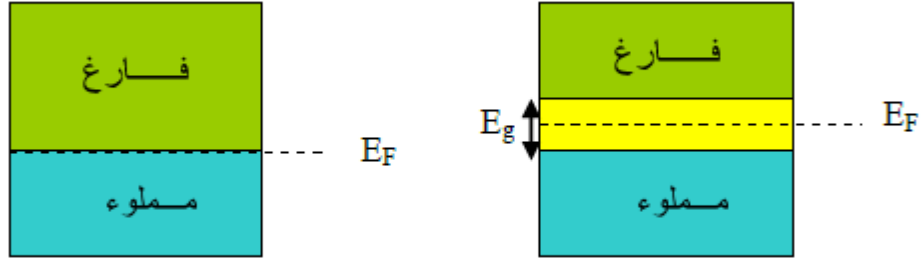
أهم أساس قامت عليه النظرية هو فكرة الأزواج الإلكترونية (Cooper Pairs) أو أزواج كوبر نسبة إلى العالم كوبر أحد المؤسسين. ومن المعلوم أن الإلكترونات تحمل ذات الشحنة وبالتالي فحسب قانون كولوم يفترض أن تتنافر عن بعضها قدر المستطاع. إلا أن الظروف المواتية تعكس نتيجة القانون بميكانيكية خاصة لوحظت بسبب اعتماد 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 لا بد وأنها تتفاعل بطريقة أو أخرى مع الشبكة 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 إلكترونات أخرى إليها. وبهذه الطريقة يظل الجو مهيناً للإلكترون 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  $2e$ —ولفياً مغزلياً مساوياً للصفير حيث أن أحد الزوجين لفة إلى أعلى (+ $2/1$ ) (والآخر لفة إلى أسفل (- $2/1$ )) 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 لفة 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 الصفير؛ 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 الشبكة لا تؤثر في حركتها على الإطلاق وبالتالي فهي تتحرك دون مقاومة. ومن العجيب أن تلك الشبكة 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  $E_g$  هي ميزة خاصة بالموصلات الفائقة لا يشار إليها فيها غيرها، أنظر الشكل ٣. حيث تتكون فجوة في الطاقة بين الحالات المملوءة تماماً بالإلكترونات وبين الحالات الفارغة تماماً قيمتها في حدود  $1 \text{ meV}$ . 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 الصفير المطلق:

$$E_g = 3.53kT_c$$

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 فعلياً أن نوفر موصلات بطاقات فجوة كبيرة. وقد اتفقت تلك المعادلة مع النتائج التجريبية للمواد الموصلة الفائقة التقليدية.



الشكل (3-1)

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

$$H_c(T) = H_c(0) \left[ 1 - a \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

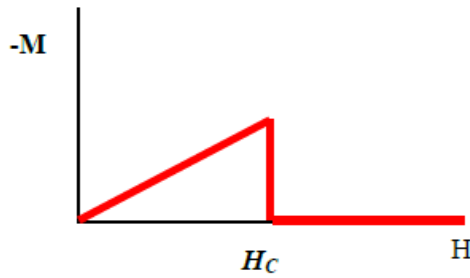
حيث تعبر  $T$  عن درجة الحرارة و  $H_c(0)$  عبارة عن المجال الحرج عند الصفر المطلق. وهي مفيدة في حساب المجال الحرج الجوهري غير المتعلق بالشوائب والأخلاط لأن من شأن تلك الأمور أن تؤثر ظاهرياً في قيمة المجال الحرج.

#### ٥- طرد المجال المغناطيسي من داخل الموصلات الفائقة:

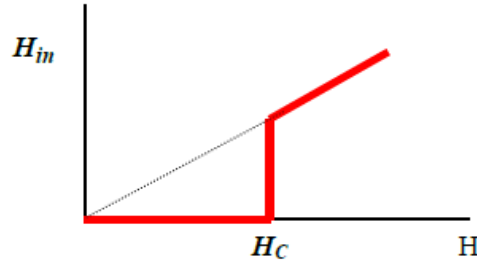
من أهم ميزات الموصلات الفائقة قدرتها على طرد المجالات المغناطيسية من داخلها أو من الوسط الذي تحتويه. والمسألة يمكن النظر إليها بالصورة التالية: عندما يتعرض موصل ما (من النوع الدينامغناطيسي) إلى مجال مغناطيسي خارجي فإن ذلك الموصل يحاول التخلص من المجال باستحداث تيارات كهربائية تُلّف حول سطحه تسمى بالتيارات السطحية. ومن المعلوم أن التيار الكهربائي 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 كهربائية وبالتالي فلديها القدرة على الاستجابة التامة لشدة التيار الخارجي؛ فتزيد زيادته وتقل بنقصانه بحيث توجد مجالات تتساوى معه بالضبط وتضاده في اتجاهها فيسلم جرم الموصل من المجال الخارجي حسب المعادلة التالية:

$$M = -H$$

حيث تمثل الـ  $M$  التـمغـنـط (المجال المغناطيسي المضاد) وتمثل  $H$  المجال الخارجي المطبق. و من إشارة السالب ندرك أن التـمغـنـط 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، أنظر شكل ٤ ، 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.

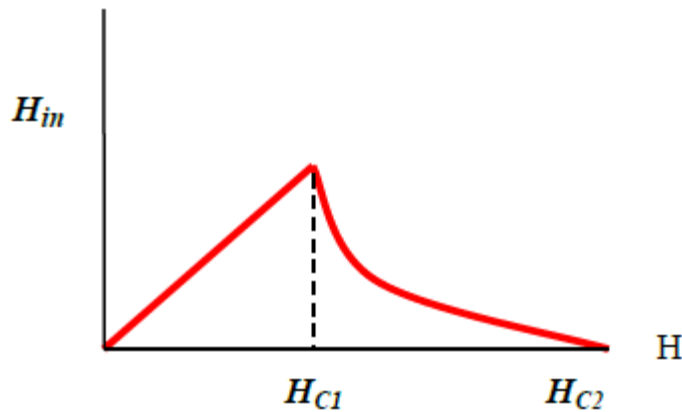


الشكل (4-1)

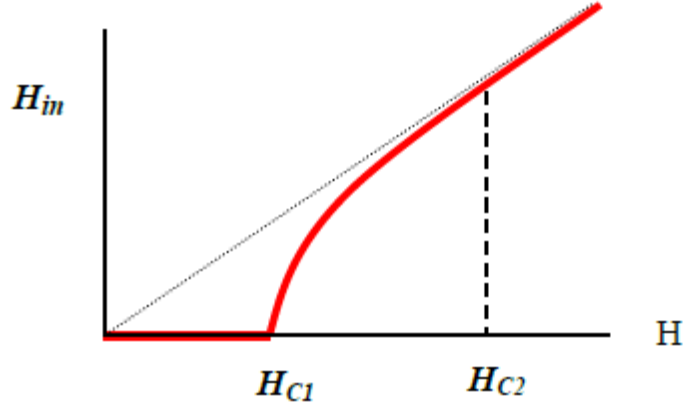


الشكل (5-1)

وأما الموصلات من النوع الثاني فهي مختلفة تماماً. إن لديها مجالان مغناطيسيان حرجان. فعند وصول المجال الخارجي إلى المجال الحرج الأول  $H_{C1}$ ، 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 .  $H_{C2}$  . 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. أنظر شكل ٥

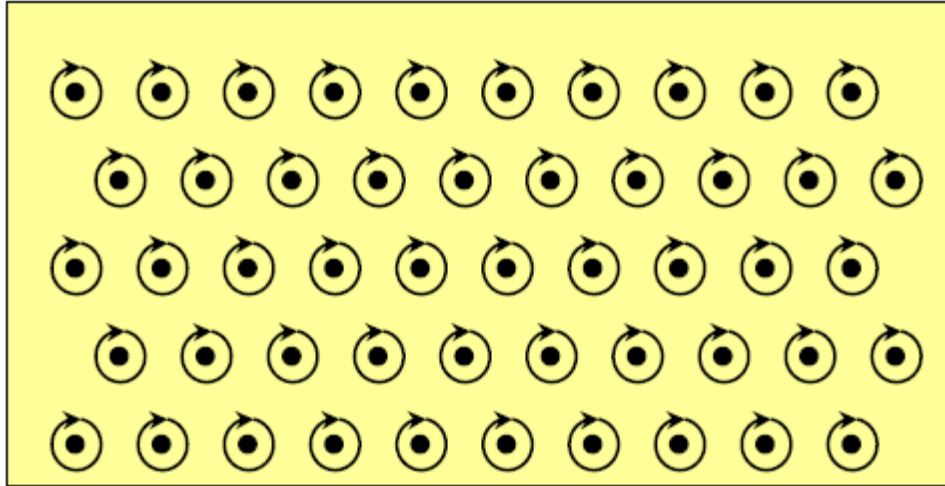


شكل (6-1)



شكل (7-1)

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 بوحدة. 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 .



الشكل (8-1)

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 180 dB.

خصائص التوصيل الفائق:

## ١- خواص الموصلات الكهربية الفائقة

### Superconductor Properties

#### ١-١ درجة الحرارة الحرجة ( $T_c$ ) Critical Temperature

عند انخفاض الدرجة الحرارية لبعض المواد فإنها تفقد مقاومتها للتيار الكهربائي وان تلك الحالة تدعى حالة التوصيل الكهربي الفائق، والدرجة الحرارية التي تتحول فيها المادة من الحالة الاعتيادية إلى حالة التوصيل الفائق، تدعى بالدرجة الحرارية الحرجة ويرمز لها ( $T_c$ ). وتختلف هذه الدرجة من مادة إلى أخرى [7,8].

#### ٢-١ المجال المغناطيسي الحرج ( $B_c$ ) Critical Magnetic Field

تتمثل الخاصية الأساسية الثانية للمادة فائقة التوصيل الكهربي بقدرة مقاومتها الكهربية على أن تعود مجدداً، وذلك عندما يسلط عليها مجال مغناطيسي ذا قيمة اكبر من القيمة الحرجة  $B_c$  (حتى وإن كان مقدار قيمة درجة الحرارة أقل من القيمة الحرجة  $T_c$  لها). ويعتمد مقدار المجال الحرج  $B_c$  على نوعية المادة ودرجة الحرارة الحرجة، حيث تتحول المادة من الحالة ذات التوصيل الفائق إلى الحالة الاعتيادية [3,9,10].



### ٣-١ التيار الحرج ( $I_c$ ) Critical Current

حاول اونيس أن يمرر تيارات كبيرة في الموصلات الفائقة حتى يحصل على مجالات مغناطيسية ضخمة، إلا انه أدرك بسرعة أن المجالات المغناطيسية الداخلية التي تنشئها هذه التيارات هي التي ستصبح معها الموصلية الفائقة مستحيلة [6]. إذ إن تحطيم ظاهرة التوصيل الكهربي الفائق بواسطة المجال المغناطيسي يحد من القيمة العظمى للتيار الذي يمكن إرساله خلال المادة، وهي في حالة التوصيل الكهربي الفائق. وبذلك فان انعدام خاصية التوصيل الكهربي الفائق لا يقتصر فقط على تسليط مجال مغناطيسي مناسب،

## الفصل الثاني

### الجانب النظري

#### ٢-١ مقدمة

ليس من ليسير بشئ عرض نظرية لم تكتمل ابعادها بعد. فاكتشاف المواد السيراميكية الفائقة التوصيل بخصائصها الفريدة اظهرت للاعيان مجموعة من التساؤلات والشكوك حول شرعية نظرية التوصيل الفائق الدقيقة BCS، هذه النظرية التي استطاعت لسنوات عديدة تفسير كل الظواهر المتعلقة بالمواد التقليدية فائقة التوصيل. لذا تزامن مع اكتشاف المواد السيراميكية ظهور اتجاهين لدراسة الية التوصيل فيها. الاول تناول دراسة مواطن الاخفاق في النظرية التقليدية في محاولة لتطويعها بما يلائم وسلوكيات المواد الجديدة. بينما التمس الاتجاه الثاني طريقا له نحو وضع نظريات اخرى حديثة تختلف بمفاهيمها واسسها عن النظرية السابقة. على اية حال فإن كلا الاتجاهين مازالا في طريقة لوضع اسس متينة تتوافق وخصائص المواد الجديدة.

يشتمل هذا الفصل على عرض موجز للمفاهيم الاساسية لنظرية BCS وانجازاتها المهمة مع عرض لبعض النظريات الحديثة المقترحة لتفسير الية التوصيل في المواد السيراميكية، كما يتضمن هذا الجزء من الفصل شرحا لموضوعي السلوك المغناطيسي وكثافة التيار الحرج لما لهما من ارتباط وثيق بمضامين البحث واتجاهاته.

البنية البلورية والبنية الدقيقة للسيراميك الفائق التوصيل ذاتا جانبا مهما من هذا الفصل كونهما مرتكز البحث ومحور اهتماماته، وقد اشتملنا على شرح تفصيلي للبنية البلورية لنظام Bi-Sr-Ca-Cu-O و اطواره المختلفة وشرح لمفاهيم البنية الدقيقة وعناصرها الرئيسية.

واخيرا يختتم الفصل بموضوع له اهمية قصوى في التحكم بعناصر البنية الدقيقة للمواد السيراميكية وهو موضوع التليبيد. إن فهم الية التليبيد بمراحلها المختلفة يعد خطوة اساسية باتجاه دراسة وتصميم البنى الدقيقة لهذه المواد والمصنعة بتفاعلات الحالة الصلبة، وبالتالي إمكانية السيطرة على خصائص النهائية لها.

## ٢-٢ نظرية التوصيل الفائق BCS

وضعت ما طببت التوصيل فائق من قبل Bardeen و Cooper و Schrieffer في عام ١٩٥٧ [٨٥]، وقتنا له قبولاً منقطع النظير كونها استطاعت تفسير مجمل الظواهر المتعلقة بالتوصيل الفائق بدا من انعدام المقاومة و تأثير مزمر وانتهاء بتأثير النظائر و امتصاص الموجه الكهرومغناطيسية [١].

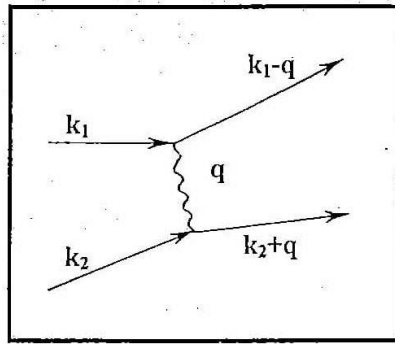
استناداً النظرية في تفسيرها ظاهره التوصيل الفائق الى الحصول تجاذب غير مباشر للالكترونات في الحالات القريبه لمستوى فيرمي ينشر التجاذب نتيجة التفاعلات الالكترونات مع الايونات من ما يسبب تشوه الشبيكه البلورية اي ان التجارب يتم من خلال تبادل الفوتونات. تعمل قوى التجاذب الناجمه عن الوسيط الفونوني على معاكسه التاشير التناسب الكولومي المباشر و تسبب صافي قوه التجاذب بين الالكترونات تؤدي هذه العملية الى حدوث عدم استقرار للتركيب الالكتروني في حاله الاعتيادية وبالتالي نشوء ميل للانتقال الى حاله التوصيل الفائق [٤].

عنده مرور الكتروني بجوار ايونات الشبيكه فانه يوتر في تلك الايونات بمجموعه من التجاذبات الكولومية التي تعطي كل ايون زخماً يسبب حركتها معا فتنشأ بذلك مناطق ذوات شحنه موجبه أعلى تنتشر هذه المناطق -بسبب الطبيعية المرنة للشبيكه- كموجة تحمل زخماً عبر الشبيكه البلورية و بمعنى اخر فان الالكترون يحث على ابعاث فونون و يحدث تبادل بالزخم بين الالكترون و الفونون الافتراضي virtual phonon بينما تمر هذه الموجه بالالكترون اخر فانه يخضع لتجاذب كولومي يمتص من خلاله كل زخم الموجه المتحركه. اي ان الالكترون ثاني سيمتص الفونون الافتراضي الناشئ من الالكترون الاول و اذا اشرنا الى متجه الموجه الابتدائي و النهائي للالكترون الاول ب  $k_1$  و  $k'_1$  و الالكترون الثاني  $K_2$  و  $k'_2$  فان عملية التبديل بالوسيط الفونوني و المبينه في الشكل (١, ٢) يمكن تشبيتها بالعلاقة [٣]:

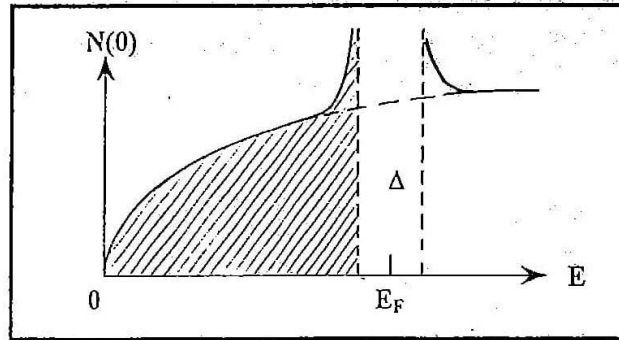
$$k_1 - k'_1 = (k'_2 - k_2) = q \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

حيث q: مثل متجه الموجه الفونون الافتراضي.

ان نتيجة هذا التفاعل هي الحصول نوع من الترابط الضعيف بين الكترينين ليكونان زوج مقيد bound pair و هو ما يعرف بزواج كوبر. تعمل ازواج كوبر على خفض طاقه الكلية للنظام و يمكن الحصول على اقل طاقه اذا امتلك الالكترينين المكونين لكل زوج زحما متساويا بالمقدار ومختلفا بالاتجاه. وبما ان الارتباط ضعيف لذا فإنه سنكسر باستمرار ويعاد تشكيله مرة اخرى من الالكترونات مختلفة. على اية حال اسال وجود الطاقه رابط بين الكترينين المكونين لزواج كوبر يؤدي الى ظهور فجوة الطاقه  $2\Delta$  في طيف الطاقه للالكترين. تقع فجوة الطاقه مباشرة عند مستوي فيرمي  $E_F$  كما موضح في الشكل (٢,٢) الذي يبين كثافته الحالة density of states الموصل الفائت عند درجه حراره الصفر المطلق  $N(0)$  [4].



الشكل (1-2) تبادل الفوتون الافتراضي بين الكترينين يشغلان الحالتين K1 و K2



الشكل (2-2) تكوين فجوة الطاقه عند سطح فيرسي في الموصل الفائت

تلاحظ من الشكل ايضا الحالات في المدى الطاقه  $(E_F - \Delta/2, E_F + \Delta/2)$  تكون ممنوعه forbidden تعطى فجوة الطاقه تتبعا لنظرية BCS بالعلاقة الآتية [1]:

$$\Delta = 2\hbar\omega_D e^{-1/N(0)v}$$

.....(2.2)

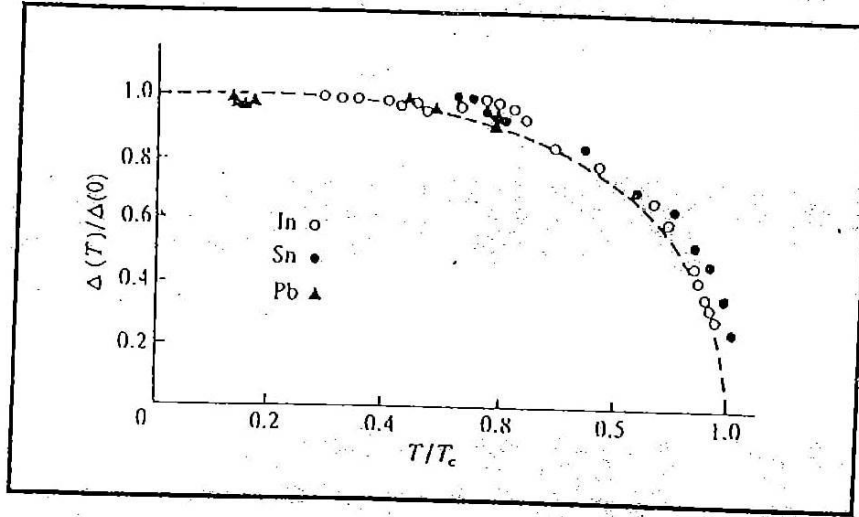
حيث  $\omega_D$ : تمثل تردد ديبياي Debye frequency و  $V$  تمثل قوة تفاعل الإلكترون مع الشبكة.

تشير العلاقة الى ان فجوة الطاقه تزداد مع زياده قوة التفاعل  $V$  اي ان حاله التوصيل الفائق تفضل وجود تفاعل شديد بين الالكترونات و ايونات الشبيكه و اذا علمنا ان  $V$  هي نفسها المسؤولة عن المقاومة في حاله الاعتيادية لذلك يمكن التوصل الى استنتاج بان الموصلات الاعتيادية الضعيفه يمكن ان تكون موصلات فائقه قوية و هذا يتوافق فعليا مع النتيجة التجريبية [٤].

نقل فجوة الطاقه حسب نظرية BCS مع زياده درجه الحرارة و تختفي تماما عندما تصل درجه الحرارة الى درجه الانتقال الحرجة  $T_c$  (شكل ٢,٣). و يعود سبب ذلك الى امتلاك الالكترونات المكونه للزوج كوبر طاقه كافية لكسر الازدواج مع زياده درجه الحرارة. كما تعطى فجوة الطاقه عند درجه حراره الصفر المطلق كداله الذي لدرجه الانتقال الحرجة بالعلاقة الآتية [٥]:

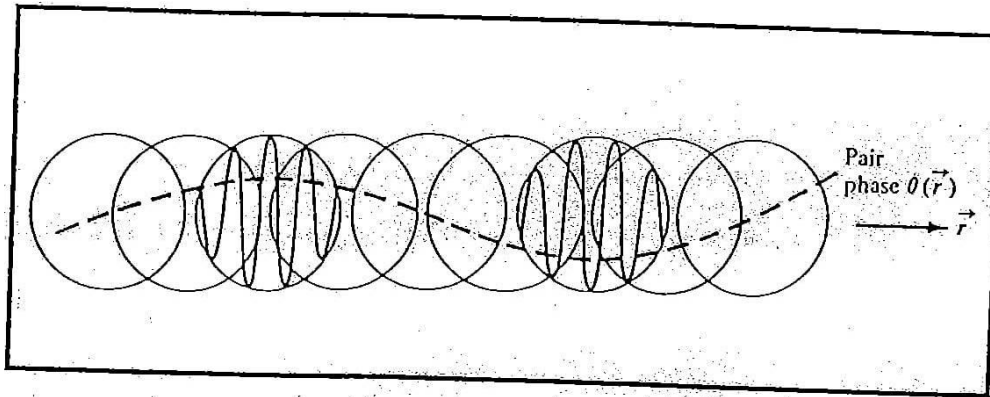
$$2\Delta(0) = 3.52k_B T_c \quad (2.3)$$

لقد وجدت من خلال تجارب الاختراق و الامتصاص الكهرومغناطيسي ان القيم الفعلية للثبات (٣,٥٢) في العلاقة السابقه يعتمد على نوع الماده و تتغير قيمته من تجربة الى اخرى لكنها تقع عموما بحدود  $\pm 30\%$  من الثابت المشار اليه [٧].



الشكل (4-2) تغير فجوة الطاقة كدالة لدرجة الحرارة  
بينما النقاط مأخوذة من تجارب الاختراق BCS الخط المتصل رسم اعتماداً على نظرية

تصل المسافة بين الكترينين المكونين لزوج كوبر الى حوالي  $1\mu m$  وضمن هذا المسار الكبيرة و التي تدعى بطول التشاكة  $\xi$  تقع احداثيات مركز الكتله لحوالي مليون زوج متفاعل. تميل هذه الازواج للتداخل فيما بينها بطريقه متشاكهه و بحيث ينتج طور مقفل  $locked\ phase$  كما موضح في الشكل (٢,٤) يصبح النظام الفائق التوصيل بهذه الحالة اشد ترابط واكثر استقرارية ويمكن عده على انه مائع مؤلف من عدد كبير من الازواج المتشاكهه [٧].



الشكل (5-2) تتالف الحالة الارضية للموصل الفائق من عدد كبير من ازواج كوبر متداخلة تكون الاطوار مغلقة معاً كي تقل الطاقة الكلية للنظام

تهتز موجه الزوج الواحد بتردد  $f = 2E_F/h$  وعنده غياب الزخم للصابي للازواج فانه الاطوار تقفل معا وتهتز بطريقه متناغمة [٧]. يمتد هذا الانتظام خلال الشبيكه و ينتشر الى مناطق التداخل المتاخمة. و عنده تسليط مجال كهربائي خارج بانه الازواج تنساق خلال الشبيكه

تحت تأثير المجال ولكن بطريقة تحافظ فيها على درجة الانتظام ثابتة. تتحرك الأزواج خلال الشبيكة و تكون حركة كل زوج مقفلة مع حركة الأزواج الأخرى و بذلك لا توجد فرصة لاحداها كيف تسهم في عملية الاستطارة العشوائية الناشئة عن عيوب الشبيكة و التي تسبب المقاومة الكهربائية عند درجة الحرارة المنخفضة. ان هذه العملية توضح لماذا يكون النظام فائق التوصيل.

### ٢-٣ آلية التوصيل الفائق للسيراميك

بسبب تفاعل الالكترين-الكترين وجود انواع اخرى عدا التوصيلية الفائقة من الانتظام في التراكيب الالكترونية. مثال ذلك، امواج كثافته الشحنة charge-density waves و امواج كثافته البرم

spin-density waves اول الفيرومغناطيسية العكسية antiferromagnetism. ولا تكمن الصعوبة في وضع نظرية او حتى وصنف القوة المؤثرة و العامله في مركب ما او صنف من المركبات حسب، بل في تحديد حالات الانتظام الممكنة لمتغيرات النظام الالكتروني (مثل الموقع الفضائي و الزخم و البرم) الناشئة عن التفاعل. وما نظرية BCS الشائعة الا حل تقريبي لحاله الانتظام في الموصلات الفائقة. ترتبط درجة الحرارة الحرجة  $T_c$  حسب نظرية BCS درجة حراره ديباي بالعلاقة التقريبية الآتية [٨٦]:

$$T_c \approx T_D \exp\left(-1/g\right) \dots\dots\dots(2.4)$$

و يكون المقدار الاسي في العلاقة صغير في حاله الارتباط النسبي الضعيف اي عندما تكون:

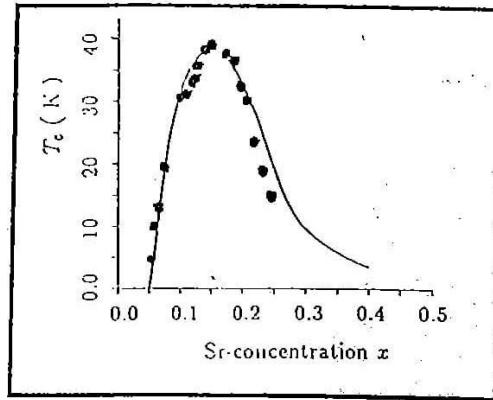
$$g = VN(E_F) \approx V/E_F \ll 1$$

ان اقصى درجة حراره حرجه يمكن الحصول عليها من العلاقة (٢,٤) هي بحدود 25k هذا اذا علمنا ان درجة حراره ديباي لا تزيد عن 300k للاغلب الفلزات ومركباتها [٨٦]. كما ان القيم المصححة لg بسبب تأثيرات التنافر الالكتروني تجعل التوافق بين العلاقة (٢,٤) والقيم الفعلية للمواد السيراميكية امرا مستبعدا ما لم يتم زياده قيمه g بشكل كبير او ان تتبع المواد

الجديده آليه توصيل مختلفه [٨٦]. ظهر الاخفاق الاخر في نظرية BCS بعد اجراء بعض التجارب العلمية حوله اعتمادية درجه الحرارة الحرجة  $T_c$  على كتله نظير الاوكسجين في المركب  $YBa_2Cu_3O_7$ ، و التي اظهرت اعتمادية قليله مقارنه مع ما هو متوقع من النظرية، الامر الذي زاد الشك في نفاء آليه الوسيط الفونوني [٨٧].

اقتراحت نماذج نظرية عديده لتفسير ظاهره التوصيل الفائق في المواد الجديده مثل انموذج الفونون- الكترون التقليدي، الاكسايون exciton وثنائي البولارون bipolaron والبولارون- برم والبرم [88-89].

يفترض نموذج الفونون- الكترون الانماط الاهتزازية لايونات الاوكسجين هي المسؤوله عن وجود ترابط قوي يؤدي الى ارتفاع قيم  $T_c$  للمركب  $[90]La_{2-x}Sr_xCuO_4$ . ان القيم المحسوبه لدرجه الحرارة الحرجة  $T_c$  تظهر توافق الجديده مع النتائج العلمية شكل (٢,٥) [٩١]. يهمل هذا الانموذج السلوك المغناطيسي في حاله الاعتيادية و يواجه صعوبه بتفسير خصائص الانتقال transport properties في حاله الاعتيادية.



SR كدالة لتركيز TC الشكل (2-6) درجة الانتقال اعتماداً على نموذج الوسيط الفونوني

توجد عده انواع من نماذج الاكسايون مثل نموذج little (٩٢) وانموذج Allender وجماعته (٩٣) وانموذج Varam وجماعته (٩٤) وانموذج Markiewicz (95). تختلف هذه النماذج في تفسيرها الانتقالات الالكترونية المسؤوله عن الاكسايون. يعتمد نموذج Little على ان الكترونات السلسله chain electrons في مركبات الايتريوم والانتوم تعمل كاكسايونات تعزز الحركه الالكترونية في المستويات Cu-O. لكن هذا المفهوم لا يستطيع تفسير التوصيلية الفائقه في المركبات السيراميكية الاخرى لخلوها من الترايب السلسلية.

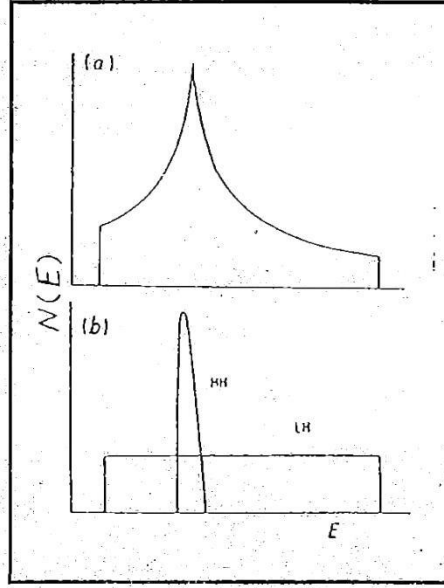


بينما يقترح Allender و جماعته ان الكترونات التوصيل تستطيع الاختراق نحوه الطبقات شبح الموصله وتثير اكسائونات يمكن لها ان تمتص مره ثانية من قبل الكترونيات اخرى. ان هذا الا نموذج يتطلب وجود توافق دقيق بين طاقه فيرمي في الطبقات الفلزية مع الطاقه الاثاره بالاكسائون في الطبقات شبه الموصله. انه هذا الشرط لا يحصل مع جميع حالات الإحلال العنصر الاثيروم في المركب  $(YBa_2Cu_3O_7)$  (٩٣).

يفترض Varma و جماعته الاكسائونات ترتبط بانتقالات الحزم الداخلية بين الحزم اللاتأصيرية non-bonding والتأصيرية العكسية anti bonding في مستويات Cu-O. ان هذه الانتقالات تفترض وجود حزم عريضة جدا وهذا لا يتوافق مع تركيب الحزم لاغلب المواد السيراميكية الفائقة التوصيل (٩٤).

اما Markiewicz يفترض اننا الحاملات في الطبقة  $CuO_2$  تنقسم الى مجموعتين: مناطق ذوات كثافه حالات عالية فوق حدود منطقه برلويين Brillouin zone و مناطق ذوات كثافه حالات منخفضه حوله باقي المنطقه شكل ٦,٢ تدعي هذه الحاملات الفجوات الثقيله و الفجوات الخفيفه heavy and light holes.

تتكاثر الفجوات الخفيفه الى الحاله فائقه التوصيل بينما تكون الثقيله مسؤوله عن احداث الازدواج. يفسر هذا الانموذج نتوء الطاقه و الذي يدعى بانفرادية فان هوك van Hove singularity الذي يظهر في مخطط كثافه الحالات للمركبات السيراميكية (٩٥).



B وفي A الشكل (7-2) كثافة الحالات لحزمة ثنائية البعد مع وجود انفرادية فان هوف في LH والفجوات الخفيفة HH تفصل تخطيطي لاسهام الفجوات الثقيلة

تعطى العلاقة بين فجوه الطاقه ودرجه حراره الانتقال الحرجة  $T_c$  حسب هذا الانموذج بالعلاقة الآتية:

$$2\Delta = 4.85k_B T_c \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

تتفق هذه العلاقة مع القياسات الخاصه المركبين  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  و  $YBa_2Cu_3O_7$  لكنها لا تتفق مع مركبات البزموت و الثوليوم.

يعد انموذج البولارون- برم احد اهم النماذج المقترحه المقترحات تفسير آلية التوصيل الفائق في المركبات السيراميكية الفائقة (٩١). يشير الانموذج الى ان خلق الفجوات في الحزمة Cu  $dz^2$  عن طريق الاشابه يجعل برم الفجوه في المدار  $dx^2-y^2$  الادنى يميل للاستقطاب باتجاه موازي لبرم فجوات الاشابه ويحدث نوع من التفاعل التبادلي exchange interaction القوى في مواقع النحاس التي تتواجد فيها فجوات الاشابه. وعند زياده التركيز الفجوات يخت في الانتظام البرمي ثلاثي البعد و يتحول الى برم اصرة تكافئ الرنينية

Resonance Valence Bond (RVB) [96-97]. و عندها تدمر حال جزئيا بسبب الاستقطاب البرمي. يتحدد قطر البولارون- برم الفرق بين كسب الطاقه الناتجه عن الاستقطاب البرمي وفقد الطاقه الناشئ عن حاله RVB. يتحرك البولارون- برم الصعوبه بسبب الاستقطاب

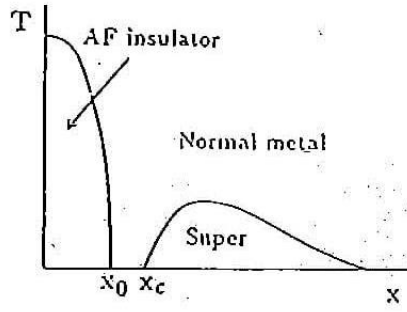
البرمي المحيط به ولكن عند خلق نفس العدد من أزواج البولارون- برم في شبكته فرعين sublattices مختلفتين فانها تصبح طائفه في البلوره نتيجته للتفاعل الانتقالي في الحزمه ان الانموذج الهاملتوني Hmailtonian المبسط و الذي يصف الآلية اعلاه يعطي بالعلاقة الآتية (٩١):

$$H = H_{tr} + H_{AF} + H_{intra} + H_U \dots\dots\dots(2.6)$$

و هو مؤلف من اربعة اجزاء في التفاعل الانتقالي لفجوات الاشابه  $H_{tr}$  التفاعل التبادلي الفائق superexchange بين برم لفجوات الحزمه  $Cu dx^2-y^2$ ، التبادل الذري الضمني intera-atomic

exchange بين برم فجوات الاشابه  $dz^2$  وفجوات الحزمه  $dx^2-y^2$  عنده نفس مواقع النحاس و اخيرا التفاعل التنافري بين البولارونات- برم وعند نفس مواقع النحاس ايضا

استطاع هذا الانموذج تفسير المخطط الطوري لنظام La-Sr-Cu-O (شكل ٧,٢)، فعند تراكيب اشابه منخفضه يحدث تفاعل الفيرومغناطيسية العكسية عبر برم  $Cu dx^2-y^2$  فينتج الطور العازل و عنده الا شابه الاعلى فان الفجوات تجهز الى المدارات  $O_{p\sigma}$  و يحدث تدمير جزء للتفاعل التبادلي الفائق و كنتيجة لذلك يختفي الانتظام المغناطيسي العكسي عنده  $X_0$  و بعدها يميل برم النحاس المجاور لمواقع الاوكسجين المشابه للفجوات ان يصبح متوازي و يظهر ما يسمى طور الزجاج- برم spin-glass. و عندما يصل تركيز Sr الى قيمه حرجه  $X_c$  تظهر التوصيلية الفائقه و تتغير الحاله الارضية لثمانيات السطوح  $Cu dz^2$  من حاله البرم المنخفض الى حاله البرم العالي وذلك من خلال نقل الفجوات من المدار الي المدار  $Cu dz^2$  حينها يصبح النظام فائق التوصيل اعتمادا على الآلية اعلاه. وهذا يتوافق مع النتائج التجريبية للنظام المعني(٩١).



LA-SR-CU-O شكل (8-2) المخطط الطوري لنظام

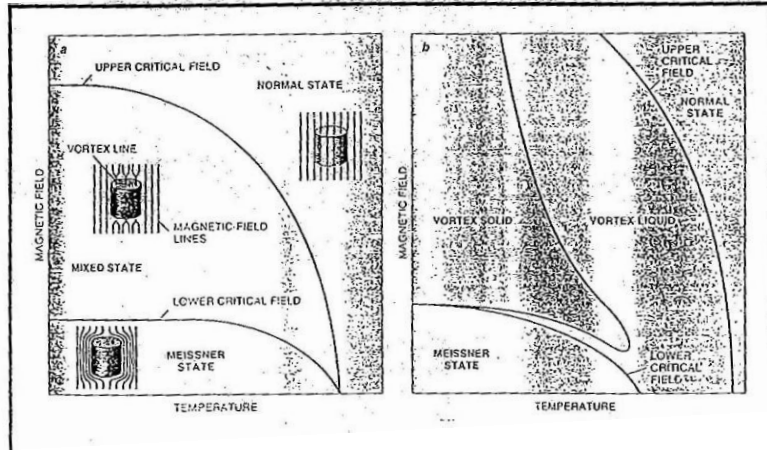
## ٤-٢ الخواص المغناطيسية للموصلات الفائقة

تعتمد الاستجابة المغناطيسية للموصلات الفائقة من النوع الثاني على شدة المجال المغناطيسي ودرجة الحرارة. يمكن توضيح هذا السلوك بالمخطط الطوري المغناطيسي magnetic phase diagram شكل (٨،٢) الذي يبين ان الموصل الفائق التقليدي يخضع له ثلاث حالات مغناطيسية مميزة الاولى تمثل حالة مزنر، أي أن الحالة التي تنبذ المادة فيها المجال المغناطيسي بالكامل. يعطى الحث المغناطيسي  $B$  في داخل المادة بالعلاقة (٦):

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + x)H \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

حيث  $H$ : تمثل شدة المجال المغناطيسي الخارجي،  $M$ : مغنطة الوسط،  $x$ : التأثيرية المغناطيسية.

في حاله مزنر ( $B=0$ ) تصبح المغنطة مساوية و معاكسه لشدة المجال المسلط وتكون التأثيرية المغناطيسية مساوية ل ( $x=-1$ ).



شكل (9-2) المخطط الطوري المغناطيسي  
 موصل فائق تقليدي من النوع الثاني A  
 موصل فائق سيراميكي B

اما الحالة الثانية في الشكل (2.8-a) فتحدث إذا ازدادت قيم المجال المسلط فوق قيمة المجال الحرج الأدنى  $H_{c1}$  وفيها ينفذ المجال المغناطيسي إلى داخل المادة على شكل مصفوفة من خطوط الفيض. ويعمل على زيادة الطاقة الحرة للمادة. وفي هذه الحالة يمكن حساب  $H_{c1}$  من العلاقة [١]:

$$H_{c1} = 4\pi\epsilon/\Phi_0 \dots\dots\dots(2.8)$$

حيث تشير  $\epsilon$  إلى الطاقة الحرة الإضافية لوحدة طول خط الفيض.

ان قيم الخط الواحد ثابتة، لذا فإن أي تغيير في المجال المسلط سيعمل على تغيير كثافة تلك الخطوط. تميل هذه الخطوط للوصول إلى أدنى مستوى للطاقة، وهي تؤدي ذلك من خلال تنظيم نفسه على شكل شبكة مثلثية [٩٩].

يعتمد تركيب خط الفيض على طول التشاكه  $\xi$  وعمق الإختراق  $\lambda_L$ . فكل خط يمتلك قلب صغير يعتمد قطره على طول التشاكه، وتكون المادة داخل القلب في الحالة الاعتيادية. بينما يولد التيار الفائق حول القلب (التيار الدوار هو السبب وراء تسمية القلب بالدوامة). يعمل التيار الفائق على توليد مجال مغناطيسي والمسافة التي يتواجد فيها المجال هي عمق الإختراق.

الحالة المغناطيسية الثالثة والأخيرة للموصل الفائق التقليدي تظهر إذا تجاوز المجال المساوي قيمة المجال الحرج الأعلى  $H_{c2}$ ، وفي هذه الحالة تدمر التوصيلية الفائقة بالكامل وتعود

المادة إلى الحالة الأعتيادية يحدث هذا التدمير بسبب زيادة قوة المجال المغناطيسي والذي يعمل بدون زيادة كثافة الدوامات وبالتالي اقترابها من بعضها البعض فتتداخل قلوب الدوامات وتصبح حينها المادة أعتيادية [٩٩].

تتصرف الدوامات بطريقة غير أعتيادية في المواد السيراميكية فائقة التوصيل، فهي لا تترتب على شكل شبكية مثلثة بل تنصهر إلى الحالة تشبه السائل (شكل ٢,٨-b) ان قيم طول التشاكة من جهة ودرجة حرارة الانتقال الكبيرة من جهة اخرى تعني ان المواد السيراميكية تعاني من تقلبات حرارية كبيرة. الدرجات الحرارية العالية تهتز الدوامات بشكل كافي لصهر الشبكية وتكوين سائل الدوامات vortex-liquid والذي يتواجد في هذه المواد عند درجات حرارة تمتد إلى مديات أوسع في حالة شبكية الدوامات [٩٨].

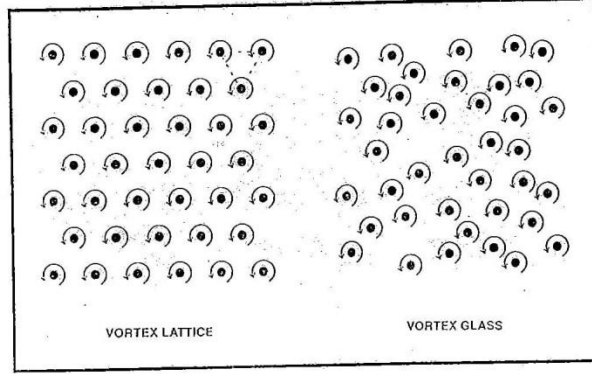
عند مرور تيار خلال العينة يضاف إلى التيار الدوار من جهة واحدة وي طرح من التيار الدوار على الجهة الأخرى وكنتيجة لذلك تنشأ قوة مؤثرة على خط الدوامة. تعمل هذه القوة المغنوسية Magnus force على تحريك الدوامة باتجاه عمودي على كل من خط الدوامة والتيار المار، وبالتالي تؤدي إلى تشتيت طاقة التيار، وتحديدًا يعمل التشتيت على أحداث فرق جهد وبالتالي مقاومة في المادة. تدعى المقاومة الناشئة عن هذه الظاهرة بمقاومية انسياب الفيض flux-flow resistivity ويمكن حسابها من العلاقة [١٠٠].

$$H_{c2} \frac{dE}{dJ} = \phi_0 B / \eta$$

حيث E:المجال الكهربائي الناتج عن حركة الفيض، J: كثافة التيار الكهربائي،  $\eta$ : معامل اللزوجة ويشير إلى الإعاقة لحركة الدوامات.

تتكون شبكية الدوامات في المواد النظيفة فقط (أي المواد الخالية من العيوب التركيبية والشوائب الكيميائية)، أما في المواد الغير نظيفة فتميل الدوامات للاستقرار في مواقع العيوب والتي تدعى بهذه الحالة بمواقع التثبيت Pinning sites. يعمل التثبيت على الأخلال بأنماط الشبكية للدوامات الصلبة شكل(٢,٩)، وبمعنى اخر فإن التثبيت يمنع المادة من التكثيف إلى دوامات صلبة مثالية عند المجالات المغناطيسية العالية. يدعى الطور الذي يتواجد في هذه الحالة بالزجاج الدوامي vortex glass، ويعد هذا التعبير مناسباً لأن مواقع الدوامات تكون غير منتظمة وبأنماط عشوائية مشابه لما يحدث لذرات الزجاج [١٠١].

يعمل التركيز العالي لعيوب التثبيت على تجميد السائل الدوامي تدريجياً إلى زجاج أما في حالة المادة النظيفة، فإن السائل الدوامي ينجمد فجأة وبطريقة اضطرابية. لقد اعتمد أنموذج الزجاج الدوامي لوصف سلوك المقاومة للموصلات الفائقة السيراميكية كدالة لدرجة الحرارة والتيار والمجال المغناطيسي [٦].



شكل (10-2) حالتي الصلب الدوامي : الشبكية والزجاج الدوامي

## ٢-٥ كثافة التيار الحرج

تعد كثافة التيار الحرج إحدى أهم خصائص الموصلات الفائقة على صعيد التطبيقات الهندسية، فمعظم تطبيقات القدرة العالية تقتضي أن يتحمل الموصل الفائق كثافات تيار هائلة جداً قد تصل في أحيان كثيرة إلى عدة  $\text{GA.cm}^{-2}$ .

تعرف كثافة التيار الحرج  $J_c$  على أنها قيمة كثافة التيار والتي عنده تجاوزها تفقد خصائصها الفائقة التوصيل. للموصلات الفائقة من النوع الأول يمكن عد التيار الحرج على أنه التيار الذي يحدث مجالاً مغناطيسياً حرجاً  $H_c$  عند سطح الموصل. إن هذا الأسلوب في تحديد قيم التيار الحرج يعرف على أنه تقريب سلسبي (silsbee approximation) [٦]. وهو عموماً أعلى من قيام التيار الحرج المقاسة عملياً.

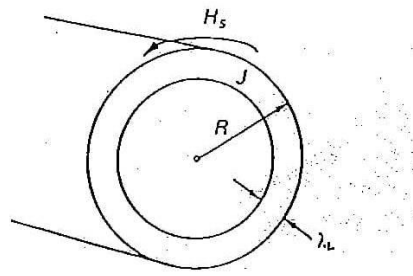
تعطى قيمة المجال السطحي  $H_s$  للموصل الفائق على شكل أسطوانة طويله ذات نصف قطر و تحمل تياراً كلياً بمقدار  $I$  منه العلاقة الآتية [٦]:

$$I_c = I/2 \pi R$$

..... (2.10)

و بذلك فان التيار اللازم لاحداث مجال حرج  $H_c$  عند سطح الموصل يحسب من العلاقة السابقة على ان  $(I_c = 2\pi RH_c)$ . ومن الجدير بالملاحظة ان هذه القيمة حتى وان كانت صحيحة، فلا يمكن كثافة التيار الحرج  $J_c$  على انها  $I_c/(\pi R^2)$  يمكن بيان سبب ذلك اعتمادا على الشكل (٢,١٠) اذا التيار يتمركز فقط ضمن طبقة سطحية رقيقة يساوي سمكها عمر الاختراق  $[\lambda_L]$ .

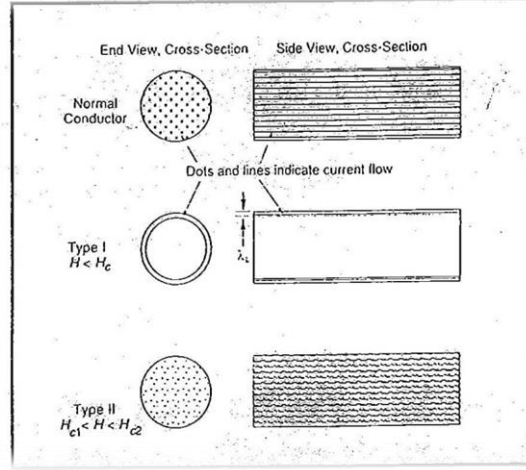
يقتصر انسياب التيار الفائق في الحالة المختلطة في الموصلات الفائقة من النوع الثاني على المناطق الفائقة التوصيل. يمكن وصف توزيع التيار في هذه الحالة على انها شبكة من ألياف فائقة التوصيل محاطة بمناطق اعتيادية، وكمفهوم مقارب توصف المناطق الفائقة التوصيل بانها ذات تداخلات اسفنجية يعرف الانموذج الاخير عادة باسفنجة مندلسن Mendelsohn sponge. يبين شكل (٢,١١) مقارنة أنموذجية الانتقال التيار في الموصلات الاعتيادية و الفائقة التوصيل.



شكل (11-1) في الموصل الفائق من النوع الاول  
بالمجال الحرج عند السطح  $J_c$  تتحد اقصى قيمة لـ

يوضح الشكل نتيجة مهمة لطبيعه انتقال التيار في الموصل الفائق من النوع الاول و الثاني و هو ان انسياب التيار الحرج في المادة من النوع الاول يتناسب مع محيط السلك، بينما يتناسب في المادة من النوع الثاني مع المقطع العرضي للسلك.





شكل (12-1) مقارنة بين انماط انسياب التيار لسلك موصل اعتيادي وموصل فائق من النوع الاول والنوع الثاني

يتطلب حساب التيار الحرج في الموصل الفائق من النوع الاول معرفه دقيقه مقيمه المجال الحاج مع الاخذ بنظر الاعتبار الشكل الهندسي للموصل و اعتمادية علاء درجه الحرارة. و يمكن اعتماد نفس الاسس مع الموصل الفائق من النوع الثاني عند قيم مجال مغناطيسي اقل من قيم مجال الحرج الأدنى  $H_c$ . اما عند قيم مجال اعلى من  $H_{c1}$  واقل من  $H_{c2}$  اي في الحاله المختلطة -فإن عملية الحساب تصبح اكثر تعقيدا خاصة وان القيم الفعلية عالية جدا [٧].

تتم الطريقه المباشرة لقياس كثافة التيار الحرج  $J_c$  توصيل اقطاب الى العينة الفائقة التوصيل ةزياده مستوى التيار المار فيها حتى يتم تدمير حالة التوصيل الفائق.

يمكن متابعة فقد التوصيلية الفائقة التوصيل من خلال ظهور فرق جهد عبر وصلات مرور التيار. ويشار لكثافة التيار المقاسة بهذه الطريقه وكثافة نقل الحرج transport critical current density. و تتضمن هذه الطريقه صعوبات جدية في عملية توصيل الاقطاب وتحديد معيار فرق الجهد الذي يشير الى اختفاء حاله التوصيل الفائق [٦]. لتقليل هذا التأثير يتم قياس فرق الجهد عبر مجموعة اخرى من الاقطاب وبذلك يتم تقليل فرق الجهد الناجم عن التوصيل الردي.

يستعاض عن الطريقه المباشرة احيانا بطريقه لا تتضمن وجود اقطاب توصيل، و يتم فيها قياس كثافة التيار الحرج عن طريق قياس حلقة الهسترة المغناطيسية للموصل الفائق. يتناسب عرض حلقة الهسترة  $\Delta M$  مع كثافه التيار الحرج و الذي يعرف في هذه الطريقه بتيار المغنطة magnetization current و يعطى بالعلاقة الاتية [٦]:

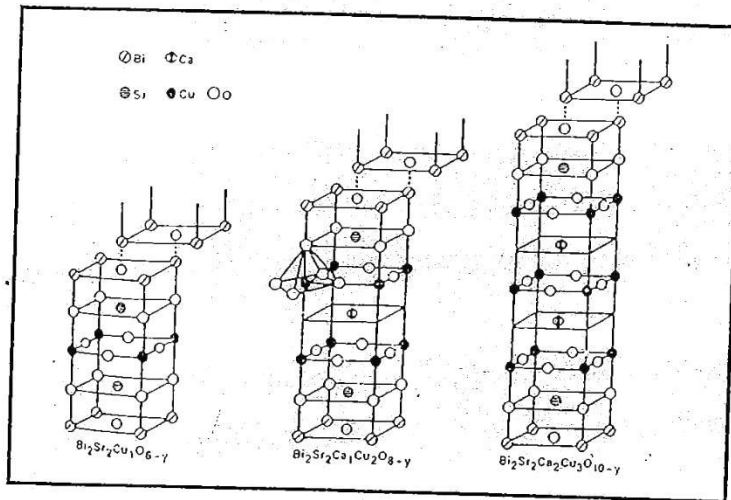
$$I_c = \frac{15\Delta M}{R_g} \dots\dots\dots(2.11)$$

حيث تمثل  $R_g$ : معدل الحجم الحبيبي للمادة.

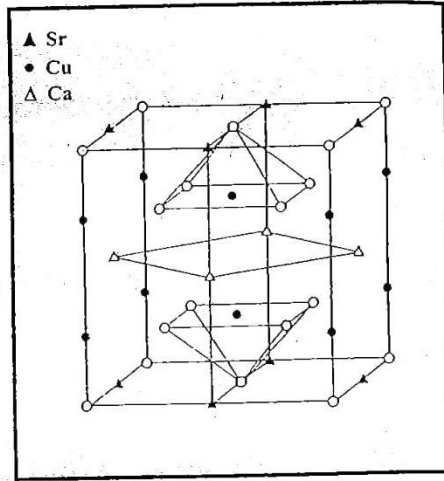
### ٢-٦ البنية البلورية للنظام Bi-Sr-Ca-Cu-O

تم الإشارة في الفصل السابق ان نظام البزموت يحتوي على عدد اطوار فائقة التوصيل و مجموعة اخرى ذوات خصائص عزلية او شبه موصلة. على اية حال فإن البنى البلورية للأطوار الفائقة التوصيل تتشابه الى حد بعيد، بيد ان الاختلاف يمكن في عدد طبقات اوكسيد النحاس والكالسيوم في شبكة كل طور [٢٢].

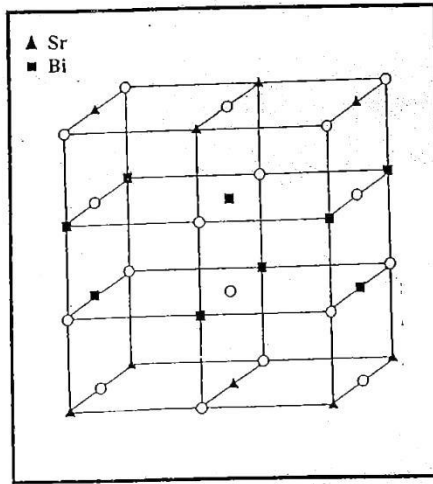
الشكل (٢،١٢) يبين التركيب البلوري للأطوار ( $n=1,2,3$ ) للنظام  $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_y$  تتشابه هذه الاطوار من الناحية التركيبية، اذا تحوي تراكيبيها شبه الرباعية طبقات مرصوفة من الوحدة الاساسية  $Bi_2Sr_2CuO_6$  تفصل بينها شرائح  $CaCuO_2$  يعتمد عددها على قيمة  $n$ . ومع زيادة عدد الشرائح ثابت الشبكة  $c$  من 24.6A الى 30.6A ثم 37.1A لقيم  $n$  تساوي 1 و2 و3 على التوالي [٢٢].



شكل (2-13) التراكيب البلورية للأطوار الفائقة التوصيل للنظام BI-SR-CA-CU-O



شكل (14-2) وحدة تركيبية للبنية البلورية للطور 2212



شكل (15-2) وحدة تركيبية في البنية التركيبية للطورين 2212 و 2223

يمكن فهم التركيب مشاكل افضل اذا تم تقسيمه إلى وحدتين. الوحدة الاولى مبينة في الشكل (٢,١٣) وهي خاصة بالطور ٢٢١٢ وفيه تكون الابعاد a و b مساوية لـ 5.41A و 5.42A على التوالي. تتناسق ذرات النحاس مع ذرات الأوكسجين في مواقع هرامية مربعة وبعده coordination number C.N=5 وتناسقي و تحتل ايونات النحاس  $Cu^{+2}$  هذا المواقع عند قاعده الهرم. تفصل طبقات Cu-O الواحدة عن الاخرى بطبقات لذرات فلزية لعنصري الكالسيوم.

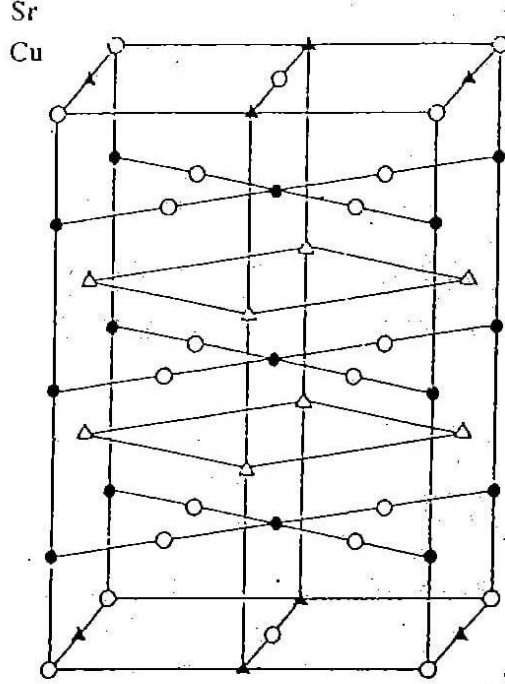
الوحدة التركيبية الثانية المبينة في الشكل (٢,١٤) وهي تعود على تركيب بلوري من نوع كلوريد الصوديوم و الذي يرتبط بعائلة البيروسكايد. تنتظم ذرات الأوكسجين على شكل مصفوفة و مكعبة متمركزة الوجة و فيها تشغل ذرات البزموت نصف ثمانية السطوح المتاحة، على اية

حال، فان هذه الذرات تزاخ عن موقعها المثالية [١٠٢] ولذا تكون ثمانية السطوح غير منتظمة (تتغير مسافة الأصرة Bi-O من 2.23A إلى 2.97A تشغيل ذرات السترونشيوم النصف الاخر من ثمانيات السطوح، ولانها تربط الوجدتين معا فان الزوايا الستة للثمانيات تبقى شاغرة. تتناسق ذرات السترونشيوم مع خمس ذرات أوكسجين (اربعة منها على بعد 2.74A وواحدة على بعد 2.91A ) في هذه الوحدة و مع اربع ذرات أوكسجين اخرى على بعد 2.57A في الوحدة الاخرى ليكون العدد التناسقي الكلي [٩].

تؤدي العلاقة بين الطبقات Bi-O المتجاورة، والتي تزاخ فيها ذرات البزموت الواحدة عن الاخرى بحدود نصف المسافة Bi-Bi وبالاتجاه [١٠٠]، الى مضاعفة وحدة الخلية وبالتالي الحصول على قيمة عالية للبعد c. يكون التآصر بين السطحين Bi-O ضعيف، مما يؤدي إلى سهولة شطر هذا التركيب الطبقي [١٠٣].

يتم الحصول على الطور ٢٢٢٣ بإضافة طبقتين من Cu-O و Ca إلى الوحدة الأولى وكما في الشكل (٢،١٥). وتحتفظ هذه الوحدة بخصائص الوحدة الاولى، ولكن طبقة Cu-O المضافة تحوي ذرات نحاس في المواقع رباعية سطحية (C.N=4) يمكن لهذه المواقع ان تمتلئ بأيونات  $Cu^{+3}$  توجد علاقة تركيبية وطيدة بين الطورين ٢٢١٢ و ٢٢٢٣ ومع الطور ٢٢٠١ أيضا، الا انها تختلف فقط في عدد الطبقات الموضوعة بين الوحدات الشبيهة بكلوريد الصوديوم.

جميع هذه الاطوار تتكون عند درجات حرارة منخفضة نسبيا، و يكون انتشار الايونات فيها بطيئا، لذا يشترط في تحضيرها اللجوء الي المعامله الحرارية لازمان طويلة جدا [٣٦-٣٧]. تشير دراسات الحيود للطور ٢٢١٢ الى وجود تركيب فائق superstructure غير متوافق معا الوحدات الفرعية الاساسية. ويوجد عدم توافق حجيم بين طبقات  $Bi_2O_2$  و طبقت  $Cu_2O_4$ . مسافة الأصرة Cu-O وهي بحدود 1.9A لذا يجب ان يكون مسافة الأصرة  $=A 2.69$   $(2^{1/2} \times 1.9)$  الحصول على تركيب مثالي. اربع من اواصر Bi-O الستة هي بحدود الطول (حوالي 2.71A) و هي على اية حال أطول من الطول المألوف للأواصر و الان المسافات Cu-O لا يمكن ان تقل بما يكفي للحصول على مسافات Bi-O ملائمة تحدث ازاحات لألواح Bi-O لخلق المسافات طويلة و اخرى قصيرة. و كنتيجة لذلك يحدث تضمين modulation بالاتجاه b بتكرار بحدود خمس مرات بقدر b للخلية الانموذج في الشكل (٢،١٢) [١٠٤].



شكل (2-16) وحدة تركيبية في البنية البلورية للطور 2223

## ٢-٧ البنية الدقيقة للسيراميك

يهتم علم المواد بدراسة و فهم التركيب الكيميائي و بنية المادة من جهة و العلاقات المختلفة بين التركيب و الخصائص النهائية من جهة اخرى. و على ضوء هذا الفهم و مع التطورات الهائلة في تقنيات القياس و التشخيص فقط تم التحقيق انجازات كبيرة في مجال تحسين الخصائص المختلفة للمواد السيراميكية. انا الجزء الاكبر من هذه الانجازات يعود الى تطوير مفاهيم البنية الدقيقة. تستعمل عادة مصطلح البنية الدقيقة لوصف السمات التركيبية التي يتراوح حجمها من ابعاد الأواصر الذرية (~0.3mm) صعوداً الى الاشكال الخارجية للقطع ذوات الابعاد المليمترية و المترية.

تشتمل هذه السمات التركيبية على التركيب الكيميائية على التراكيب الكيميائية والبنى البلورية والحجوم الحبيبية وتوزيعات الأطوار الأخرى. كل هذه السمات يمكن السيطرة عليها من خلال الطرائق التقليدية للتسيك والتشكيل والمعاملات الحرارية.

## ٢-٧-١ عناصر البنية الدقيقة

تعد عيوب الشبكة والسطوح البنية هي العناصر الاساسية للبنية الدقيقة. الجدول (٢,١) يبين ترتيب عناصر البنية الدقيقة اعتمادا على الأبعاد الهندسية لها. أن وجود البنية الدقيقة  $\Gamma$  بعناصرها المختلفة يكون مصحوبا دائما بزيادة الطاقة الحرة للمادة. ويمكن حساب مقدار الزيادة  $\Delta F_{\Gamma}$  من خلال جمع حاصل ضرب كثافة العناصر  $\delta_i$  (العناصر من  $i=0$  إلى  $i=2$ ) في الطاقة النوعية لكل عنصر  $e_i$  [١٠٥]:

$$\Delta F_{\Gamma} = \Delta U_{\Gamma} - \Delta S_{\Gamma}T \approx \Delta U_{\Gamma} = \sum_{i=0}^{i=2} \delta_i e_i \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

حيث  $U_{\Gamma}$  و  $S_{\Gamma}$  الانتروبي وطاقة البنية الدقيقة على التوالي.

جدول ٢,١ عناصر البنية الدقيقة [١٠٥].

no.	Geometrical dimension	Example for element	Dimension of density $\delta_i$	Specific energy $e_i$
1	0	Vacancy	$m^{-3}$	J
2	2	Dislocation	$m^{-2}$	$Jm^{-1}$
3	3	Grain boundary	$m^{-1}$	$Jm^{-2}$
4	4	Pore, particle	$m^0$	$Jm^{-3}$

تجهز طاقة البنية الدقيقة القوة الدافعة لبعض تفاعلات الحالة الصلبة مثل إعادة التلبيد recrystallization او تخشين الدقائق particle coarsening وتعد إحدى المفاهيم المهمة لاستقرارية البنية الدقيقة [١٠٦].

ولأن الخاصية المميزة للبنية الدقيقة هي انعدام الاتزان الترموديناميكي، لذا توجد طرائق عدة لتجهيز الطاقة اللازمة لتخليق عناصر البنية الدقيقة. وعلى سبيل المثال فإن أصل تركيبين طوريين يمكن تقسيمه إلى الأتي [١٠٧]:

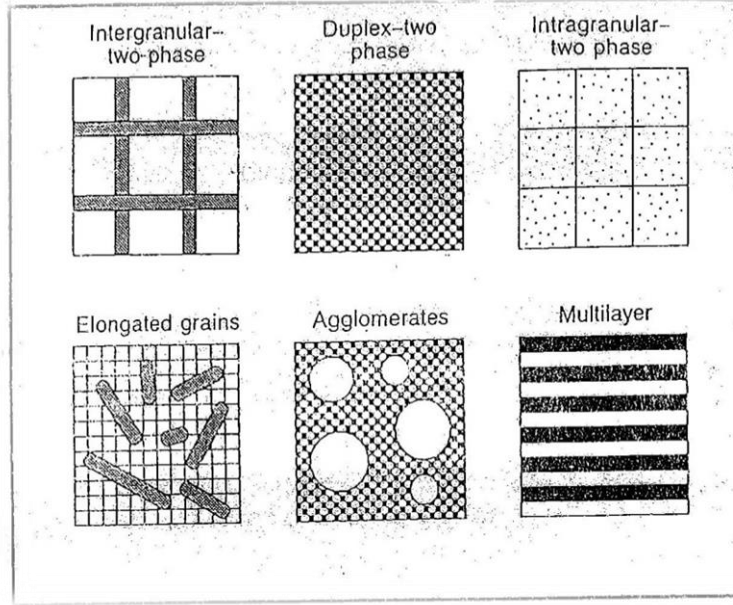
- التخليق المتجانس *homogeneous nucleation*.
- التخليق غير متجانس *heterogeneous nucleation*.
- الانحلال بسبب النمو المحفز *dissipation by autocatalytic growth*.
- التوليد *synthesis*.

يعتمد التركيب الدقيق الناشئ عن التخليق و النمو على آلية التفاعل سواء من الحالة السائلة او الحالة الصلبة. ويمكن توزيع عناصر البنية بشكل احصائي في حالة التخليق المتجانس، بينما يعتمد التوزيع في حالة التخليق الغير متجانس على وجود العيوب. تتحدد البناءات الهندسية للتركيب النامية (مثل الطبقات lamellae و القضبان rods الشجرية dendrites) على التفاعلات الترموديناميكية الغير عكسية irreversible و يشار لها الدقيقة المنحلة dissipative وتشمل البنى الناشئة عن التفاعلات الايوتكتيكية او الايوتكتويدية [١٠٦] وتشتمل البنية الدقيقة الناتج عن التوليف او التصنيع على اطوار مختلفة لتجمعات عشوائية يتم تكوينها بعمليات تصنيعية مختلفة مثل الكبس و التلييد، التسبيك الميكانيكي، البثق او اللحم او غيرها. ان اعلى درجة من التعقيد للبنى الدقيقة المصنعة يمكن الحصول عليها بتقنية ترسيب البخار vapor deposition [١٠٥].

## ٢-٧-٢ تحولات البنية الدقيقة

يرتبط مفهوم التحولات transformations بأي تغير لبنية المادة، ويمكن ان تحدث مختلف المستويات التركيبية. مثل التحولات النووية والالكترونية والتحويلات الطورية في المادة الصلبة. ويمكن ان يمتد هذا المفهوم ليشتمل على تحولات البنية الدقيقة.

يبين الشكل (٢,١٦) هيئة التخلل percolation لطورين مختلفين لتكوين أنواع أنموذجية البنى الدقيقة. وبنفس الوقت فان الشكل يبين بعض تحولات البنية الدقيقة والتي يمكن حصولها بين الطورين. يمكن تقسيم تحولات البنية الدقيقة إلى ثلاث أنواع هي [١٠٧].



شكل (2-17) انواع مختلفة من البنى الدقيقة للطورين

● تحولات عناصر البنية الدقيقة:

من المعروف ان الفجوات البلورية يمكن أن تتكثف إلى انخلاعات والتي بدورها تشكل الحدود الحبيبية. كما ان الحدود المتشاكهة coherent boundaries يمكن ان تتحول إلى حدود غير متشاكهة. ان هذوالتحولات تتميز بحقيقة ان عناصر البنية الدقيقة المتشاكهة تمتلك طاقة أعلى. ان القوى الدافعة لهذه التحولات هي خفض الطاقة الكلية للنظام في الوقت الذي تزداد فيه الطاقة النوعية للعنصر  $e_i$ . وعند بدء التحول تقل كثافة العنصر المتحول مع تكوين العنصر الجديد.

● تحولات البنية إلى أطوار:

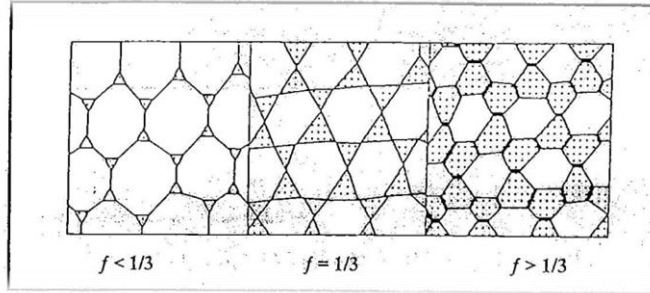
تحدث تحولات البنية الدقيقة إلى أطوار عندما تصل كثافة أحد عناصر البنية إلى أعلى قيمة ممكنة. فعلى سبيل المثال يمكن الحصول إلى الكور الزجاجي عندما تصبح كثافة الانخلاعات او كثافة الحدود الحبيبية كبيرة جدا. وقبل ان تكتمل هذه العملية تكون البنية الدقيقة مكونة من بلورات متناهية الصغر. يحدث هذا التحول تحت تأثير طاقة خارجية كما في أحداث الانخلاعات عند السطوح المعرضة لاجهادات قص احتكاكية. عندما تزداد كثافة الحدود الحبيبية إلى قيم عالية فيمكن عندها أهمل الكسر الحجمي للحدود والذي يستبدل الطور البلوري عند



أكمال التحول تعد عملية التبلور هي العملية العكسية لهذا النوع من التحولات البنية الدقيقة، اذ تتكون البنية الدقيقة من الطور الزجاجي [١٠٩].

● التحولات بين الأنواع المختلفة للبنى الدقيقة:

يرتبط تحول بنية دقيقة ما إلى بنية اخرى مع ظهور أو اختفاء أحد أنواع الحدود شكل (٢،١٧) يمكن ان يحدث هذا التحول كدالة للكسر الحجمي للأطوار وأشكالها واتجاهاتها. يحدث التحول لتوزيع حجمي وشكلي ثابتين عند كسر حجمي حرج، والذي يمكن حسابه بأستخدام دوال احصائية أو هندسية للبنية الدقيقة. توجد أمثلة عديدة على هذا النوع من التحولات مثل عمليات الكربنات للفولاذ. فتتغير نسبة الكربون تؤدي إلى حصول انحدار في التركيب الدقيق وعند اجراء المعاملات الحرارية يمكن تحول أحد الاطوار إلى آخر.



شكل (2-18) تحول نوع البنية الدقيقة من شبكة الى تشتيت والعكس اعتماداً على الكسر الحجمي

٢-٨ تلييد المواد السيراميكية

يوصف التلييد على انه المعاملة الحرارية التي تجرى على مساحيق المواد البلورية او غير البلورية لتحويلها إلى مادة صلبة متماسكة. توجد عموماً ثلاثة أنواع من عمليات التلييد المهمة في تصنيع المواد السيراميكية [١١٣-١٠٩].

● التزجج Verification:

يتولد في هذا النوع من المعاملة سائل لزج عند درجة حرارة الحرق كافي لملئ كل الفراغات المسامية بين دقائق المسحوق. يحدث في هذه العملية إنكماش كبير وبنية دقيقة غير متجانسة الأطوار.

● تلييد الطور السائل Liquid phase sintering:

يسمح التركيب الكيميائي في هذه العملية بتكوين نسب أقل من الطور السائل عند درجة حرارة الحرق. يعمل السائل على تسهيل عملية إعادة تنظيم الدقائق، بيد انه غير كافي لملى كل المسامات. وفي المراحل اللاحقة من العملية تحدث عملية تنويه وتخليق للصلب من الطور السائل مما يسمح بإعادة تشكيل الدقائق وتكوين جسم كثيف.

● تليد الحالة الصلبة **Solid state sintering**: تبقى كل مكونات المسحوق

بحالة صلبة خلال زمن عملية التليد، ويتم التكتيف densification من خلال تغير شكل الحبيبات فقط. تعد هذه العملية مفضلة لإنتاج المواد السيراميكية ذات الخصائص الميكانيكية والكهربائية أو البصرية العالية.

توجد العديد من المتغيرات التي من شأنها التأثير في الأنواع المختلفة من عمليات التليد، إلا أن أكثرها أهمية هي:

- ❖ درجة الحرارة  $T_s$ .
- ❖ زمن كل مرحلة من مراحل التليد  $t_s$ .
- ❖ حجم وتوزيع الدقائق للمسحوق السيراميكي.
- ❖ التركيب الكيميائي للنظام ومن ضمنه الإضافات والجو المحيط.
- ❖ ضغط التصنيع في الحالات التي يستخدم فيها الضغط الساخن أو الجو المحيط المتحكم به.

#### ١-٨-٢ القوة الدافعة لعملية التليد

القوة الدافعة الأساسية للتغيرات التي تحصل أثناء عملية التليد هي تقليل الطاقة السطحية الحرة للنظام. ويتم ذلك بتقليل مساحة السطوح واسطوح البينية للدقائق والذي يمكن تحقيقه بإشراك عمليتين مختلفتين الشكل (٢،١٨)، وهما تحويل عدد كبير من الدقائق الصغيرة إلى عدد أقل من الدقائق الأكبر حجماً

(تخشين الدقائق particle coarsening) وتتم من خلال اختزال طاقة السطح الحرة او طاقة الحدود الحبيبية.

أما عملية الثانية فهي عملية التصلب densification وتتم بإبدال السطح البينية (غاز-صلب) بسطح بيني (صلب-صلب) ذي الطاقة الأقل، بمعنى اخر إبدال طاقة السطح الحر بطاقة

الحدود الحبيبية [١١١]، لذلك فإن التغيرات التي تحصل أثناء التلييد هي نتيجة للتأثيرات المشتركة لعمليتي التخشين والتصلب.

ان القوة الدافعة في التلييد (تقليل الفائض في طاقة السطح الحرة) تتحول إلى طاقة دافعة تعتمد على المستوى الذري (لذلك تتضمن انتشار للذرات) من خلال التغيرات بالانحناءات والتي تتواجد بالضرورة في الاجزاء المختلفة من المسحوق. تسبب هذه الانحناءات جهدا كيميائيا واختلاف في كثافة الفجوات Vacancies وبذلك تسيطر على اتجاه انتقال المادة. أن العلاقة التي تربط طاقة السطح (...) والانحناء وتركيز الفجوات هي معادلة Gibbs-Thomson:

$$C_r = C_\infty \exp\left\{\frac{2\gamma\Omega}{rk_B T}\right\}$$

.....(2.13)

حيث  $(C_r)$ : هي تركيز الفجوات تحت يطح ذو نصف قطر انحناء  $r$ ،  $C_\infty$ : هي تركيز الفجوات تحت سطح مستوي و  $\Omega$ : هي الحجم الذي تشغله الفجوات.

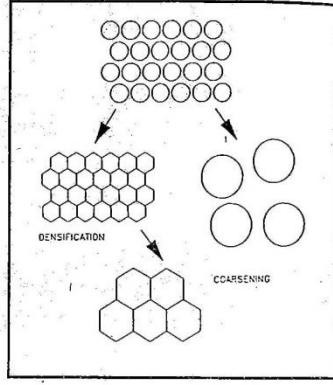
يختلف تركيز الفجوات اعتمادا على نصف قطر الانحناء، ويسبب انحدارا في الفجوات وبذلك انسيابها. ويكمن وصف انتقال الكتلة بقانون فـك Fick's law الاول للانتشار [١١١]:

$$= -D \frac{dC}{dx}$$

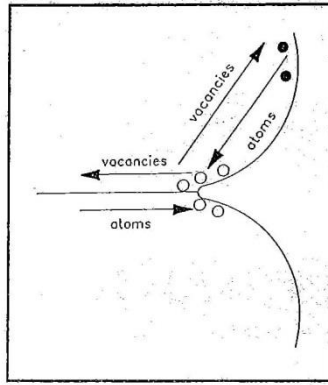
.....(2.14)

حيث  $J$ : فيض الفجوات،  $D$ : معامل انتشار الفجوات،  $dC/dx$ : انحدار التركيز.

خلال المراحل الأولى لعملية التلييد يحدث انسياب صافي للفجوات نحو منطقة التماس بين الدقائق. تمتلك مناطق التماس أنصاف أقطار سالبة شكل (٢،١٩) فان انسياب المادة من سطح الدقائق أو من داخلها نحو منطقة التماس يصاحبه نقصان في الطاقة الحرة يكافئ انسياب الذرات نحو مناطق التماس انسياب الفجوات بالاتجاه المعاكس، ولذلك يتسبب في تكوين منطقة العنق neck بين الدقائق.



شكل (2-19) عمليتي التليد والتصلب والتخشين



شكل (2-20) اتجاه انسياب الفجوات والذرات خلال عمليتي تكوين العنق بين دقيقتين

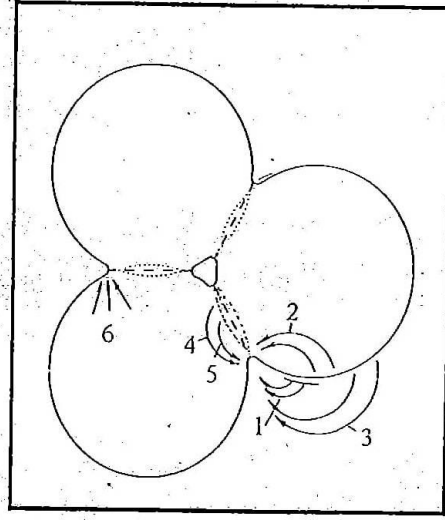
## ٢-٨-٢ آليات ومراحل التليد

تقسم عملية التليد عادة إلى اربع مراحل تحدث بشكل متتابع [١١١]. عند اقتراب الدقائق حد التماس، تسبب القوى البينية الذرية *interatomic forces* حدوث تماس على هيئة عنق بين الدقائق وقد تسبب أيضا إعادة تنظيم للدقائق. تمثل هذه المرحلة الصفرية *zero stage* نوع من الالتصاق الأنفي وتؤدي إلى تشكيل عنق ابتدائي بحجم معين. يلي هذه المرحلة عملية نمو للعنق من خلال انتشار الفجوات والذرات، وخلال هذه المرحلة والتي تدعى بالمحلة الابتدائية *initial stage* تحتفظ ال لإعناق المتكونة بين الدقائق بحجوم صغيرة إلى درجة يمكن تمييز بعضها عن البعض.

في هذه المرحلة الوسطية او الانتقالية *transitional or intermediate stage* تصبح الأعناق أكبر حجما وتبدأ المسامات بالانعزال عن بعضها، وعندما تنعزل تماما وتأخذ أشكالا كروية عندها تكون المرحلة الثالثة قد ابتدأت.

عمليا لا يمكن تميز الحد الفاصل بين كل مرحلة بشكل واضح. لذا فإن النماذج الرياضية المعتمدة لوصف آلية التلييد تهمل في أحيان كثيرة المرحلة الصفرية والمرحلة الانتقالية.

توجد عدة آليات يمكن ان تسهم بعملية نمو العنق والتصلب للمساحيق خلال عملية التلييد الشكل (٢,٢٠) والجدول (٢,٢) يبينان بعض الآليات الممكن حصولها خلال مراحل التلييد المختلفة.



شكل (21-2) آليات التلييد

يعتمد معدل نمو العنق بين الدقائق على نوع الآلية العاملة في التلييد، ويمكن وصف معامل النمو بالمعادلة العامة الآتية [١١٠].

$$= A't$$

.....(2.15)

اذ تمثل  $R_n$ : نصف قطر العنق  $A'$ : ثابت يسهم في تحديد قيمته كل من الطاقة السطحية وحجم ومعامل الأنتشار ودرجة الحرارة،  $t$ : الزمن، أما قيمة الأس  $m$ : فتعتمد على نوع الآلية .

إن تعدد آليات التلييد مع امكانية حصولها في آن واحد أوجد صعوبة في وضع أنموذج شامل يصف عملية التلييد بمراحلها المتنوعة. على أية حال فان الاختلاف بين النماذج الرياضية يتعدى قيم الثوابت المعتمدة في اشتقاقاتها، لذا فأغلبها يأخذ الشكل العام الآتي [١١١].

$$= \left\{ \frac{k' D \gamma \Omega t}{k_B T r^n} \right\} p$$

.....(2.16)

حيث  $L$ : التغير في طول الجسم،  $L_0$ : الطول الابتدائي،  $K'$ : ثابت تقترب قيمته من  $(1/r)$ : نصف قطر الدقائق. تتراوح قيمة  $p$  بحدود  $(0,5 - 0,4)$ ، بينما قيمة  $n$  فهي بحدود 3 وتلك قيمتها على آلية التلييد المحتملة.

تصف هذه العلاقة الانكماش الحاصل في الجسم خلال عملية التلييد بسبب انتقال المادة وملئ المسامات.

## ٩-٢ النمو الحبيبي

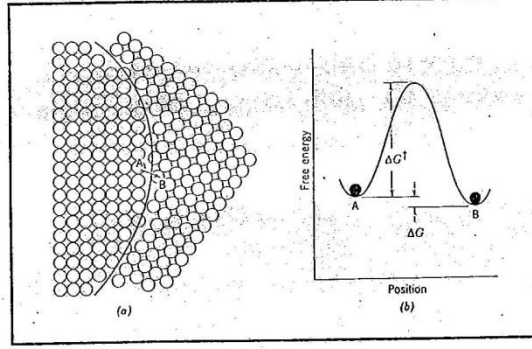
يتطلب النمو الحبيبيات الصغيرة عند درجات الحرارة العالية انكماش بعضها او حتى اختفائه. لذا يمكن عد عملية النمو الحبيبي على انها معدل اختفاء الحبيبيات. ان القوة الدافعة لنها التغيير هي اختلاف الطاقة بين المادة ذات الحبيبيات الصغيرة وتلك التي تمتلك حبيبيات كبيرة والناشئ عن نقصان مساحة الحدود الحبيبية وبالتالي الطاقة الكلية للحدود. وكمثال على ذلك فان زيادة الحجم الحبيبي من 1 إلى 1 cm<sup>3</sup> يصاحبه تغير بالطاقة الكلية للحدود من 2J/g إلى 0.5J/g [١١١].

يسبب وجود الانحناءات بين الحدود الحبيبية نشوء فرق في الطاقة عبر حدودها والذي يمكن ان يعطى بالعلاقة الاتية [١١٥، ١١١]:

$$\Delta G = \gamma V_m \left\{ \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right\}$$

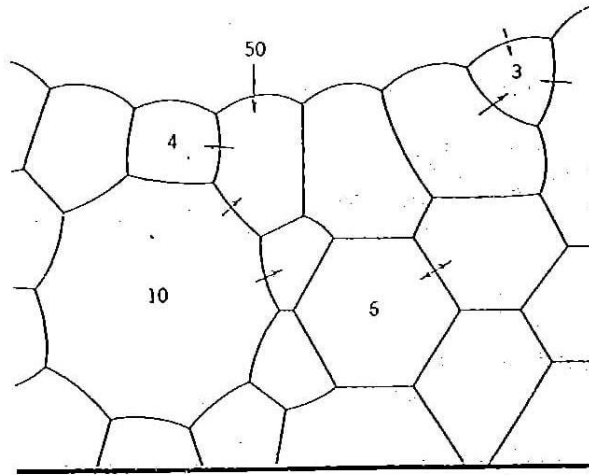
.....(2.17)

حيث  $G$ : تمثل التغير بالطاقة الحرة عبر السطح البيني المنحني،  $(\gamma)$ : فهما نصفي قطري الانحناء للحد الحبيبي. ان هذا الفرق بالطاقة بين جانبي الحدود يسبب نشوء قوة دافعة لحركتها باتجاه مركز الانحناء. يتناسب معدل حركة الحدود مع الانحناء ومعدل قفز  $jump$  الذرات عبر الحدود. الشكل (٢١، ٢) يبين توزيع الذرات على جانبي الحدود الحبيبية والتغير بالطاقة المصاحب لقفز الذرات.



تغيير الطاقة عند قفز الذرات B تركيب الحدود الحبيبية و A شكل (22-2)

تمتلك الذرات في الجانب المقعر من الحدود طاقة اعلى من الذرات على الجانب المحدب وذلك بسبب اختلاف معامل الرص للذرات على الجانبين. يعتمد نمو الحبيبات على انحناء الحدود الحبيبية اذ يتناسب مع  $(N-6)$  حيث يمثل  $N$  عدد اضلاع الحبيبات. تميل الحبيبات ذات الاضلاع الأكثر من ستة للنمو على حساب الحبيبات ذات عدد الاضلاع الاقل، وكما موضح في الشكل (٢,٢٢) الذي يبين ان اتجاه هجرة الحدود يكون نحو مركز التحذب، كما يلاحظ ان الحبيبات التي تمتلك ست اضلاع تحتفظ بطاقة متساوية للذرات عبر جانبي حدودها لذا لا تميل هذه الحبيبات للنمو او للانكماش.



شكل (23-2) رسم تخطيطي لمادة متعددة البلورات تشير الاسهم الى اتجاه حركة الحدود

يتناسب انحناء ضلع الحبيبية مباشرة مع قطر الحبيبية، لذا تتناسب القوة الدافعة وبالتالي

معدل نمو الحبيبات عكسيا مع حجم الحبيبي [١١١]:

$$\frac{D_p}{dt} = \frac{K''}{D_p}$$

.....(2.19)

حيث  $D_{p0}$ : تمثل قطر الحبيبات عند الزمن (٠)،  $k''$ : ثابت يعتمد على تحركية الحدود الحبيبية grain boundary mobility وعلى طاقة الحدود ودرجة الحرارة.

تشير التجارب العلمية إلى أن قيمة الأس ٠,٥ تقل لحدود ٠,١، وتوجد اسباب عديدة لتفسير هذه الحالة قد يكون أهمها هو اعاقا حركة الحدود الحبيبية بسبب وجود الأطوار الشائبة او المسامات تعمل الاطوال الشئبة على تسليط قوة أعاقا على الحدود وبذلك تسبب كبحا لحركتها [١١٥-١١٣-١١١].

## الفصل الثالث

### الجزء العلمي

#### 3-1 مقدمة

يتضمن هذا الفصل وصفا تفصيليا لجميع الاجهزة المستخدمة في البحث مع شرح للتقنيات المعتمدة في اجراء القياسات المختلفة ، ويتضمن الفص ايضا شرحا دقيقا لطرائق تهيئة العينات واعدادها بما يلئم ومتطلبات كل قياس . يوضح المخطط (3.1) خطوات ومراحل العمل المختلفة بدءا من تحضير المواد الاولية وانتهاءً بالقياسات المعتمدة في تحقيق غايات البحث واهدافه.

اعتمد المركبان  $Bi_{1.7} Po_{0.3} Sr_2 Ca_2 Cu_3 O_y$  و  $Bi_2 Sr_2 Ca_2 Cu_3 O_y$  كمرجعين للمقارنة بين خصائصهما وخصائص المركب  $Bi_2 Sr_{2-x} K_x Ca_2 Cu_3 O_y$  والذي تراوحت قيم X فيه من (0.0~ 0.25) .

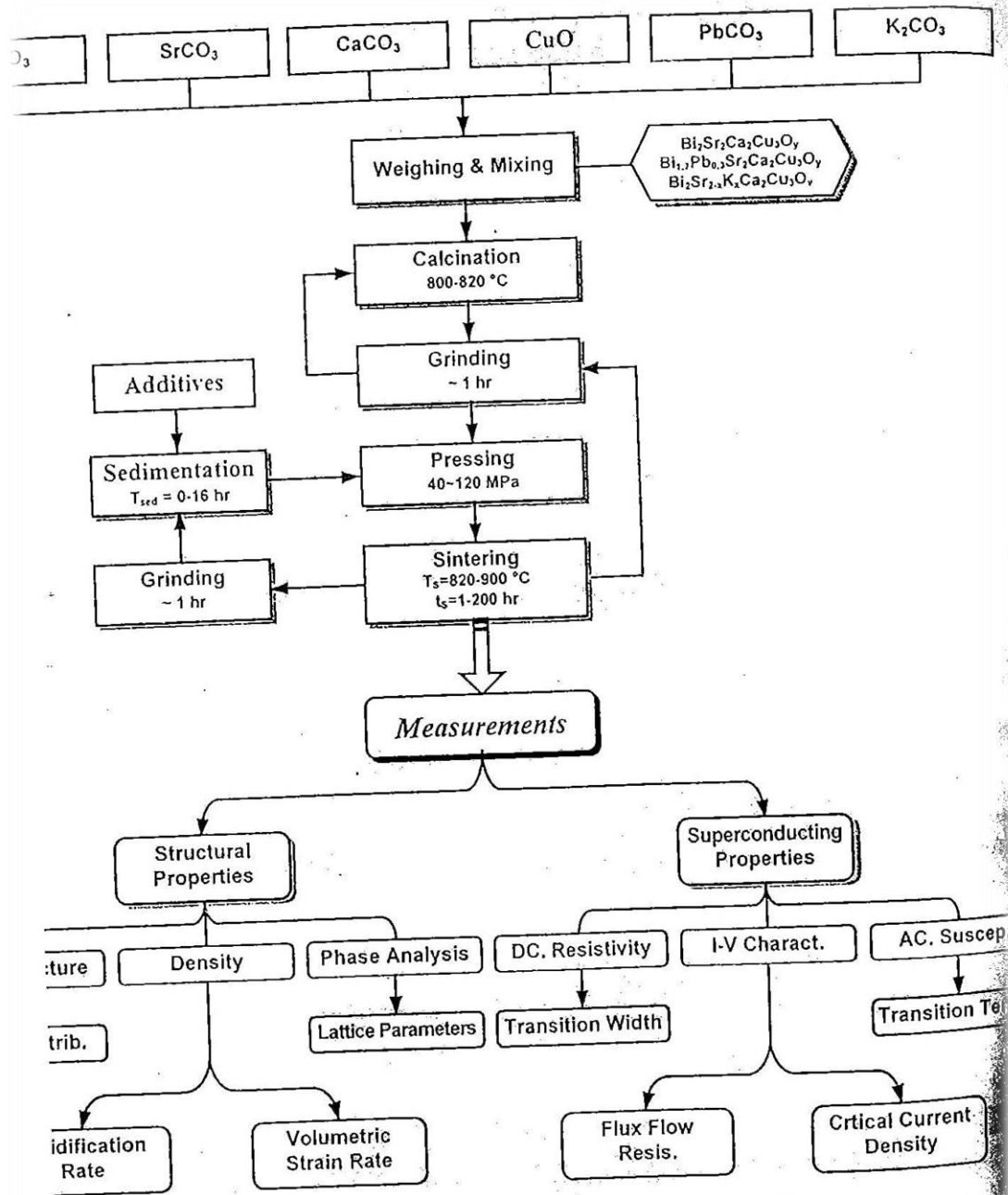


المركب الاول يمثل الصيغة الكيميائية النظامية للطور 2223 ذي درجة الحرارة الحرجة الاعلى  $T_c$ ، بينما يمثل المركب الثاني الصيغة المعتمدة لتحقيق أعلى استقرارية تركيبية للطور 2223 وذلك عن طريق الاشابة بعنصر الرصاص .

أشتمل هذا الفصل على قياسات التوصيل الفائق والمتمثلة بقياسات المقاومة الكهربائية والتأثرية المغناطيسية وكذلك قياسات خصائص تيار- فرق الجهد . لقد اعتمدت قياسات التيار- فرق جهد في تحديد قيم كثافة التيار الحرج ومقاومة انسياب الفيض المغناطيسي . ويشتمل الفصل ايضا على القياسات التركيبية والمتضمنة قياسات الكثافة وتحليلات البنية الطورية والدقيقة.

## 2-3-تهينة واعداد العينات

المواد الاولية المستخدمة في تحضير المركبات السيراميكية الفائقة هي: أوكسيد البزموت  $Bi_2O_3$  بنقاوة 99.99% والمجهاز من شركة Fluka وكربونات السترونشيوم والكالسيوم  $CaCO_3$  و  $SrCO_3$  بنقاوة 99.97% و 99.95% على التوالي والمنتجين من شركة Ferak و أوكسيد النحاس  $CuO$  بنقاوة 99.90% والمجهاز من شركة Fluka واخيرا مركبات عناصر الأحلال وهي مركبات الرصاص  $PbCO_3$  بنقاوة 99.90% والمجهاز من شركة BDH وكربونات البوتاسيوم  $K_2CO_3$  بنقاوة 99.96% والمنتج من شركة Fluka.



شكل (1-3) مخطط العمل الكلي والقياسات

تضمنت عمليات التهيئة الأولية للمواد خلط المساحيق وفقا للنسب الوزنية المحسوبة مسبقا والمعتمدة على الصيغة الكيميائية للمركبين  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  و

$\text{Bi}_{1.7}\text{Po}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ . وفيما يتعلق بالاحلال بعنصر البوتاسيوم فقد اعتمدت الصيغة  $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{K}_x\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  وقد تراوحت قيم X فيها بين (0.0~ 0.25).

خلطت المواد الأولية معاً باستخدام mortar مصنوع من الالومينا وتراوحت فترة الخلط من (0.5~ 1 hr) مع اضافة الميثانول النقي (4N) لتسهيل عملية الخلط ومجانسة المواد. ثم وضعت المواد في جفنة من الالومينا لأجراء عملية الكلسنة calcination. تهدف عملية الكلسنة إلى تحقيق غايتين : الاولى تفكيك المواد الأولية إلى اكاسيدها وذلك بتحرير غاز ثنائي اوكسيد الكربون عند درجات حرارة عالية . أما الغاية الأخرى فهي الاحداث تفاعلات أولية بين العناصر المختلفة من شأنها تسهيل عملية تكوين الاطوار المطلوبة في عمليات التلييد اللاحقة .

أجريت عملية الكلسنة لخليط مركبات البزموت المعتمدة في البحث عند درجة حرارة  $800^{\circ}\text{C}$  ولفترة زمنية تراوحت بحدوث (12-15 hr) في فرن كهربائي نوع Carbolite وتحت ضغط جوي اعتيادي . يعاد بعدها طحن وخلط المواد المكلسنة مرة ثانية ويعاد اجراء عملية التفاعل بين مكونات المواد الأولية وتضمن التخلص من غاز ثنائي اوكسيد الكربون كليا [27] .

يتبع عملية الكلسنة النهائية اجراء عملية الطحن في وسط من الميثانول لمدة ساعة واحدة تتبعها عملية تجفيف لازالة بقايا الميثانول وعندها يصبح المسحوق جاهزا لعمليات التشكيل اللاحقة.

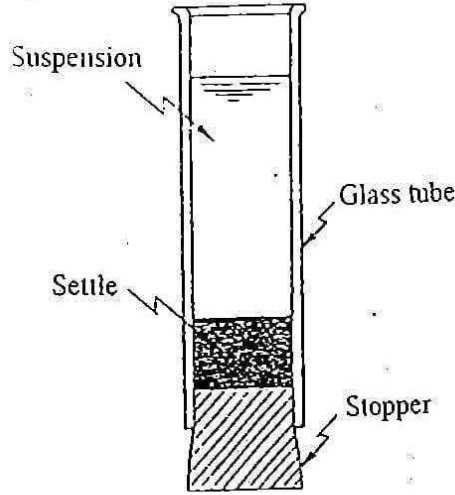
شكلت العينات بأعتماد تقنية الكبس الجاف ، باستخدام قالب مصنوع من سبيكة فولاذ العدد tool steel عالية الصلادة ، وجرت عملية الكبس تحت ضغط تشكيل بحدود (40-120 Mpa) للحصول على عينات بهيئة اقراص بسبك (1.5-2.5 mm) وقطر (13mm) .

تمت عملية التلييد في فرن انبوبي مزود بمسيطر حراري مبرمج نوع Eurotherm 181P وقد وضعت العينات على قواعد من اوكسيد الالمنيوم العالي النقاوة والمعدة خصيصا لهذا الغرض. توضع العينات وقواعدها في منتصف منطقة التسخين للفرن heating zone والتي ترلوح طولها بحدود 10cm. وتجري عملية التلييد لمدى حراري تراوح بين  $820-900^{\circ}\text{C}$  ولفترات زمنية مختلفة (1-200 hr). اجريت عملية التلييد على فترات متقطعة وقد تخللها في بعض الاحيان عمليات طحن وكبس وسطية . تمت عمليات الحرق في اجواء اعتيادية وبمعدل تسخين  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  يليها فترة استقرار ثم تبرد العينات بمعدل معتدل  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  حتى درجة حرارة  $810^{\circ}\text{C}$  وبعدها يعجل معدل التبريد حتى الوصول إلى درجة حرارة الغرفة [32] .

### 3-3 عملية ترصيف الحبيبات

بهدف تحسين خصائص التوصيل الفائق للمركبات المعتمدة في البحث استحدثت تقنية جديدة تهدف إلى ترصيف المادة وتحسين معامل الرصف للدقائق.

تستند التقنية إلى تركيد الدقائق من وسط حامل carrier بحيث ترتصف فوق بعضا البعض تجري عليها عمليات التشكيل التقليدية. تتطلب هذه التقنية التحكم الدقيق بعوامل عديدة من شأنها التأثير في آلية التركيز وبالتالي خصائص الراكد. تتضمن العملية تشتيت الدقائق الفائقة التوصيل في مذيب عضوي toluene بمادة مشتتة هي حامض الستريك steric acid ويضاف إلى المحلول مادة رابطة هي Polyvinyl alcohol ومادة مزيتة هي مادة poly ethylene glycol. يتم السيطرة على معدة تركيد الدقائق وبالتالي زمن التركيز من خلال التحكم بنسبة حامض الستريك والذي تراوح تركيزه المولاري في المحلول بحدود (0.05~2M). يوضع العالق في انبوب زجاجي مفتوح من الطرفين (شكل 3.1) وتغلق احدى نهايتيه بسدادة مطاطية stopper. تثبت الانبوبة بشكل عمودي حتى يتم تركيد الدقائق بالكامل ثم يسحب المحلول الفائق ويتم اخراج الراكد بعد تجفيفه عند درجة حرارة (40-60 C) ولمدة (2-5 hr). يوضع الراكد شبه الجاف في القالب ويتم تشكيله تحت ضغوط الكبس المذكورة في الفقرة السابقة. ثم تجري المعاملات الحرارية وفق برنامج حراري ويتضمن التسخين بطى  $3^{\circ} \text{C}/\text{min}$  والبقاء عند هذه الدرجة لمدة ساعة واحدة للسماح بتطاير مخلفات المواد العضوية المعتمدة في التحضير التي قد تسبب احداث اجهادات وتشققات، ثم يرفع التسخين إلى  $10^{\circ} \text{C}/\text{min}$  حتى درجة حرارة  $700\sim 800^{\circ} \text{C}$  والثبات عند هذه الدرجة لمدة (1~2 hr) يليها التبريد  $10^{\circ} \text{C}/\text{min}$  حتى درجة حرارة الغرفة.



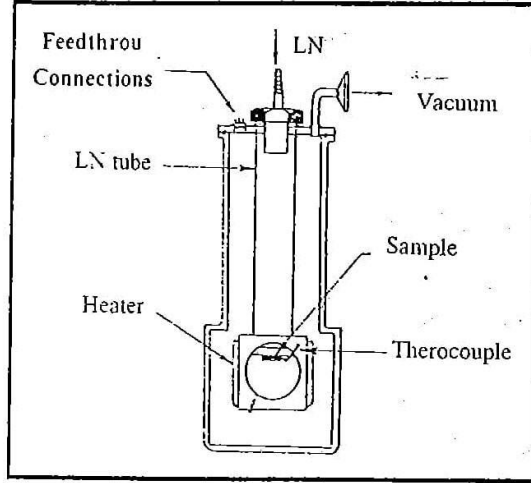
شكل (2-3) توضيح لعملية تركيز المحلول الفائق داخل الانبوبة الزجاجية

### 3-4 قياسات التوصيل الفائق

أجريت مجموعة من قياسات التوصيل الفائق مثل قياسات المقاومة الكهربائية كدالة لدرجة الحرارة وقياسات كثافة التيار الحرج عند درجة حرارة ثابتة (77K) وقياسات خصائص تيار- فرق جهد واخيرا قياسات التأثيرية المغناطيسية . وتطلب اجراء جميع هذه القياسات وجود منظومة لتبريد العينات cryostat والتحكم بدرجة حرارتها بشكل دقيق.

الشكل (3.2) يوضح اجزاء المنظومة المستخدمة في البحث وهي مكونة من اسطوانة معدنية خارجية ومجموعة من حلقات مطاطية لاحكام تفريغ الاسطوانة إلى ضغط بحدود  $10^{-3}$  (tor)، لقد تم تحقيق التفريغ إلى ضغط منخفض باستخدام مضخة دوارة .

الجزء العلوي من الاسطوانة يحوي مجموعة من التوصيلات تساعد في عملية توصيل اسلاك القياسات المختلفة من ضمنها أسلاك المزدوج الحراري نوع T، ويحوي الجزء العلوي أيضا على فتحتين أحدهما لتفريغ الحجرة الداخلية والاخرى عبارة عن اسطوانة من الفولاذ المقاوم للصدأ تعمل كحاوية لسائل النيتروجين المستخدمة في عملية التبريد، ترتبط نهاية هذه الاسطوانة بجزء التبريد Cold finger الذي يرتبط مباشرة بالعيينة. ويحوي هذا الجزء أيضا على مسخن كهربائي يعمل بفرق جهد (12V) الغرض منه السيطرة على درجة حرارة العينة من خلال قيمة فرق الجهد المجهزة له.



شكل (3-3) اجزاء منظومة التبريد المستخدمة في قياسات التوصيل الفائقة للعينات

### 3-4-1 الأتصالات الأومية

أحدى مترتبات طول التشاكة القصير للمواد السيراميكية الفائقة التوصيل هي صعوبة عمل اتصالات اومية ذوات مقاومة منخفضة. وإذا كانت مقاومة اتصال بحدود  $1\Omega.cm^{-2}$  ملائمة لاجراء قياسات المقاومة الكهربائية بطريقة المجسات الاربعة، فان اتصال المباشر باستخدام عجينة الفضة *silver paste* والذي يحدث مقاومة اتصال بحدود  $10^{-2}$  -  $10\Omega.cm^{-2}$  [116] لن يسبب سوى نسبة خطأ بسيطة في القياسز أما في قياسات كثافة التيار الحرج فأن هذه المقاومة الصغيرة تسبب ضياع القدرة على شكل حرارة من شأنها رفع درجة حرارة العينة أو حتى أنصهار منطقة التماس.

لذا ولغرض الحصول على اتصالات ذوات مقاومة منخفضة فقد تم اللجوء إلى استخدام طرق محورة [117] لعمل اتصالات أومية ذوات مقاومة منخفضة.

تتضمن الطريقة وضع كمية من مسحوق الفضة في المناطق المراد عمل اتصالات أومية ثم تلدينها عند درجة حرارة بحدود  $700^{\circ}C$  لمدة ساعة واحدة وذلك بتلييد مسحوق الفضة وانتشار ذراته إلى داخل العينة فائقة التوصيل. وبعدها يمكن توصيل الاسلاك من خلال الربط بمناطق بأستعمال عجينة الفضة.

لقد تم قياس مقاومة الاتصال ووجد انها تتراوح بحدود  $10^{-7}$  -  $10^{-8}\Omega.cm$  عند درجة حرارة  $77K$ ، وهي تعد ملائمة جدا لقياس كثافة التيار الحرج للعينات السيراميكية.

### 3-4-2 قياسات المقاومة الكهربائية

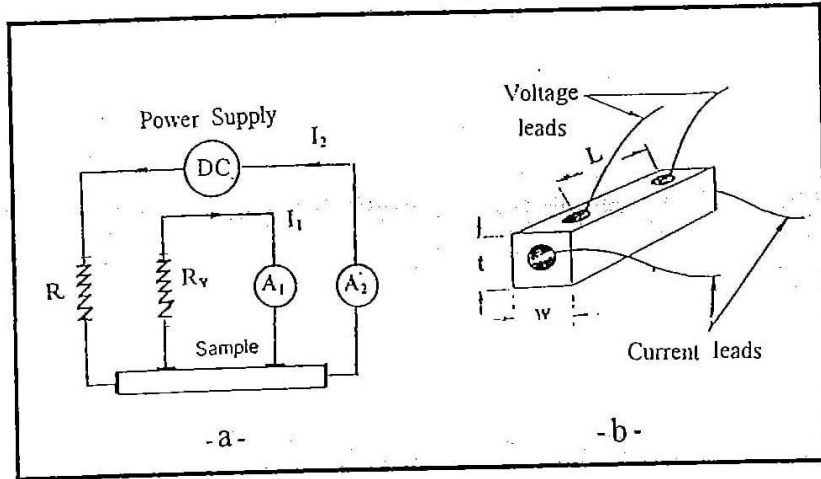
الدائرة الكهربائية المستخدمة لقياس المقاومة الكهربائية بطريقة المجسات الاربعة four point probe مبينة في الشكل (3.3a). تتألف الدائرة من مجهر قدرة نوع L30-2 ومقياسي تيار نوع Keithley 616 Digital Electrometer بحساسية  $\pm 10^{-12} A$  والثاني نوع Hewlett-Packard 3468A بحساسية  $\pm 10^{-6} A$  ومقياس درجة حرارة mark 5000 مزود بمزدوج حراري نوع T.

يتم القياس بأمرار تيار ثابت 10mA عبر اقطاب التوصيل التيار المبينة غي الشكل (3.3b) وبحسب فرق الجهد عبر الأقطاب السطحية بقياس التيار المار في المقاومة  $R_v$  والتي تساوي قيمتها  $10\Omega$ . إن الدائرة المكونة من مقياس التيار ( $A_1$ ) والمقاومة  $R_v$  يعملان في هذه الحالة كمقياس لفرق الجهد، وقد تم اللجوء لهذا التنظيم بسبب عدم توفر مقياس فرق جهد يلائم متطلبات القياس.

تحسب المقاومة الكهربائية بأعتماد العلاقة الآتية :

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{w.t}{L} = \frac{I_1 R_v}{I_2} \cdot \frac{w.t}{L} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

حيث إن الرموز المبينة في الشكل (3.3). ويتم القياس من درجة حرارة الغرفة وحتى درجة غليان سائل النيتروجين (77K).



شكل وابعاد عينة القياس واقطاب التوصيل B اجزاء الدائرة الكهربائية لقياس المقاومة A شكل (3-4)

### 3-4-3 قياسات التأثيرية المغناطيسية

توجد طرائق عديدة لقياس التأثيرية المغناطيسية للمواد اللامغناطيسية، ويمكن تصنيفها تاي نوعين: قياسات تعتمد على التيار المتناوب وأخرى تعتمد على التيار المستمر [6]. الطريقة الاولى هي المعتمدة في البحث وقد نفذت ببناء دائرة الالكترونية المبينة في الشكل (3.4). تتألف الدائرة الالكترونية من مكبر بمعامل كسب عالي ومستوى إشارة ضوضاء منخفضة. الاجزاء الرئيسية الاخرى في الدائرة هي مصدر إشارة متناوبة نوع hp 3311A يربط إلى ملفي المجال المتناوب.

عند عدم وجود العينة فإن المجال المتناوب يحدث على توليد تيار في ملف التحسس، بنفس الوقت فإن ملف المعادلة يتحسس نفس قيمة الاشارة، بيد إن طريقة ربط الملفين تكون متعاكسة فيلغي احدهما تأثير الاخر وتكون النتيجة أن فرق الجهد المتحسس عبر المكبر يساوي صفراً. أما عند وضع العينة في ملف التحسس تحدث ازاحة طورية (اعتماداً على الطبيعة المغناطيسية للعينة) ويعمل حينها المكبر على تحسس الفرق بين الاشارتين.

عند انتقال العينة إلى الحالة الفائقة التوصيل، اي إن  $X=-1$  بسبب تأثير مزنر، يحدث فرق في الطور بمقدار  $90^\circ$ . إن قيمة الاشارة المحسوسة عبر المكبر تعتمد على حجم المادة الفائقة التوصيل في العينة، لذا فإن قيمة التأثيرية يمكن الاستدلال منها على نسبة المادة فائقة التوصيل علاوة على تحديد درجة حرارة الانتقال الحرجة للعينة.

تتناسب التأثيرية المغناطيسية مع فرق الجهد المقاس عبر مكبر الدائرة الالكترونية ويمكن حسابها من خلال العلاقة الاتية [118]:

$$X = \frac{V_m}{L^* t 2\pi f H_{rms}} \dots\dots\dots (3.2)$$

حيث  $V_m$ : فرق الجهد المقاس عبر المكبر،  $L^*$ : الحث المتبادل بين الملف الابتدائي وملف التحسس والذي يساوي  $L^* = \Phi / N'I$  حيث  $N'$  عدد لفات الملف و  $I$  قيمة التيار بينما  $\Phi$ : تمثل قيمة الفيض المغناطيسي،  $t$ : سمك العينة،  $f$ : التردد المساوي  $100\text{Hz}$ ،  $H_{rms}$ : معدل شدة المجال المغناطيسي المتناوب المسلط ويساوي  $7960\text{A.m}^{-1}$ .

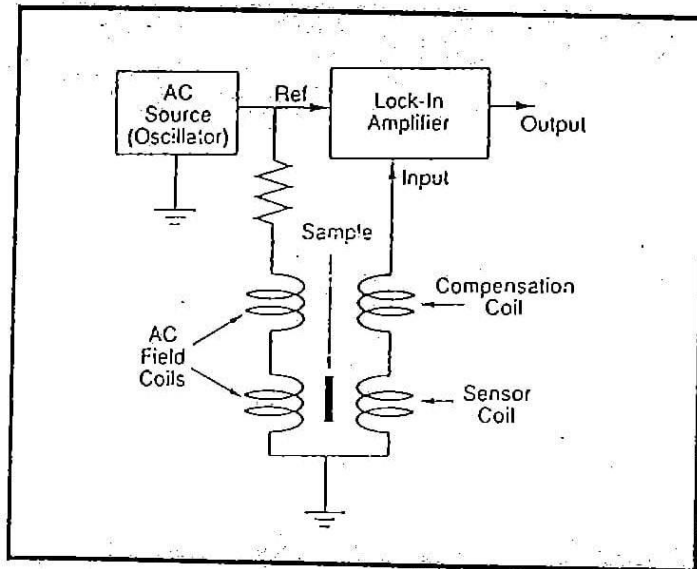


يلاحظ من المعادلة (3.2) إن قيمة التأثيرية المغناطيسية تتناسب طرديا وبشكل مباشر مع قيمة فرق الجهد المقاس عبر مكبر الدائرة الالكترونية، لذلك يمكن كتابة المعادلة بالشكل الاتي:

$$x = \text{const. } V_m \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

بسبب صعوبة ايجاد قيم الثوابت في المعادلة (3.2) فقد اعتمدت المعادلة بالصيغة (3.3) في ايجاد قيمة التأثيرية المغناطيسية بعد اجراء عملية معايرة لاستخراج قيمة الثابت في المعادلة أعلاه، اجريت عملية المعايرة باستخدام مواد مختلفة مثل فلز الالمنيوم والنحاس وعلى شرط إن حجم قطعة الفلز يكون مساوي تماما لقيمة حجم العينات المراد قياسها.

يمتاز منحنى التأثيرية المغناطيسية مقارنة بمنحنى المقاومة الكهربائية بوجود انتقال حادة تشير إلى التحول إلى الحالة الدايمغناطيسية المثالية لذا تعطي مقياسا دقيقا لدرجة الانتقال الحرج  $T_c$ .

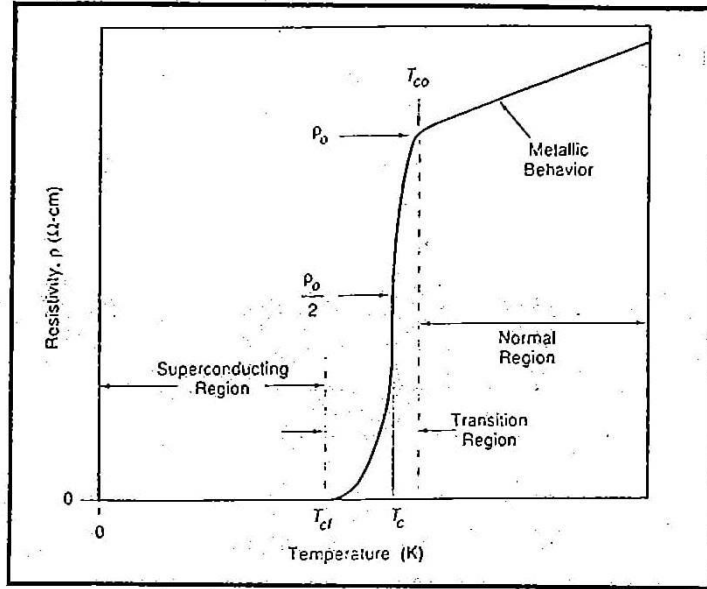


شكل (3-5) الدائرة الالكترونية لمقياس التأثيرية المغناطيسية

#### 3-4-4 تبين درجة حرارة الانتقال الحرجة $T_c$

إن السياق المتعارف عليه هو إن  $T_c$  تمثل ببساطة درجة حرارة الانتقال، تصح هذه الحالة عندما يكون عرض الانتقال ضيقا، وبخلاف ذلك يصبح تحديد قيمة  $T_c$  أكثر تعقيدا. في المواد السيراميكية الفائقة التوصيل يتراوح عرض المنطقة الانتقالية الانموذجية بحدود (2-10K)[6]. لذا تعرف  $T_c$  على أنها درجة الحرارة التي تقل فيها المقاومة إلى نصف قيمتها عند درجة

حرارة البدء  $T_{co}$  شكل (3.5). والتي تشير إلى النقطة التي يبدأ عندها الانتقال من الحالة الاعتيادية إلى الحالة الفائقة التوصيل. وإذا كانت المقاومة عند  $T_{co}$  تساوي  $\rho_0$  فأنها ستساوي  $\rho_0/2$  عند درجة حرارة الانتقال الحرجة  $T_c$ . درجة الحرارة الثابتة  $T_{cf}$  تمثل أعلى درجة حرارة تكون عندها المادة فائقة التوصيل بالكامل، أي إن المقاومة تساوي صفراً. يعرف عادة عرض الانتقال على أنه المدى الحراري الذي تتراوح فيه قيمة المقاومة بين 10% و 90% من قيمة  $\rho_0$ . تمتلك العينات ذات النقاء العالي عرض انتقال ضيق وعلى العكس من ذلك فإن عرض الانتقال الكبير يشير إلى إن المادة تحوي شوائب أو أطوار فائقة توصيل متعددة تمتلك كل واحد منها درجة حرارة حرجة مختلفة.

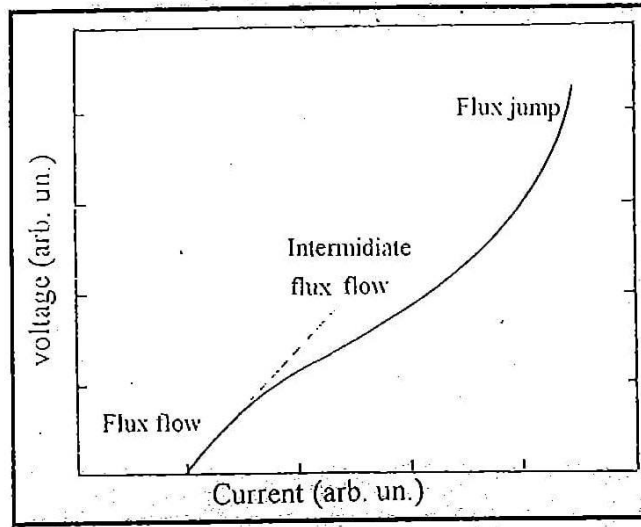


على منحنى المقاومة - درجة الحرارة TC شكل (3-6) تعيين درجة حرارة الانتقال الحرجة

### 3-4-5 مقاومة انسياب الفيض

تعد مقاومة انسياب الفيض إحدى الخصائص المهمة للموصلات الفائقة والتي تعطي مؤشراً جيداً للسلوك المغناطيسي للدوامات في الحالة المختلطة أي عند قيم مجال مغناطيسي تتراوح بين قيمة المجال الحرج الأدنى  $H_{c1}$  وقيمة المجال الأعلى  $H_{c2}$ ، ومنها يمكن الاستدلال على مدى الاعاقة الناشئة لحركة الدوامات في الموصل الفائق، علاوة على ذلك فهي تعطي مؤشراً لنقاء المادة وخلوها من الشوائب الطورية والكيميائية الاعتيادية (أي الغير فائقة التوصيل)، علاوة على ذلك فهي تعطي مؤشراً لنقاء المادة وخلوها من الشوائب الطورية والكيميائية الاعتيادية (أي الغير فائقة التوصيل)، يمكن حساب مقاومة انسياب الفيض من خلال رسم العلاقة بين قيمة التيار

المر في العينة وقيمة الجهد، وكما موضح في الشكل (3.6)، يمكن تمييز ثلاث مناطق واضحة على منحنى خصائص تيار-فرق جهد، المنطقة الاولى تمتاز بأرتفاع طفيف وهي تشير إلى منطقة انسياب، تتبعها منطقة اخرى أقل انحدارا وتمثل منطقة انسياب الفيض الوسطية، أما المنطقة الثالثة فتمتاز بارتفاع حاد وتمثل مايسمى بمنطقة قفز الفيض flux jump. تحسب مقاومة انسياب الفيض من العلاقة (9-2) على شرط إن القياس يتم دون درجة حرارة الانتقال الحرجة  $T_c$ .



شكل (3-7) حالة انسياب الفيض الانموزجية للمركبات الفائقة السيراميكية

استعمل في هذا القياس نفس العينات المستخدمة في تقنية المجسات الاربعة، وقد أجري القياس على العينات عند درجة حرارة اقل من درجة حرارة الانتقال الحرجة  $T_{co}$ . قيست قيمة التيار في الحالة المختلطة وعند تبريد العينة بوجود مجال مغناطيسي ثابت ( $\approx 20\text{mT}$ ) يجهز من ملف حلقي مكون من 20 لفة ويحوي قلب من مادة الفولاذ السيليكوني silicon steel، ويوضع الملف بحيث يكون اتجاه المجال عمودي على العينة. إن تبريد العينة تحت قيمة مجال مغناطيسي صغيرة تسبب وجود خطوط فيض ذوات كثافة منخفضة وبالتالي تقليل التفاعل بين الدوامات [100].

### 3-4-6 كثافة التيار الحرج

يتطلب ايجاد قياس كثافة التيار الحرج  $J_c$  اعداد العينات بطريقة مختلفة عما هو عليه الحال مع قياسات المقاومة الكهربائية، إذ إن وجود أي مقاومة ولو ذات قيمة صغيرة في منطقة اتصال الاسلاك بالعينة قد تسبب ارتفاع درجة حرارة العينة بشكل مفرط وبالتالي انتقالها إلى الحالة

الاعتيادية او حتى انصهار المادة في منطقة الاتصال. يضاف إلى ذلك إن قيم التيار المار في الاسلاك تصل إلى قيم عالية جدا مما يسبب صعوبة اضافية في عملية حساب قيم التيار الحرج  $J_c$ .

اعتمدت قياسات خصائص تيار- فرق جهد لحساب قيمة التيار الحرج. يعتمد اجراء القياس على امرار تيار كهربائي في أقطاب التيار، شكل(3.3)، وقد استخدم لهذا الغرض جهاز قدرة مستمر نوع (MBM 4020) مع قياس فرق جهد نوع (hp 3468A)، وقد تم تبريد العينة عند درجة حرارة ثابتة 77K مع الحفاظ على درجة الحرارة ثابتة طيلة فترة القياس. أن المؤشر على قيمة التيار الحرج يمكن تحسسه من خلال ظهور فرق جهد عبر أقطاب قياس فرق الجهد، وقد اعتمد مقدار فرق جهد  $1\mu V/cm$  كمؤشر على تحول المادة إلى الحالة الاعتيادية وعندها تؤخذ قيمة التيار الحرجة  $I_c$  وتقسم على مساحة المقطع العرضي للعينة للحصول على قسمة كثافة التيار الحرج  $J_c$ .

## 3-5 القياسات التركيبية

### 3-5-1 قياسات الكثافة

اجريت قياسات الكثافة الحجمية كدالة لدرجة حرارة وزمن التلييد، وتم حساب الكثافة الحجمية  $\rho_B$  بحساب حجم وكتلة العينات. أما في الحالات التي يحصل فيها تشويه لأبعاد العينات فقد تم اللجوء إلى اعتماد طريقة الغمر immersion method والتي تتضمن قياس كتلة العينة وهي جافة ( $W_1$ ) وكتلة العينة المغمورة في الماء المقطر ( $W_2$ ) وكتلة العينة وهي مشربة بالماء soaked ( $W_3$ ) ويتم حساب الكثافة الحجمية بالعلاقة:

$$\rho_B = \frac{W_1}{W_3 - W_2} \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

حيث  $\rho_w$ : كثافة الماء ( $1 \text{ g/cm}^3$ )

وظفت قياسات الكثافة الحجمية كدالة لدرجة حرارة وزمن التلييد في حساب الانفعال الحجمي لوحدة درجة الحرارة ( $dp_B/\rho_B dT$ ) وحساب معدل التصلب ( $dp_B/\rho_B dt$ )، وقد تم تحقيق ذلك بحساب ميل المنحني للعلاقة بين  $\rho_B$  ودرجة حرارة التلييد وبين  $\rho_B$  وزمن التلييد على التوالي.

### 3-5-2 تحليلات البنية الدقيقة

للقوف على خصائص البنية الدقيقة للمركبات السيراميكية المعتمدة في البحث، ودراسة أثر التغيرات المختلفة مثل درجة الحرارة وزمن التلييد وضغط التشكيل، علاوة على تأثير الاحلال بعنصر البوتاسيوم، فقد أجريت تحليلات البنية الدقيقة باستخدام المجهر الضوئي العاكس نوع Metallux3 وبقدرات تكبير مختلفة تراوحت بين 1500-50 مرة.

ولدراسة تفاصيل البنية الدقيقة فقد أجريت التحليلات ايضاً باستخدام المجهر الالكتروني الماسح نوع Jeol JSM-6400، اذ تمت دراسة سطوح العينات والمقاطع العرضية لها بعد ترسيب طبقة رقيقة من الذهب (بحدود 250A) على السطوح المراد دراستها باستخدام منظومة ترذيد أيوني نوع JFC-1100.

### 3-5-3 تحليلات حيود الاشعة السينية

لتشخيص البنى الطورية المتكونة للمواد السيراميكية المعتمدة في البحث ودراسة التغيرات الحاصلة في أبعاد الشبكة البلورية طور استخدام جهاز حيود الاشعة السينية XRD نوع Phillips PW 1050 الذي يولد اشعة سينية بطول موجي 1.9728A من مصدر Fe-K $\alpha$  وقد اجري القياس بسرعة مسح 2 $^{\circ}$ 2 $\theta$ /cm ولمدى زاوي  $^{\circ}$ 65 ~  $^{\circ}$ 4 = 2 $\theta$ . يحدث الحيود لاي مستوي بلوري عندما يتحقق شرط براك Bragg's condition [2-4]:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} \dots\dots\dots (3.5)$$

حيث n: ثابت يمثل رتبة الحيود ويساوي 1،  $d_{hkl}$ : المسافة بين المستويات البلورية،  $\lambda$ : الطول الموجي للاشعة السينية،  $\theta$ : زاوية الحيود، (h,k,l): معاملات ملر Miller's indices للمستويات.

تعتمد العلاقة بين المسافة بين المستويات البلورية وثوابت الشبكة على نوع النظام البلوري قيد الدراسة، وكمثال تعطى العلاقة للنظام المعيني القائم orthorhombic بالمعادلة [119]:

$$\sin^2 \theta_{true} = \frac{\lambda^2}{4a^2} h^2 + \frac{\lambda^2}{4b^2} k^2 + \frac{\lambda^2}{4c^2} l^2 \dots\dots\dots (3.6)$$

حيث a, b, c: ثوابت الشبكة للنظام المعيني القائم.

تحسب القيم الدقيقة لثوابت الشبكة لأي نظام بلوري برسم قيم الثوابت لكل انعكاس تجاه دالة استقصاء extrapolation function تعتمد على نوع الجهاز المستخدم في القياس، ثم استقصاء قيم الثوابت الدقيقة عند  $\theta = 90^\circ$ . يشترط لتحقيق ذلك تقليل الأخطاء systematic errors باختيار دالة الاستقصاء المناسبة، وتقليل الأخطاء العفوية random errors من خلال رسم مستقيم يمر بالنقاط المأخوذة من التجربة.

تختلف قيم زاوية الحيود الحقيقية  $\theta_{\text{true}}$  عن القيم المأخوذة من القياس  $\theta_{\text{obs}}$  بسبب الأخطاء العديدة التي ترتبط بطبيعة القياس. لذا الفرق بين القيمتين يعطى بالعلاقة الآتية:

$$\sin^2\theta_{\text{obs}} - \sin^2\theta_{\text{true}} = D\delta$$

حيث D: ثابت الانسحاق drift constant وهو يعطى مقياساً لكل الأخطاء النظامية الحاصلة في القياس،  $\delta$ : داله الاستقصاء.

تم استخدام الطرائق التحليل العددي [120] لحساب قيم الثوابت البلورية اعتماداً على طريقة كوهين Cohen's method وباستخدام العلاقة الآتية كدالة استقصاء [119]:

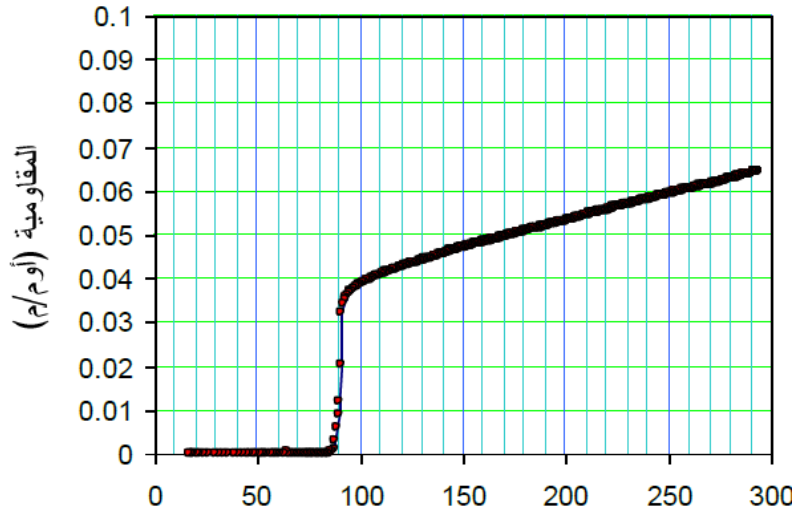
$$\delta = \cos^2\theta / \sin \theta \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

## الفصل الاول

### ( مواد فائقة التوصيل وتطبيقاتها )

#### مقدمة عامة:

إن ظاهرة التوصيلية الفائقة مثيرة من جميع جوانبها سواء ما يتعلق بدراستها أو ما يتعلق بتطبيقاتها. فسلوكها الكهربى (عدم المقاومة للتيار) وسلوكها المغناطيسى (رفض المجال المغناطيسى) وهما السمات البارزتان لها؛ جعلتا منها مواد ذات تطبيقات غير محصورة. فمن المعلوم أن مقاومة التيار الكهربى فى جميع المواد العادية هى السبب فى ضياع وفقد الكثير من الطاقة الكهربائية وهى السبب أيضاً فى عطل كثير من الأجهزة الكهربائية وارتفاع حرارتها. ومن جهة ثانية فالمجال المغناطيسى اعتاد على التغلغل فى جميع المواد العادية بدون استثناء. وأما المواد الفائقة فمقاومتها للتيار الكهربائى تصل إلى الصفر، وهو صفر غير مبالغ فيه من الناحية العملية، مع أن البعض ذكر أنه ربما توجد مقاومة فى حدود شكل 1. 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 مما سوف نتطرق إليه فى حينه.



الشكل (1-1) درجة الحرارة - كالفين

## تاريخ الموصلات الفائقة:

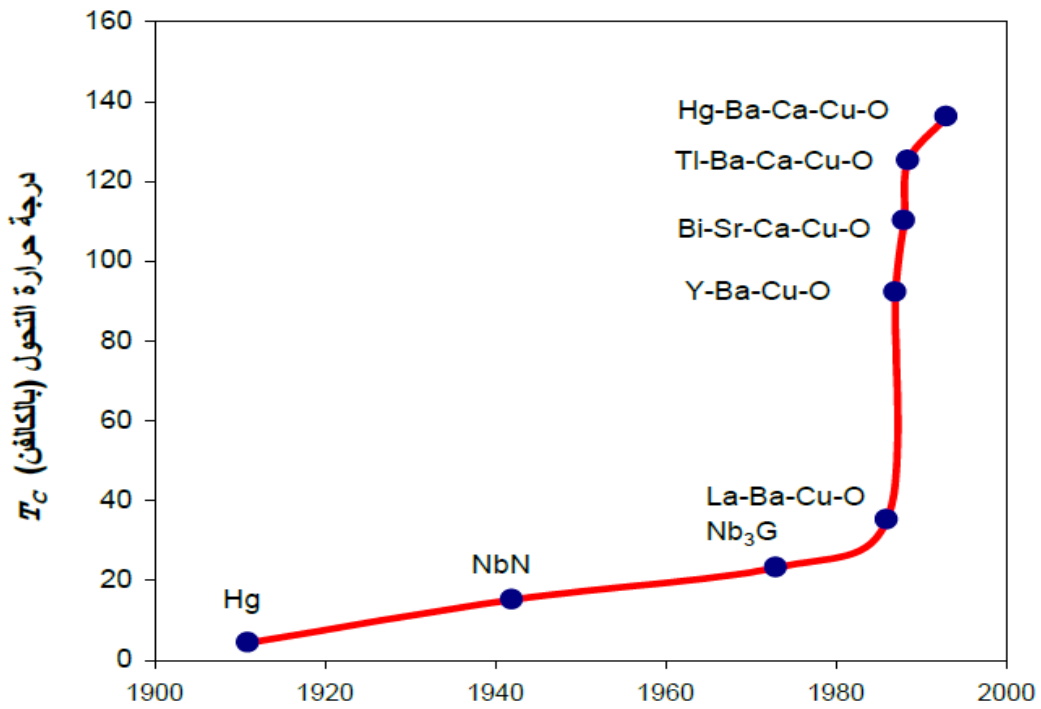
في عام ١٩٠٨ م نجح العالم الهولندي الشهير هيك كامرلين أونيس في ضغط ثم إسالة غاز الهليوم الذي يتحول من الحالة الغازية إلى السائلة عند درجة ٤,٢ كالفن (-٢٦٨ درجة مئوية) وبعدها بثلاث سنوات وأثناء دراساته على مقاومة بعض العناصر، لاحظ انعدام المقاومة لمادة الزئبق النقي عندما تقترب درجة حرارته من الصفر المطلق (A). 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 Nb<sub>3</sub>Ge.

وحصلت بعد ذلك قفزة متميزة في سجل المواد فائقة التوصيل عندما قام كل من جورج بندورز وكارل ميولار (J. George Bednorz and Kark Alex Muller) في عام 1986 بنشر 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 (B) 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 (C) والذي سرعان ما صار أساساً لعدة مركبات تلتها على الفور عندما التفت عدد ضخم من الباحثين وعلى طول العالم وعرضه إلى دراسة ذلك الجيل الجديد من المركبات يحدهم أمل كبير بالحصول على مركبات تتحول عند حرارة

وبعد سنة تقريباً تم اكتشاف مركب Bi-Sr-Ca-Cu-O ذي درجة التحول البالغة 110 درجات



كالفن (D) وبعده بقليل اكتشف مركب الثاليوم  $Tl-Ba-Ca-Cu-O$  والذي يفقد مقاومته الكهربائية نهائياً عند ١٢٥ كالفن (E) 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  $Hg-Ba-Ca-Cu-O$  : والذي يتحول عند ١٣٥ درجة كالفن (F) ولم تتم أية إضافة تذكر حتى يومنا هذا. وقد 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 أنظر شكل ٢.



الشكل (2-1) تاريخ الاستكشاف

وباكتشاف المركبات التي تفوق حرارتها ٧٧ درجة كالفن وهي درجة غليان النيتروجين؛ دخلنا عصرًا جديدًا من الموصلات وهو ما اصطلح على تسميته بالموصلات فائقة التوصيل عالية الحرارة High Temperature Superconductors واختصاراً بـ HTS في حين حملت الفئات السابقة لذلك التاريخ اسم: الموصلات فائقة التوصيل التقليدية Low Temperature Superconductors واختصاراً 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!

### أهمية خاصة للموصلات الفائقة عالية الحرارة:

- أنها سهلة التحضير ويستطيع جميع المهتمين بالحصول عليها ببسر.
- أنها رخيصة الثمن حيث أن أكبر مكوناتها هو النحاس والباريوم والكالسيوم وهي رخيصة ومتوفرة
- أنها تتحول فوق درجة غليان النيتروجين وهو رخيص الثمن ومتوفر في كل مكان وسهل النقل والحمل ويبقى لفترات طويلة مقارنة بسلفه الهليوم المسال.
- أن الفرق بين درجات تحولها ودرجة الوسيط المبرد (النيتروجين) كبير (في حالة مركبات الزئبق تفوق الخمسين درجة) مما يجعلها أكثر استقراراً حيث أن ذلك الاستقرار يزيد بتزايد الفرق بين درجة حرارة العمل ودرجة حرارة التحول. أنه يسهل تشكيلها بأشكال مختلفة مثل الرقائق والأفلام أو المواد المكسدة وكذا وحيدة التبلور.

### بعض تطبيقات المواد فائقة التوصيل:

#### •المواصلات: وفي القطارات على وجه الخصوص:

هل تستطيع تصور قطار يطير في الهواء كما تفعل الطائرة ويسير بسرعة كسرعتها؟ نعم إنه القطار الطافي. إن من شأن 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 وتسبيره بسرعات تزيد على 500 كم في الساعة.

#### •عجلات الطاقة:

عندما يدور قرص ضخمة الكتلة حول محوره فإنه يقال إن لديه طاقة حركية. ولديه الاستعداد للتخلي عن تلك الطاقة لصالح شئ آخر متى ما لزم الأمر. لقد تمت الاستفادة من هذه الفكرة في تخزين كمية كبيرة من الطاقة في عجلات ضخمة الكتلة تدور بسرعات عالية جداً وتحفظ في داخل كبسولات خاصة، استفيد منها ولوقت طويل في تحريك القطارات خاصة. غير أن المشكلة التي كانت تقابل دائماً هي أن الاحتكاك الداخلي يستمر في استنزاف الطاقة الحركية مع مرور الزمن. غير أن الاستفادة من ظاهرة الطفو المغناطيسي يجوز أن تمكننا من صنع عجلات دوارة في جو خال من الاحتكاك تماماً مما يجعلها تحتفظ بطاقتها إلى الأبد. وهكذا جميع الحركات والآلات يمكن أن تستفيد من الظاهرة في أن تكون لا احتكاكية مما يقلل الحاجة إلى كثير من الصيانة والأعطال ويجعل عمرها يتضاعف إلى عدة مرات.

### •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. وحتى تتصور المشكلة راقب ما يحصل لجهاز التلفاز عندما يتم تشغيل جهاز كهربائي يعتمد على التيار المتردد، إن الصورة سوف تصاب بالتشوش والسبب هو المجالات المغناطيسية المجاورة والتي أفسدت الجو على حركة الإلكترونات المهبطية التي هي المسؤولة عن الصورة. وهذا هو ما يحصل مع الرادار بالضبط غير أن الأخير أكثر حساسية بشكل كبير. 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. 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 الكشف غير الضار (R) (Non Destructive Testing NT) وللكشف 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 متكاملًا يمكن أن يحل محل الأجهزة المستخدمة حالياً ويفوقها من حيث الدقة. وقد تم بالفعل استخدام الكاشف عندما وضعت مجموعة كبيرة منها بشكل نصف كروي تغلف رأس المريض. وصل عددها السكويدات في المجموعة الواحدة إلى ٦٤ في بعض التجارب.

### تطبيقات أخرى:

عدد آخر من التطبيقات لم نتعرض له مثل الاستفادة من قدرات كواشف السكويد في الدراسات الجيولوجية والدراسات المتعلقة بالنفط والكشف عنه، وكذلك في دراسات تتعلق بقياس مغناطيسية المواد (القابلية المغناطيسية) (S) وأما تطبيقات وصلات جوزيف صن في الإلكترونيات فلو لم يكن منها إلا التغلب على التشتت والفقد التي تشكو منها تلك الأجهزة عندما يتم تصغيرها بشدة لكفاها. إن من شأن تلك المشكلة في الموصلات وأشباه الموصلات العادية أن تحد في نهاية المطاف من التردد الأعلى المسموح به في شرائح الحاسبات الآلية على سبيل المثال. ونحن نسمع كل يوم عن زيادة هائلة في سرعات تلك الحاسبات التي يتوقع لها أن تقف في يوم من الأيام بسبب المشاكل التي أشرنا إليها. إن استخدام وصلات جوزيف صن من شأنه أن يوفر سرعات مضاعفة دون التورط في مشاكل كتلك وبالتالي فمن الممكن أن تطلق للإنسان الحرية من جديد لكي ينطلق في تطوير أجهزته لتحقيق مزيداً من السرعات. على سبيل المثال فقد نجحت شركة فوجستو اليابانية في عام ١٩٩٠ في تصنيع شريحة تحتوي على ٢٠،٠٠٠ وصلة جوزيف صن وكانت سرعتها ١ جيجاهيرتز ١ GHz وهي تفوق السرعات العادية المتوفرة آنذاك بعشرات المرات ولا تستهلك إلا ١٢ ملي واط! أي أقل استهلاكاً للكهرباء من شرائح السليكون المشابهة بأكثر من سبعة آلاف مرة! وقد تم حديثاً (G) الحصول على شرائح تعتمد على تقنية التكميم الفردي السريع للمجال المغناطيسي (RSFQ) Rapid Single Flux Quantum للحصول على سرعات وصلت إلى ١٠٠ جيجاهيرتز ١٠٠ GHz وهي سرعات يستحيل نظرياً الحصول

عليها باستخدام التقنية القديمة، تقنية شرائح السيليكون أو الجرمانيوم. أيضاً تستخدم المواد فائقة التوصيل كمغناطيسات قوية جداً. والسبب في ذلك أن النوع الثاني منها Type II له قابلية على الاحتفاظ بكمية كبيرة من المجالات المغناطيسية حيث يشكل ما يشبه المصيدة عندما تمر من خلاله ثم تبريده بعد ذلك. وهي فكرة على بساطتها يمكن استخدامها للاحتفاظ بسجلات إلكترونية لشدات المجال المغناطيسي الأرضي في أماكن متعددة. حيث تؤخذ الموصلات إلى المكان المعين وعندما تتعرض للمجال يتم تبريدها بعد ذلك وتحتفظ بالمجال المسجل أثناء عملية التبريد إلى الأبد. كذلك يمكن استخدام الموصلات لصنع ملفات ذات تيار عال جداً مما يوفر مجالات مغناطيسية كبيرة (ربما عشرات التسلا) بسبب شدة التيار الهائل الذي يمر دون مقاومة والذي قد يزيد على ثلاثة آلاف أمبير للمليمتر المربع  $3000 \text{ A/mm}^2$  في المواد الجيدة. (G)

## ظواهر مواد فائقة التوصيل :

### ١- 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 شكل ٦. وأما في ظاهرة التعليق فيختلف الأمر في المبدأ الذي يعتمد عليه وهو أصعب كثيراً في شرح فكرته من مسألة الطفو. في هذه الحال يتم 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) فتصبح إيجابية (شمالية) فتتجذب لقطب المغناطيس الجنوبي. إنها قصة حب لم تكتمل! لقد أوقع المغناطيس الموصل في حباله أولاً ثم انسحب فلقق 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 ولصوقهما أخيراً. أما في حالة الموصل والمغناطيس؛ فنقل 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.

خاصيتان مميزتان للموصلات الفائقة لا يشاركونها فيهما أي مادة أخرى عرفها الإنسان. وسوف نتحدث عن فوائد هاتين الخاصيتين عند الحديث عن التطبيقات بعد قليل.

## ٢- ظاهرة (أو وصلات) جوزيف صن: Josephson Junctions

جوزيف صن أحد التلاميذ الإنجليز النابهين وكان طالباً في مرحلة الدراسات العليا عندما طلب الأستاذ من الطلاب القيام بمشاريع بحثية صغيرة. فخرج علينا هذا الطالب الذي صار بعد ذلك من أشهر العلماء وفاز بالمشاركة في جائزة نوبل في الفيزياء لعام ١٩٧٣، طلع علينا بظاهرة صارت تعرف باسمه. لقد تنبأ هذا العالم أنه عندما يتم وضع موصلين فائقين بجانب بعضهما بحيث لا يفصل بينهما إلا شريحة رقيقة جداً من مادة عازلة؛ فإن بعض الأزواج الإلكترونية تستطيع التملص Tunneling من خلال تلك الشريحة غير الموصلة (N). وقد تم تأكيد تنبؤاته بعد فترة وجيزة من خلال التجربة.

وبالطبع فهذه الظاهرة الكمية يمكن الاستفادة منها في عمل كثير من الدوائر الإلكترونية السريعة جداً كما في الحاسبات الآلية (P) وكذلك في صنع كواشف للمجالات المغناطيسية المتناهية في الصغر كما سوف نرى.

## ٣- ظاهرة التكميم المغناطيسي:

كما سبق فإن المواد الفائقة 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) فإن مقدار المجال المغناطيسي الذي يمر من خلال تلك الحلقة يجب أن يكون مساوياً تماماً لعدد صحيح من الكمات  $\phi$  المغناطيسية يطلق على كل منها الرمز  $\phi$  ويبلغ مقدار الكمة

الواحدة وتسمى أيضاً بالفلاكسويد (G) ومعنى التكميم أنه لو تعرض الموصل 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 تعرض لمجال يقل قليلاً عن عدد صحيح من الكمات بمقدار ضئيل (أقل من نصف كمة) فإنه يتكيف بحيث يكمل النقص من تلقاء نفسه! من أجل أن يحافظ 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 الظاهرة ذات أهمية بالغة جداً. فهي مبدأ ما صار يعرف بمجس السكويد Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) إن السكويد

(بسكون السين) عبارة عن جهاز حساس جداً للمجالات المغناطيسية وبإمكانه أن يميز التغير في

المجال المغناطيسي إذا زاد عن أي بحساسية تفوق ، بمعنى آخر يستطيع قياس مجال شدته تصل إلى 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 السكويد ينقسم إلى نوعين أساسيين حيث يعتمد الأول منهما على التيار المستمر-dc SQUID في حين يعتمد الآخر على التيار ذي التردد الراديوي . rf-SQUID وفي حين ينتشر استخدام الأول على نطاق واسع بصور أفلام رقيقة من المادة الفائقة يوضع بينها مواد عازلة من أجل توفير التملص الإلكتروني فإن النوع الثاني يعمل أيضاً من الأفلام الرقيقة أو بالاعتماد على فكرة عمل خرق أو أكثر في مادة موصلة فائقة تعمل على صورة قرص مثل حبة الأسبرين. وقد وجد أنه كلما زاد عدد الخروم زادت الحساسية تبعاً لذلك. ووجود خرم واحد يعني قياس المجال المغناطيسي مباشرة في حين أن وجود أكثر من خرم يعني قياس التغير (التدرج) في المجال المغناطيسي. والفكرة الأخيرة جعلت من المجس أهمية تطبيقية عالية، فهو لا يقيس المجال العام المتوافر، بل يقيس التغير مهما كان صغيراً. والأجهزة المعتمدة على مجس السكويد صارت متوفرة تجارياً وبأسعار منافسة ويقدمها عدد من الشركات العالمية.

#### ٤- نظرية الموصلات الفائقة:

في حين يصح القول بأن نظرية 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 ، أقول في حين يصح القول بأن تلك النظرية التي وضعت في عام ١٩٥٧ استطاعت أن تفسر معظم جوانب الموصلات الفائقة التقليدية (J)؛ فإنها بالتأكيد لم تستطع التغلب على الصعوبات التي واجهتها فيما يتعلق بالموصلات من الجيل الجديد، الموصلات الفائقة عالية الحرارة. لقد عجزت عن تفسير الظاهرة من أساسها، بل إنها كانت تتوقع استحالة الحصول على موصلات فائقة عند درجات عالية مثل ١٣٥ كالفن في حالة مركبات الزئبق. غير أن تلك الموصلات الجديدة حازت مزيداً من الاهتمام من جانب النظريين من العلماء دون التوصل إلى نظرية مرضية إلى يومنا هذا. ولذلك فإنها مازالت تحمل المزيد من التحدي العلمي و تعطي مثلاً للتخلف الشديد للنظرية عن التطبيق في هذا المجال. ففي حين نجحنا في جعل تلك الموصلات حقيقة قائمة؛ فإننا لم نستطع بعد فك طلاسمها. وكلما عكف



العلماء على وضع نموذج جديد؛ أصيبوا بضربة قوية من جانب التجريبيين الذين سرعان ما يعلنون عن مواد جديدة أو خواص جديدة.

في هذه المقدمة المختصرة؛ دعونا نلقي بعض الأضواء على نظرية BCS . 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 الشبكي 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 الشبكية والعيوب التي لا تخلو منها في العادة الموصلات العادية؟ والتي هي السبب وراء حصول المقاومة.

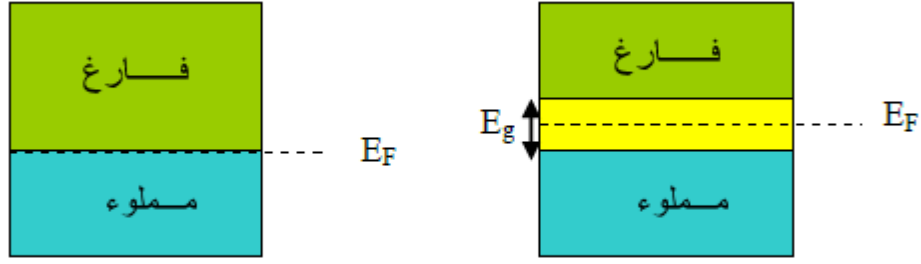
أهم أساس قامت عليه النظرية هو فكرة الأزواج الإلكترونية (Cooper Pairs) أو أزواج كوبر نسبة إلى العالم كوبر أحد المؤسسين. ومن المعلوم أن الإلكترونات تحمل ذات الشحنة وبالتالي فحسب قانون كولوم يفترض أن تتنافر عن بعضها قدر المستطاع. إلا أن الظروف المواتية تعكس نتيجة القانون بميكانيكية خاصة لوحظت بسبب اعتماد 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 لا بد وأنها تتفاعل بطريقة أو أخرى مع الشبكة 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 إلكترونات أخرى إليها. وبهذه الطريقة يظل الجو مهيناً 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  $2e$ —ولفياً مغزلياً مساوياً للصفير حيث أن أحد الزوجين لفة إلى أعلى (+)  $2/1$  (والآخر لفة إلى أسفل (-)  $2/1$ ) 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 لفةها 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 الصفير؛ 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 الشبكة لا تؤثر في حركتها على الإطلاق وبالتالي فهي تتحرك دون مقاومة. ومن العجيب أن تلك الشبكة 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  $E_g$  هي ميزة خاصة بالموصلات الفائقة لا يشاركتها فيها غيرها، أنظر الشكل ٣. حيث تتكون فجوة في الطاقة بين الحالات المملوءة تماماً بالإلكترونات وبين الحالات الفارغة تماماً قيمتها في حدود  $1 \text{ meV}$ . 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:

$$E_g = 3.53kT_c$$

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 فعلياً أن نوفر موصلات بطاقات فجوة كبيرة. وقد اتفقت تلك المعادلة مع النتائج التجريبية للمواد الموصلة الفائقة التقليدية.



الشكل (3-1)

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

$$H_c(T) = H_c(0) \left[ 1 - a \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

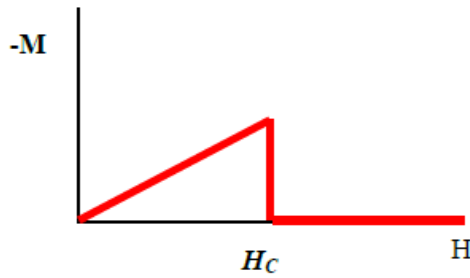
حيث تعبر  $T$  عن درجة الحرارة و  $H_c(0)$  عبارة عن المجال الحرج عند الصفر المطلق. وهي مفيدة في حساب المجال الحرج الجوهري غير المتعلق بالشوائب والأخلاط لأن من شأن تلك الأمور أن تؤثر ظاهرياً في قيمة المجال الحرج.

#### ٥- طرد المجال المغناطيسي من داخل الموصلات الفائقة:

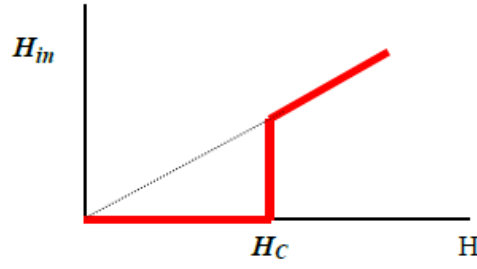
من أهم ميزات الموصلات الفائقة قدرتها على طرد المجالات المغناطيسية من داخلها أو من الوسط الذي تحتويه. والمسألة يمكن النظر إليها بالصورة التالية: عندما يتعرض موصل ما (من النوع الدينامغناطيسي) إلى مجال مغناطيسي خارجي فإن ذلك الموصل يحاول التخلص من المجال باستحداث تيارات كهربائية تُلغ حول سطحه تسمى بالتيارات السطحية. ومن المعلوم أن التيار الكهربائي 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 كهربائية وبالتالي فلديها القدرة على الاستجابة التامة لشدة التيار الخارجي؛ فتزيد زيادته وتقل بنقصانه بحيث توجد مجالات تتساوى معه بالضبط وتضاده في اتجاهها فيسلم جرم الموصل من المجال الخارجي حسب المعادلة التالية:

$$M = -H$$

حيث تمثل الـ  $M$  التـمغـنـط (المجال المغناطيسي المضاد) وتمثل  $H$  المجال الخارجي المطبق. و من إشارة السالب ندرك أن التـمغـنـط 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، أنظر شكل ٤ ، 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.

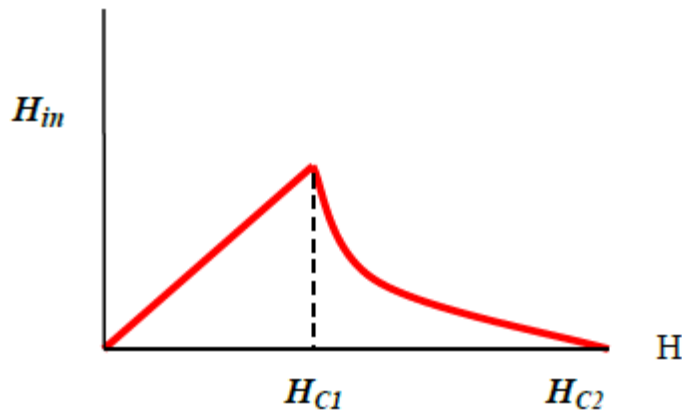


الشكل (4-1)

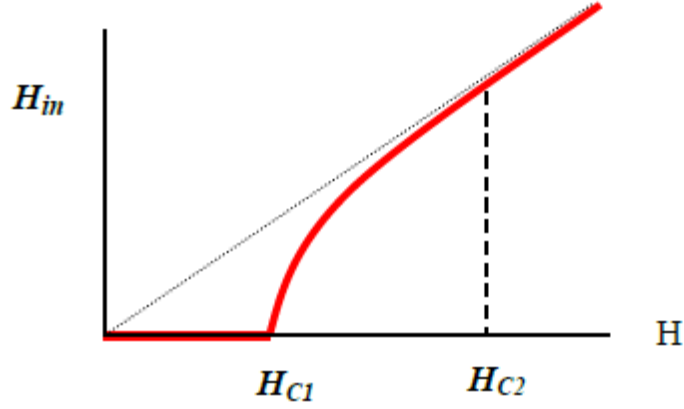


الشكل (5-1)

وأما الموصلات من النوع الثاني فهي مختلفة تماماً. إن لديها مجالان مغناطيسيان حرجان. فعند وصول المجال الخارجي إلى المجال الحرج الأول  $H_{C1}$ ، 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 .  $H_{C2}$  . 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. أنظر شكل ٥

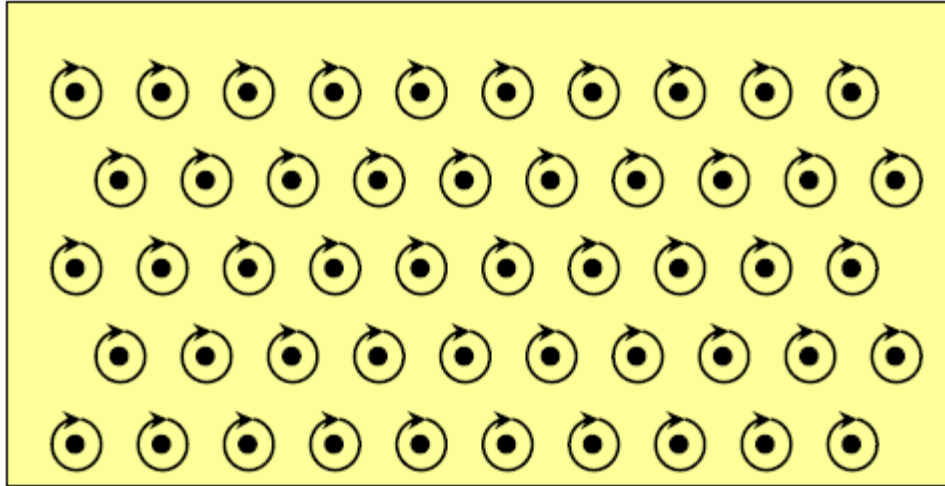


شكل (6-1)



شكل (7-1)

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 بوحدة. 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 .



الشكل (8-1)

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 180 dB.

خصائص التوصيل الفائق:

## ١- خواص الموصلات الكهربية الفائقة

### Superconductor Properties

#### ١-١ درجة الحرارة الحرجة ( $T_c$ ) Critical Temperature

عند انخفاض الدرجة الحرارية لبعض المواد فإنها تفقد مقاومتها للتيار الكهربائي وان تلك الحالة تدعى حالة التوصيل الكهربي الفائق، والدرجة الحرارية التي تتحول فيها المادة من الحالة الاعتيادية إلى حالة التوصيل الفائق، تدعى بالدرجة الحرارية الحرجة ويرمز لها ( $T_c$ ). وتختلف هذه الدرجة من مادة إلى أخرى [7,8].

#### ٢-١ المجال المغناطيسي الحرج ( $B_c$ ) Critical Magnetic Field

تتمثل الخاصية الأساسية الثانية للمادة فائقة التوصيل الكهربي بقدرة مقاومتها الكهربية على أن تعود مجدداً، وذلك عندما يسلط عليها مجال مغناطيسي ذا قيمة اكبر من القيمة الحرجة  $B_c$  (حتى وإن كان مقدار قيمة درجة الحرارة أقل من القيمة الحرجة  $T_c$  لها). ويعتمد مقدار المجال الحرج  $B_c$  على نوعية المادة ودرجة الحرارة الحرجة، حيث تتحول المادة من الحالة ذات التوصيل الفائق إلى الحالة الاعتيادية [3,9,10].

### ٣-١ التيار الحرج ( $I_c$ ) Critical Current

حاول اونيس أن يمرر تيارات كبيرة في الموصلات الفائقة حتى يحصل على مجالات مغناطيسية ضخمة، إلا انه أدرك بسرعة أن المجالات المغناطيسية الداخلية التي تنشئها هذه التيارات هي التي ستصبح معها الموصلية الفائقة مستحيلة [6]. إذ إن تحطيم ظاهرة التوصيل الكهربيائي الفائق بواسطة المجال المغناطيسي يحد من القيمة العظمى للتيار الذي يمكن إرساله خلال المادة، وهي في حالة التوصيل الكهربيائي الفائق. وبذلك فان انعدام خاصية التوصيل الكهربيائي الفائق لا يقتصر فقط على تسليط مجال مغناطيسي مناسب،