



جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
كلية الكوت الجامعة
مركز البحوث والدراسات والنشر
بالتعاون مع جمعية الليزر العراقية



المواد فائقة التوصيل الكهربائي

واستخداماتها الصناعية

Superconducting materials and their industrial uses

ISBN: 978-9922-612-34-8

تأليف

- أ.م.د. قاسم مهدي وادي / كلية المأمون الجامعة / قسم هندسة تقنيات القدرة الكهربائية
د. طالب زيدان تعبان الموسوي / الجامعة المستنصرية / كلية الكوت الجامعة / جمعية الليزر العراقية
أ.د. كريم علي جاسم الساعدي / كلية ابن الهيثم / جامعة بغداد / قسم الفيزياء
م.د. حيدر صاحي حسين عمار الخراعي / وزارة التربية / الكلية التربوية المفتوحة

الطبعة الأولى / 2021

منشورات

مركز البحوث والدراسات والنشر
كلية الكوت الجامعة



٣١ / ٦٢١

و ٢٤٩ وادي . قاسم مهدي .

المواد فائقة التوصيل الكهربائي واستخداماتها
الصناعية / قاسم مهدي وادي . طالب زيدان .
حيدر صاحب حسين . كريم علي جاسم الساعدي
.. بغداد : مطبعة الرفاه . ٢٠٢١ .
٢٧٢ ص ٢٤٠ . سم .

١- الكهرباء - توليد . أ . زيدان . طالب (م.م) . ب . حسين .
حيدر صاحب (م.م) . ج . الساعدي . كريم علي (م.م) .
م . و .
د . العنوان

١٥٢٤ / ٢٠٢١

المكتبة الوطنية / الفهرسة اثناء النشر

رقم الايداع في دار الكتب والوثائق ببغداد

١٥٢٤ لسنة ٢٠٢١ م

مطبعة الرفاه
07902823204

المقدمة (Introduction)

تصنف المواد من حيث توصيليتها الكهربائية، الى مواد موصلة , وشبه موصليه و عازلة، حيث اعتمد هذا التصنيف اساسا على الطبيعة التركيبية للمادة، وكذلك مدى قوة ارتباط الكترونات ذراتها بالنواة، وهناك نوع اخر من المواد الذي كان له تأثير كبير في جذب انتباه الباحثين المختصين في فيزياء الحالة الصلبة وهو ما يسمى بالمواد فائقة التوصيل (Superconducting Materials), والتي شهدت تطبيقات علمية وصناعية كثيرة في العديد من المجالات والخدمات التي شكلت ثورة صناعية في جميع المجالات. ومن خلال البحث والاكتشاف عن مواد جديدة لأغناء المتطلبات والتطورات التي يحتاجها الانسان بكلفة قليلة ونوعية جيدة وبفترة قليلة. ومن بين هذه الاكتشافات التي تمتاز بأهميتها الكبيرة، هي المواد فائقة التوصيل، ان البحث في هذا النوع من المواد هدفه الحصول على مواد تساعد على صناعة اجهزة ومعدات ذات نوعية جيدة، وكلفة قليلة، وكفاءة عالية، لتوسيع القاعدة المعلوماتية في علم المواد التي من شأنها ان تحسن من التطبيقات التكنولوجية والهندسية للمواد. ان المواد فائقة التوصيل تعد واحدة من المواد الواعدة جداً في تطبيقات الاداء الكهربائي والالكتروني العالي. ان اكتشاف المركبات السيراميكية فائقة التوصيل ذات درجات الحرارة العالية (HTSC) قد فجرت الشرارة الاولى لثورة جديدة في علم تكنولوجيا المواد والتطبيقات الصناعية. ان دراسة عمليات الاستبدال وطرائقها او اضافة العناصر ممكن ان يعطينا أملاً ويفتح لنا افاقاً أكثر في فهم الآليات التي تحدث عندها

التوصيلية الفائقة في العناصر والمركبات وخصوصا تلك التي تعتمد في تركيبها على اوكسيد النحاس (Cuprates). وعلى الرغم من البحوث العديدة التي تناولت عمليات الاستبدال والإضافة إلا انه لم يتم التوصل الى منهجيات وآليات محددة ممكن اتباعها في عمليات اضافة العناصر واستبدالها في مثل هذا النوع من المواد حتى الان , ومن هذا المنطلق جاء الحافز والدافع في اعداد هذا الكتاب من خلال جهدنا المتواضع هذا متمنين تحقيق الهدف ان شاء الله. لقد كان ومازال لمفهوم فائقية التوصيل الامل النافذ في التكنولوجيا والتقدم نحو استخدام الاساليب والطرائق التي من شأنها ان تخفف من استهلاك المواد والطاقة، وهي التي تم اكتشافها في عام ١٩١١ من قبل العالم الهولندي كامير لوك اونيس من خلال دراسته للخواص الكهربائية لعنصر الزئبق (Hg) والذي لاحظ اختفاء المقاومة الكهربائية عند درجة حرارة تقترب من الصفر المطلق , ثم بعدها بعام واحد اكتشف اونيس ان تطبيق حقل مغناطيسي قوي بما فيه الكفاية يمكن ان يعيد قيمة المقاومة الى قيمتها الطبيعية , بالإضافة الى خاصية فقدان المقاومة النوعية ($\rho=0$)، وفي عام ١٩١٣ وجد ان عنصر الرصاص (Pb) هو ايضا فائق التوصيل عند درجة حرارة اكبر بقليل من درجة الحرارة الحرجة للزئبق, وفي عام ١٩٣٠ اكتشف ان درجة الحرارة الحرجة للنوبوميوم (Nb) أعلى من كل من الزئبق والرصاص وقد سجلت كأعلى درجة حرارة انتقال بين كل العناصر المعدنية آنذاك. هنالك خاصية اخرى مميزة للمواد فائقة التوصيل وهي انها تكون مواد ديامغناطيسية تماما وهذا تم اكتشافه من قبل الباحثين مازنر و اوخنسفيدل في

عام ١٩٣٣ م واللذين لاحظا فيه ان مجالا مغناطيسيا ضعيفا يطرد من الموصل فائق التوصيل عندما يتم تبريده الى درجة حرارة معينة , وسمي هذا التأثير بتأثير مازنر اوخنسفيد، والذي يحصل متى ما وجد حقل مغناطيسي قوي بما فيه الكفاية للتغلب على قوى الجاذبية. وبالمثل فان خط انتقال التوصيلية الفائقة ممكن ان يقود الى الحالة الطبيعية من المادة بوساطة تيار كهربائي كبير بما فيه الكفاية، والذي يحصل فيه الانتقال بشدة. تعرف ظاهرة التوصيلية الكهربائية الفائقة و هي ظاهرة فيزيائية كهربائية تحصل عند تناغم ظروف معينة من حيث درجة الحرارة وكثافة التيار والمجال المغناطيسي آنياً وتحت التبريد الشديد والذي يوفر مساراً سريعاً ومثاليا لانتقال حاملات الشحنة بعيدا عن اي اعاقاة او عرقلة داخل المادة. من المعلوم ان مصدر المقاومة الكهربائية في المعادن هو تصادم الالكترونات الحرة سواء مع الشبكة البلورية او مع العيوب والشوائب، اذ يؤدي ذلك الى استقرار المقاومة على قيمة دنيا لا تتعلق بدرجة الحرارة، ان الذي يؤشر على وجود المقاومة هو تغير اتجاه الالكترون بعد كل تصادم. اما في حالة التوصيل الفائق فان الالكترونات تتربط فيما بينها لتشكل ازواجا من الالكترونات , وان تشكيل هذه الازواج يعمل على خفض طاقة هذه الالكترونات. علما انه في المواد المعدنية الاعتيادية تنخفض المقاومة بصورة تدريجية مع انخفاض درجات حرارة. وان الشوائب الموجودة في المواد الموصلة مثل الفضة والنحاس هي التي تعرقل وتعاكس الوصول الى ادنى حد من المقاومة في درجات الحرارة المنخفضة , اما في حالة التوصيل الفائق فان اهم

ما يميز المواد فائقة التوصيل هو الانخفاض المفاجئ في قيمة المقاومة اذ تنخفض قيمتها وبصورة سريعة ومفاجئة الى الصفر عندما يتم تبريد المادة الى درجة حرارة اقل من درجة حرارتها الحرجة , حيث تتصرف الالكترونات في المواد فائقة التوصيل بطريقة مختلفة جدا عن تلك الموجودة في المعادن العادية , اذ تنتقل ازواج الالكترونات عبر تلك المواد مع بعضها البعض الامر الذي يتيح لها التحرك بسهولة من طرف الى اخر مشابهة بذلك حركة السيارات المتميزة بأولوية العبور لطريق مزدحم وسريع حيث يكون للالكترونات المتزاوجة مسار خاص داخل المادة من دون ان تعاني أي تصادمات مع نوى الذرات , في حين تبقى الالكترونات المنفردة عالقة بالزحام حيث تعاني من مقاومة عالية بسبب تصادماتها المستمرة مع الذرات مما يجعل حركتها داخل المادة محاطة بالتصادمات الكثيرة. ان اغلب المواد التي تسلك سلوك التوصيل الفائق عند تبريدها بواسطة الهليوم السائل او النتروجين السائل , وان درجة الحرارة التي تتحول فيها المادة الى حالة التوصيل الفائق تسمى بدرجة الحرارة الحرجة (T_c) وكثافة التيار، تسمى بكثافة التيار الحرج (J_c) والمجال المغناطيسي يسمى بالمجال المغناطيسي الحرج (H_c Critical). وان اي اختلال في اي عامل من هذه العوامل الفيزيائية الحرجة فانه يسبب تثبيطا وهدم لظاهرة التوصيل الفائق في المادة. ان للمواد فائقة التوصيل صفات كهرومغناطيسية مهمة جدا سواء فيما يتعلق بخواصها او تطبيقاتها من حيث ان سلوكها الكهربائي (فقدان

المقاومية الكهربائية) وسلوكها المغناطيسي طرد المجال المغناطيسي هما السمتان البارزتان واللتان جعلت منها مواد ذات تطبيقات علمية وتكنولوجية واسعة , ومنها دخولها في مجال تطبيقات الطاقات المتجددة والقديمة حيث انها تعمل على خفض مقدار الضياع بالطاقة وبشكل كبير جدا , ان معظم الضياع الذي يحدث بالطاقة هو بسبب المقاومة الكهربائية للتيار والمجال الكهربائي الذي اعتاد على التغلغل في المادة ، ولهذا فان المواد فائقة التوصيل تعد مهمة لتكون الامل الكبير لمستقبل تكنولوجي خال من هدر الطاقة. وعلى الرغم من حقيقة ظاهرة التوصيل الفائقة كظاهرة فيزيائية وعلمية بارزة في وقتنا الحاضر, الا اننا مفتونون بها كونها تمثل لغزا علميا كبيرا يعطي افاقا واسعة وافكار لا متناهية في عملية التفكير والبحث للوصول الى ادق واقرب التفسير العلمية لحقيقة حصولها داخل المادة، ومع تواصل المحاولات ودراستها من اجل الحصول على مواد فائقة التوصيل في درجة حرارة الغرفة (300K) ولكنها غير مستحيلة . تؤدي درجة الحرارة المرتفعة نسبيا الى تدمير الروابط بين الالكترونات المكونة للأزواج فائقة التوصيل لتعود بذلك المادة الى حالتها الطبيعية وتنشأ احدى التحديات الكبرى في هذا المجال عن حقيقة لم يتم الوصول الى تفسيرها لحد الان. ان قليل من هذه الروابط بين الالكترونات في الأزواج فائقة التوصيل تم تفسيرها . وتعد ظاهرة التوصيلية الفائقة هي الظاهرة الاهم, حيث بعد اكتشافها لأول مرة بدأت الاستعمالات والاستثمارات التجارية لها , وفي فجر القرن العشرين شكلت التوصيلية الفائقة قاعدة للمنتجات الصناعية التي حولت وغيرت اقتصادنا وحياتنا اليومية. تم إعداد هذا الكتاب

من اجل اغناء المكتبة العربية والعراقية ببعض المعلومات عن ظاهرة التوصيل الكهربائي الفائق/ متأملين استفادة القارئ العربي منها. ان تاريخ فرط التوصيل الكهربائي كظاهرة فيزيائية غني جدا لما تتضمنه من العديد من الاحداث والاكتشافات، ألا ان المؤلفين لم يقدموا الشرح العلمي الذي يغطي كل الاحداث والتطورات التي مرت بها هذه الظاهرة، تضمن هذا الكتاب عشر فصول، الفصل الاول من هذا الكتاب تضمن نبذة تاريخية عن الموصلية الفائقة , وتطرق الفصل الثاني الى انواع عناصر التوصيلية الفائقة والفصل الثالث يشرح انواع الموصلات الفائقة اما الفصل الرابع فيحتوي على الجوانب التركيبية الاساسية للموصلات الفائقة والفصل الخامس يقدم طرق تحضير المواد فائقة التوصيل والفصول السادس والسابع والثامن تتناول شرح الخوص الكهربائية والمغناطيسية والثرموداينميكية (الفيزيائية) والفصل التاسع يوجز النظريات والفرضيات لتفسير ظاهرة الموصلية الفائقة ويبين الفصل العاشر الاستخدامات او التطبيقات الصناعية للموصلات الفائقة . متأملين ان يساهم هذا الكتاب في تبسيط مفهوم الموصلية الفائقة والتي هي جزء من العلم والمعرفة في مجال فيزياء المواد وتطبيقاتها الهندسية.

المؤلفون

قائمة المحتويات

رقم الصفحة	الموضوع
٦-١	المقدمة
٢٨-١٣	الفصل الاول: نبذة تاريخية عن نشوء وتطور الموصلية الفائقة
١٣	١-١ المقدمة (Introduction)
١٣	٢-١ النشوء والتطوير (Implementation and Review Development)
٢٥	٣-١ درجة الحرارة الحرجة (T_c Critical Temperature)
٢٧	٤-١ كثافة التيار الحرج Critical Current Density (J_c)
٤٩-٢٩	الفصل الثاني: عناصر التوصيل الفائقة
٢٩	١-٢ المقدمة (Introduction)
٣١	٢-٢ تقنيات الموصلية الفائقة (Superconducting Technology)
٣٣	١-٢-٢ الموصلية فائقة البحث (inducing Superconducting)
٣٤	٢-٢-٢ الموصلية الفائقة بواسطة الضغط: (Superconductivity under Pressure)
٣٤	٣-٢-٢ حدوث التوصيلية الفائقة (Occurrence of Superconductivity)
٣٦	٣-٢ عناصر الموصلية الفائقة (Superconductivity Elements)

٧٤-٥٠	الفصل الثالث أنواع (تصنيف) الموصلات الفائقة (Types of superconductors)
٥٠	١-٣ المقدمة introduction:
٥١	٢-٣ الموصلات الفائقة النوع (Type-١) Superconductors)
٥٥	٣-٣ الموصلات الفائقة نوع-٢ (Type-٢) Superconductors)
٧١	٤-٣ الاختلاف بين الموصلات الفائقة النوع الاول والثاني The Difference between Superconductor type-1 and type-2
١٠٩-٧٥	الفصل الرابع الجوانب التركيبية الأساسية للكوبريت ذي درجة الحرارة الحرجة T_c العالية (Basic Structural Aspects of High T_c Cuprates)
٧٥	١-٤ المقدمة (Introduction):
٧٦	٢-٤ الأوكسيدات الفائقة التوصيل (Superconducting Oxides)
٨٢	٣-٤ منظومة La-M-Cu-O (La-M-Cu-O System)
٨٥	٤-٤ منظومة YBCO(١٢٣) (YBCO(١٢٣) System)
٨٩	٥-٤ منظومة Bi Sr Ca Cu O (Bi Sr Ca Cu O system)
٩١	٦-٤ منظومة Tl Ba Ca Cu O (Tl Ba Ca Cu O System)
٩٢	٧-٤ تراكيب البيروفسكايت Perovskite Compositions
٩٦	٨-٤ التركيب البلوري للنظام فائق التوصيل (HBCCO)

٩٩	٩-٤ التركيب البلوري للنظام فائق التوصيل (BBCCO)
١٠٣	١٠-٤ التركيب البلوري للنظام فائق التوصيل (BSCCO)
١٦٣-١١٠	الفصل الخامس: طرق تحضير المواد فائقة التوصيل الكهربائي Conduction Material Preparation Methods
١١٠	١-٥ المقدمة (Introduction)
١١١	٢-٥ (Apparatus) الأجهزة
١١١	٣-٥ التحضير (Preparation)
١١٤	٣-٥ طريقة تفاعل الحالة الصلبة Solid State Reaction Method
١١٨	٤-٥ طريقة الصول - جل
١٢٣	٥-٥ طريقة الترسيب الليزر (PLD)
١٣٠	٦-٥ طريقة تحضير مركب $HgBa_2Ca_xLa_xCu_2O_{8+\sigma}$
١٧٠-١٦٤	الفصل السادس الخواص الكهربائية Electrical Properties
١٦٤	١-٦ المقدمة Introduction
١٦٤	٢-٦ المقاومة النوعية للمعادن الاعتيادية (Normal Metal Resistivity)
١٦٧	٣-٦ المقاومة النوعية للموصلات الفائقة (Superconductors Resistivity)
١٦٩	٤-٦ تأثير جوزيفسون (Effect Josephson)
١٧٠	٥-٦ ظاهرة جوزيف (Joseph Phenomenon)

١٧١-١٨٠	<p>الفصل السابع الخواص المغناطيسية</p> <p>Magnetic Properties</p>
١٧١	١-٧ المقدمة Introduction
١٧١	٢-٧ العلاقة بين درجة الحرارة الحرجة (T_c) وكثافة التيار الحرج (J_c) وشدة المغناطيس الحرج (H_c):
١٧٤	٣-٧ ظاهرة الطفو (التعليق) (Floating Phenomenon)
١٧٥	٤-٧ ظاهرة التكميم المغناطيسي (Magnetic Quantum Phenomenon)
١٧٥	٥-٧ عمق الاختراق Depth Penetration
١٧٧	٦-٧ المجال المغناطيسي الحرج Critical magnetic field (H_c)
١٧٨	٧-٧ تأثير مازنر Meissner Effect
١٨١-٢١١	<p>الفصل الثامن: الخواص الفيزيائية و(الحرارية) والثرموديناميكية</p> <p>Heating and Physical Properties</p>
١٨١	١-٨ المقدمة Introduction
١٨١	٢-٨ انتقال الحرارة Transport Heat
١٨٢	٣-٨ طول التشاكة (ξ) (Length Coherence)
١٨٤	٤-٨ تأثير الضغط (Effect Pressure)
١٨٥	٥-٨ تأثير النظير (Effect Isotopic):
١٨٦	٦-٨ فجوة الطاقة (Gap Energy)
١٩١	٧-٨ الفجوة الكاذبة (Pseudo gap)
١٩٤	٨-٨ التحريكيات الحرارية للانتقانات فائقة التوصيل (طاقة جيس)

	Thermodynamics of Superconducting Transitions
١٩٦	٨-٩ اختلاف الانتروبي والحرارة النوعية Entropy Difference and Specific Heat
١٩٧	٨-١٠ انتقال تحول الطور Transition Phase
٢٠٠	٨-١١ تشكيل الطور (Bi-٢٢٢٣) phase Formation of (Bi-٢٢٢٣) phase
٢٠٤	٨-١٢ المخطط الطوري للموصلات الفائقة المعتمدة على اوكسيد النحاس (Phase Diagram Of Cuprite Superconductors)
٢٠٧	٨-١٣ السعة الحرارية: Heat capacity
٢٤٩-٢١٢	الفصل التاسع: نظريات التوصيلية الكهربائية الفائقة (Theories of Superconductor at Low Temperature)
٢١٢	٩-١ نظريات الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة الواطئة (Theories of Superconductor at Low Temperature)
٢١٢	٩-١-١ المقدمة (Introduction)
٢١٣	٩-١-٢ انموذج المائعين (The Two Fluids Model)
٢١٦	٩-١-٣ نظرية (معادلة لندن) (London Equation)
٢١٩	٩-١-٤ نظرية كينزينبرك-لانداو (Ginzburg-Landau theory)
٢٢١	٩-٢ نظريات الموصلات الفائقة ذات درجة الحرارة العالية Theory of High Temperature Superconductor (HTSC)

٢٢١	Introduction ١-٢-٩ المقدمة
٢٤٣	BCS Theory ٣-٩ نظرية
٢٦٩-٢٥٠	الفصل العاشر: التطبيقات الصناعية للمواد الفائقة التوصيل Industrial Applications of Superconductors
٢٥٠	(Introduction) ١-١٠ المقدمة
٢٥٧	(Applications) ٢-١٠ الاستخدامات
٢٥٧	(Very Rapid Train) ١-٢-١٠ القطار فائق السرعة
٢٥٨	(SQUID Apparatus) ٢-٢-١٠ جهاز السكويد
٢٥٨	(Power Transmission) ٣-٢-١٠ نقل الطاقة
٢٦٥	(Power Storage) ٤-٢-١٠ خزن الطاقة
٢٦٦	(Superconducting Magnets) ٥-٢-١٠ المغناطيس الفائقة التوصيل
٢٦٦	(Motors, Generators and Alternators) ٦-٢-١٠ المحركات، المولدات ومولدات التيار المتناوب:
٢٦٧	(Electronic Applications) ٧-٢-١٠ التطبيقات الالكترونية
٢٦٨	(Military Applications) ٨-٢-١٠ الاستخدامات العسكرية
٢٦٩	(Medical Applications) ٩-٢-١٠ الاستخدامات الطبية
٢٧٠	المصادر

الفصل الاول

نبذة تاريخية عن نشوء وتطور الموصلية الفائقة

(Historical Review)

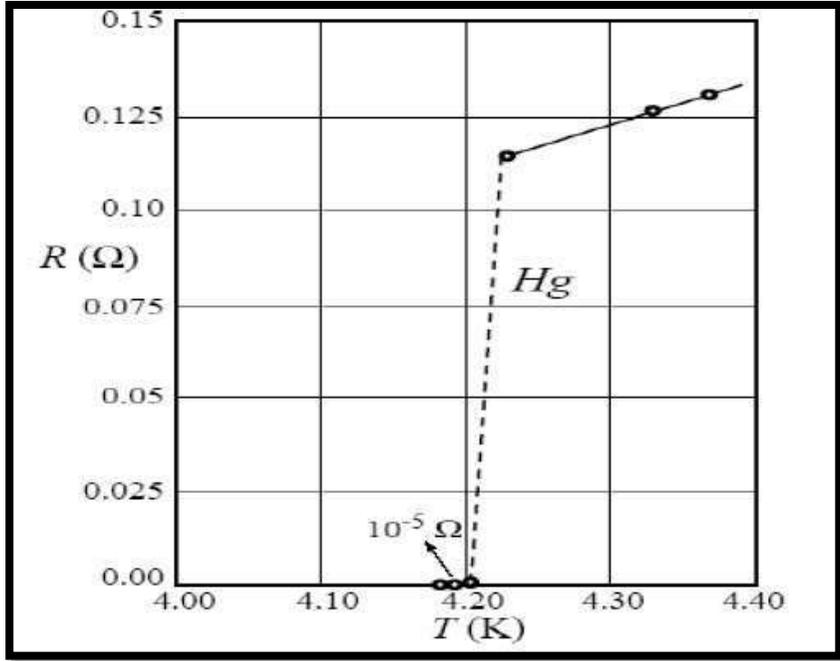
١-١ المقدمة : (Introduction)

الموصلية الفائقة بدرجات حرارة عالية (HSTC) ظاهرة تحدث عندما تعاني المواد تحولات في خواصها بدرجة الحرارة الحرجة (T_C) والتي هي فوق ($30K, -273C$) ولها خواص استثنائية ولكن ميزتها الوحيدة التي يمكن ملاحظتها هي قابليتها نقل التيار الكهربائي خلالها بدون خسارة وبهذا تعرف موادها بالموصلات الفائقة

٢-١ النشوء والتطوير (Implementation and Review)

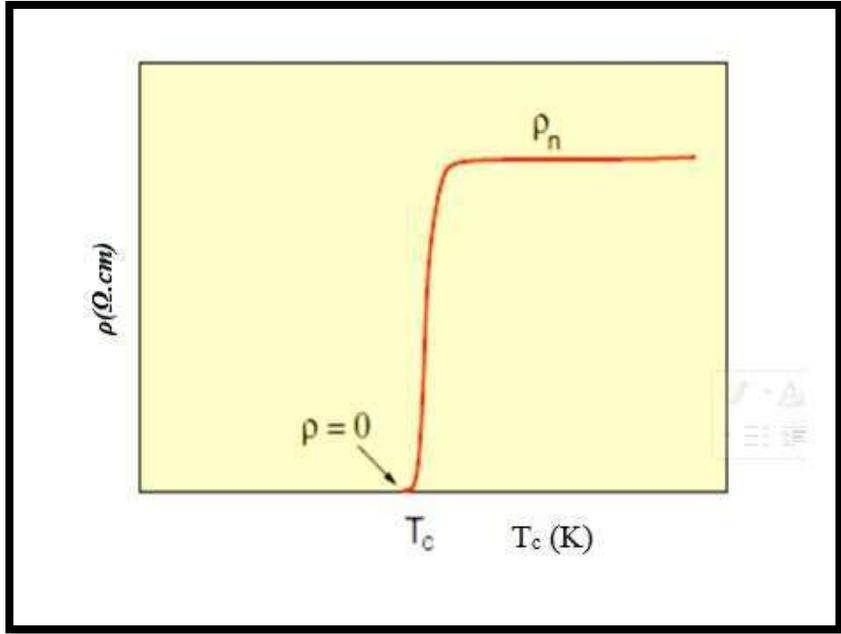
Development)

في عام ١٩١١ لاحظ الفيزيائي الهولندي كاميرلنك أونيس (Kammerling Onnes), في اثناء دراسته تغير المقاومة الكهربائية مع درجة الحرارة للزئبق الصلب (Hg) وعند درجات حرارة منخفضة جدا مستعملا بذلك التبريد بالهليوم السائل. ان الزئبق يفقد مقاومته الكهربائية عندما تكون درجة حرارته اقل من ($4,2K$) وهي نقطة غليان الهليوم السائل كما موضح في الشكل (١-١), وهذا الاكتشاف ادى به الى ادراك وجود ظاهرة جديدة في المواد الصلبة تسمى التوصيلية الفائقة للكهرباء (Electrical Superconductivity)



الشكل رقم (١-١) المقاومة الكهربائية للزئبق عند درجة حرارة منخفضة.

في عام ١٩١٢ اكتشف أونيس أيضا، عند تسليط مجال مغناطيسي محوري قوي بما فيه الكفاية فان قيمة المقاومة ترجع الى حالتها الطبيعية، وخلال عام ١٩١٣ وجد ان عنصر الرصاص يصبح فائق التوصيل عند درجة حرارة $(T_c=٧K)$. وعموما فان سلوك المقاومة كدالة لدرجة الحرارة عند تبريد المادة بالهليوم او النتروجين السائل موضح بالشكل رقم (٢-١).



الشكل (٢-١) سلوك المقاومة كدالة لدرجة الحرارة .

ومع استمرار عمليات البحث في هذه الظاهرة المدهشة فقد اكتشف في عام ١٩٣٣ كل من مازنر واوخنسفيد (Meissner & Ochsenfeld) واحدة من اهم الخواص الاساسية للمواد فائقة التوصيل واكبرها حيث وجد بان المجال المغناطيسي لا يخترق المادة فائقة التوصيل. في حين اقترح كورتر و كاسيمير (Gorter & Casimir) في العام ١٩٣٤ انموذج المائعين (Tow-Fluid Model) والذي يفسر ظاهرة التوصيل الفائق، حيث يفترض هذا الانموذج ان المائع الالكتروني في المادة فائقة التوصيل ممكن ان يوصف كمجموعة من مائعين (طبيعي وفائق التوصيل). حيث ان الخواص للمكونات الطبيعية مماثلة لتلك الخواص في النظام الالكتروني في المعادن الطبيعية. اما مكونات فائقة التوصيل فهي المسؤولة عن السلوك فائق

التوصيل وان هذه الألكترونات لاتعاني استطاره عندما تكون قيمة الانتروبي تساوي صفراً (انتظام تام) وعلى طول تشاكه بحدود (10^3nm). وكذلك وضمن هذا النموذج فان تحليل الحرارة النوعية ومعلومات المجال الحرج دفع بكورتر وكاسيمير باقتراح صيغة تجريبية لاعتماد درجة الحرارة على كثافة الألكترونات الفائقة التوصيل حيث ان (n) و $(t=T/T_c)$ و $(n_s=n(1-t^4))$ هي الكثافة الكلية للألكترونات التوصيل. ان (T_c) تمثل درجة الحرارة الحرجة (T) تمثل درجة الحرارة الاعتيادية . وفي العام ١٩٣٥ قدم الاخوان لندن (F.&H.London) دورا مهما خدم مفهوم ظاهرة التوصيلية الفائقة حيث تمكنا من تطوير الديناميكا الكهربائية لظاهرة التوصيلية الكهربائية الفائقة من خلال صياغة معادلة لندن والتي اعدت كصيغة رياضية لتوضيح ظاهرة التوصيلية الكهربائية الفائقة وتأثير مازنر، ولقد وجدنا عامل مهم يتعلق بالتوصيلية الكهربائية الفائقة والذي سمي بعمق الاختراق (λ) . وكذلك بينا ان تأثير مازنر هو كنتيجة لتحقيق الحد الأدنى من الطاقة الحرة الكهرومغناطيسية المحمولة من قبل التيار فائق التوصيل، وفي عام ١٩٤١ وجد ان نترات النيوبيوم تصبح فائق التوصيل عند $(T_c=16\text{K})$.

وفي عام ١٩٤٧، قام العالم هايزنبرك بعمل سلسلة من البحوث في محاولة منه لتوضيح التوصيلية الكهربائية الفائقة بواسطة تحليل تفاعل كولوم في العديد من الأنظمة الألكترونية ومنها المعادن، حيث عدها كغاز الكتروني حر. وفي الوقت نفسه تقريبا قام كل من بورن وجانك (Born&Cheng) بمراقبة الية مشابهة ذات علاقة بتفاعل كولوم اخذين بنظر الاعتبار وجود

دورية الشبكة البلورية. ان معادلة لندن تزودنا بوصف لخاصية
الدايماغناطيسية الشاذة للمواد فائقة التوصيل في المجال الخارجي الضعيف ,
والتعميم الآخر لحالة المجالات القوية انجز من خلال نظرية العالمين
كينزبرك-لانداو (Ginzburg-Landau) في العام ١٩٥٠. والتي ادت دورا
مهما في فهم فيزياء ظاهرة التوصيلية الكهربائية الفائقة من خلال دراسة دالة
الموجة لوصف سلوك الألكترونات فائقة التوصيل. وفي العام ١٩٥٠, قام
كل من العالمين ماكسويل ورينولد (Maxwell & Reynold) باختبار
تأثير النظائر على درجة الحرارة الحرجة (T_c) للمواد فائقة التوصيل. حيث
وجدا بان قيمة درجة الحرارة الحرجة تتناسب عكسيا مع كتلة النظير للعنصر
المكون. هذا الاكتشاف بين ان اهتزاز ايونات الشبكة او الفونونات له دور
مهم في مفهوم فائقية التوصيل الكهربائي، ومع استمرار عملية الدراسة
والبحث فان النظرية المنظمة للتوصيلية الكهربائية الفائقة والتي توضح طبيعة
هذه الظاهرة وضعت في العام ١٩٥٧ من قبل العلماء الامريكان الثلاثة
باردين وكوبر وشريفر (Bardeen, Coope and Schrieffer) وسميت
باسمهم (BCS Theory). كانت هذه النظرية ذات اثر كبير في حل لغز
التوصيلية الكهربائية الفائقة، حيث جلبت هذه النظرية تقدما اخر في هذا
المجال, وافترضت هذه النظرية انه ممكن وتحت بعض الظروف ان تزوج
الالكترونات بواسطة تبادل جسيم وهو الفونون , وهذا الزوج الالكتروني والذي
سمي باسم زوج كوبر (Cooper Pair) ينساب ويتحرك خلال الشبكة
مسببا التوصيلية الكهربائية الفائقة.

وفي عام ١٩٥٩ بين العالم كوركوف (Gor'kov) ان نظرية كينزبيرك-لانداو (GL) ممكن ان تشتق من نظرية (BCS) عند حدود مائة من معاملات الفضاء. وفي عام ١٩٦٢، وصف براين جوزيسفون (Brain Josephson) انه في حالة تحضير مادة فائقة التوصيل الكهربائي تتضمن ملتقى رقيق، فان عملية الاختراق النفقي (Tunneling) ممكن ان تحدث عبر هذا الملتقى وان بعض الازواج الألكترونية سوف تقوم بحفر نفق خلاله طبقا للنظرية الكمية (Quantum Theory) وان الألكترونات كجسيمات لا تستطيع اختراق الحاجز ولكن الموجة ممكن لها ذلك وانه من الممكن استعمال تيار الاختراق النفقي في دراسة الخواص الفيزيائية للموصل الفائق. ان ظاهرة التوصيل الكهربائي الفائق تحصل في انواع مختلفة من المواد تتضمن العناصر البسيطة مثل القصدير والالمنيوم وانواع مختلفة من السبائك المعدنية وبعض اشباه الموصلات المطعمة بشدة وفي مركبات سيراميكية معينة تحتوي على مستويات تتكون من ذرات النحاس والاكسجين، حيث ان الصنف الاخير من المركبات يطلق عليه تسمية (Cuprates) وهي مواد فائقة التوصيل ذات درجات حرارة انتقال حرجة عالية، ان ظاهرة التوصيلية الكهربائية الفائقة لا تحصل في المعادن النبيلة مثل الذهب والفضة ولا في المعادن الفيرو مغناطيسية.

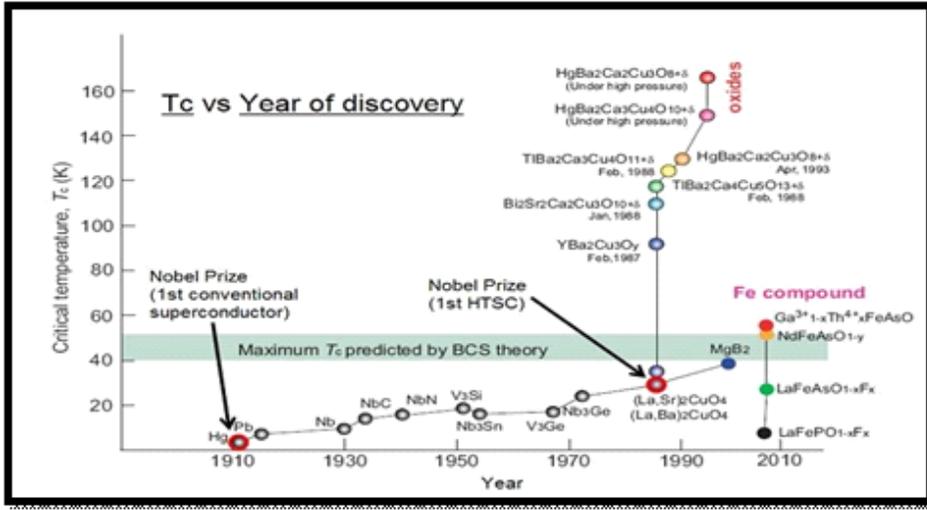
ان اغلبية المواد فائقة التوصيل الكهربائي هي مركبات وسبائك وليست عناصر نقية، فاذا كان احد مكونات السبيكة هو عنصر فائق التوصيل فان درجة الحرارة الحرجة للسبيكة تختلف عن درجة الحرارة الحرجة لمكوناتها

وغالبا ما تكون اعلى منها, وان درجة حرارة الانتقال العالية في الحقيقة تلاحظ في السبائك والمركبات. ولعدة سنوات كان المقياس هو سبيكة (النيوبيوم-قصدير) والتي درجة حرارتها الحرجة تساوي (18,1K). ان اول اوكسيد فائق التوصيل اكتشف في النظام السبيكي ($BaPb_{1-x}Bi_xO_2$) حيث كانت اعلى درجة حرارة حرجة له ($T_c=13K$) وعندما تلوث ($x=0,25$) وعندما تكون لقيمة ($x>0,35$) يكون النظام شبه موصل. وفي العام 1973 اكتشف كافلر (Gavaler) ان الاغشية المصنوعة من مركبات النيوبيوم-جرمانيوم (Nb_2Ge) تصبح فائقة التوصيل عند ($T_c=23,3K$). وفي العام 1986 وفي الذكرى الخامسة والسبعين لاكتشاف ظاهرة التوصيلية الكهربائية الفائقة, تم الاعلان عن نوع جديد من المواد فائقة التوصيل الكهربائي ذات الاساس اوكسيد النحاس بوساطة كل من بيدنورز ومولر (A.Bednorz & K.A.Muller) وذلك باكتشاف التوصيلية الفائقة للنظام (La-Ba-Cu-O) حيث يبقى هذا النظام فائق التوصيل لحد ($T_c=40K$). وفي اوائل عام 1987 قام كل من (C.W.Chu) و (M.K.Wu) وبشكل مستقل بالإعلان عن ان المركب (Y-Ba-Cu-O) يصبح فائق التوصيل عند درجة حرارة اعلى من درجة حرارة النتروجين السائل حيث كانت تساوي ($T_c=92K$).

وفي السنة نفسها وجد ميشيل واخرون (Michel et al) ان النظام (Bi-Sr-Cu-O) يكون فائق التوصيل وعند متوسط درجة حرارة بالمدى (7K-22K). وفي العام 1988 حضرت العديد من المواد الموصلة المعتمدة

في تركيبها على اوكسيد النحاس (Cuprate) , وكان الاكتشاف الاكثر اشارة هو النظام فائق التوصيل الكهربائي ذو الاساس البزموت (Bi-base) والذي ولد بحوثا هائلة في مجال فيزياء المواد. وقد قام مايدا ومجموعة (Maeda et al) باكتشاف ان النظام فائق التوصيل (Bi-Sr-Ca-Cu-O) يمتلك ($T_c=110K$), ان التراكيب البلورية الثلاثة للسلسلة المتشابهة $n(n-1)Bi-22$ و ($n=1,2,3$) والتي حددت حديثا قيمة درجة الحرارة الحرجة ($T_c=22K, 80K, 110K$) لكل من ($n=1,2,3$) على التوالي, حيث وجد ان درجة الحرارة الحرجة تزداد بزيادة (n) لحد ($n=3$) ولقيمة اكثر من ذلك فان درجة الحرارة الحرجة تقل. وقام كل من شنك وهيرمان (Sheng & Hermann) باكتشاف ان نظام (Tl-Ba-Ca-Cu-O) فائق التوصيل يمتلك درجة حرارة حرجة هي ($T_c=120K$) ، وفي العام ١٩٩٣ قام بوتيلين ومجموعة (Putilin et al) باكتشاف ان المركب فائق التوصيل (Hg-base) يمتلك درجة حرارة انتقال حرجة تصل الى ($T_c=164K$) . ومنذ ذلك الحين قام العديد من العلماء باجراء التجارب على مختلف مركبات البيروفسكايت (Perovskites) لانتاج مركبات ذات درجة حرارة انتقال حرجة اكثر من درجة الحرارة الحرجة لنظام (Hg-base) , وفي العام (٢٠٠٨) ظهرت على الساحة عائلة فائقة جديدة من المواد فائقة التوصيل الكهربائي وكانت قبلة الانظار وتركيبها يحتوي على طبقة الحديد من مضاد اوكسيد الرصاص (Iron layer of anti-PbO)

كمركب فائق التوصيل. وعلى اي حال فان الكثير من المختبرات في انحاء العالم كافة قدمت تقارير وادلة عن مواد فائقة التوصيل عند درجة حرارة الغرفة، ولكن هذه التقارير لم تكن بشكل حاسم. والشكل رقم (٣-١) يبين التطور في درجة الحرارة الحرجة للمواد فائقة التوصيل الكهربائي. وكذلك الجدول (١-١) يبين نشوء وتطور الموصلات الفائقة.



الشكل (٣-١) التسلسل التاريخي لتطور وزيادة درجات الحرارة الحرجة للمواد فائقة التوصيل منذ ١٩١١ .

جدول رقم (١-١) يوضح نشوء وتطور الموصلات الفائقة

السنة	الباحث	العنصر/ المركب	درجة الحرارة
1986	Johenes, George, Bedors Kart Alewandez Mullier	La Ba CuO	30K
1986	=	Lscoua _{2-x} , sr _x cuo ₄ La ₁₋ 85Ba ₁₅) cuo ₄)	30K
1987		YBCO	90K
1988		BSCCO	105K
		TBCCO	127K
1989	Cava et al.	Pb ₂ Sr(Ca, Y) Cu ₃ O ₈	
2001	Kopnin et al.	AuBa ₃ Ca ₂ Cu ₄ O ₁₁	99K
2001	=	Au Ba ₂ (YCa) (Cu ₂ O ₇)	82K
	=	AuBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₉	30K
2005		TaBaCu/o O ₂	106K
2005		Structure	104K
		=	97K
		=	96K
		Pb ₃ Sr ₄ Ca ₃ Cu ₆₀	106K
		Pb ₃ Sr ₄ Ca ₂ Cu ₅₀ O ₁₆₊	101K
		(Tisn) Ba ₄ TmcaCu ₄ O ₁₄₊	121K
		(Ti _{0.5} ph _{0.5}) Sr ₃ Ca ₂ Cu ₃₀₉	118.120

			K
		$Ti_2 Ba_2 Ca_3 Cu_4 O_{11}$	112K
		$Ti Ba_2 Ca_2 Cu_3 O_9$	118K
2006		$YBa_2 Cu_4 O_2$ (org)	922K
		$GaSr_2(ca0.5 Tm0.5) Cu_{207}$ (org)	99K
		$Ga_2 Sr_4 Y_3 Ca Cu_{50y}$ (org) (pb1.5Sn1.5) $Sr_4 Ca_2 O_{15+}$ $Sn_3 Ba_2 Ca_4 Cu_{11} O_3$ - 108K $Sn_4 Ba_4 Tm_2 Cu_7 O_x$ - 98K $Sn_3 Ba_4 Y_2 Cu_5 O_x$ - 9K	85K -95K
2007		$Sn_3 Ba_4 Tm_3 Cu_6 O_x$ (org)	109K
		$Sn Ba_4 Y_2 Cu_5 O_y$ (org)	107K
		$Sn_4 Ba_4 Tm_2 Ca Cu_4 O_5$	-104K
		$Sn_4 Ba_4 Tm_y Cu_7 O_x$ (org)	-98K
2007		$Sn_2 Ba_2 (Y_{0.5} Tm_{0.5} (Cu_3 O_8))$ (org)	-96K
		$Ysr Ca_2 Cu_2 O_4$	101K
		$(Ba_2 Sr) CuO_3$	90K
السنة	الباحث	العنصر/ المركب	درجة الحرارة
		$Ba_2 Sr_2 Ca_4 O_8$ + org	90K
		$La_3 Sr (Cu O_2)$ org(42K
		$Pb_3 Sr_4 Ca_3 Cu_{50x}$ org	106K
		$TiSn Ba_4 Y_2 Cu_4 O_5$ org	86K
2008		$YBa_{10} Cu_{12} O_{25}$ org	104K
		$YBa_{10} Cu_{12} O_{25}$ org	96K

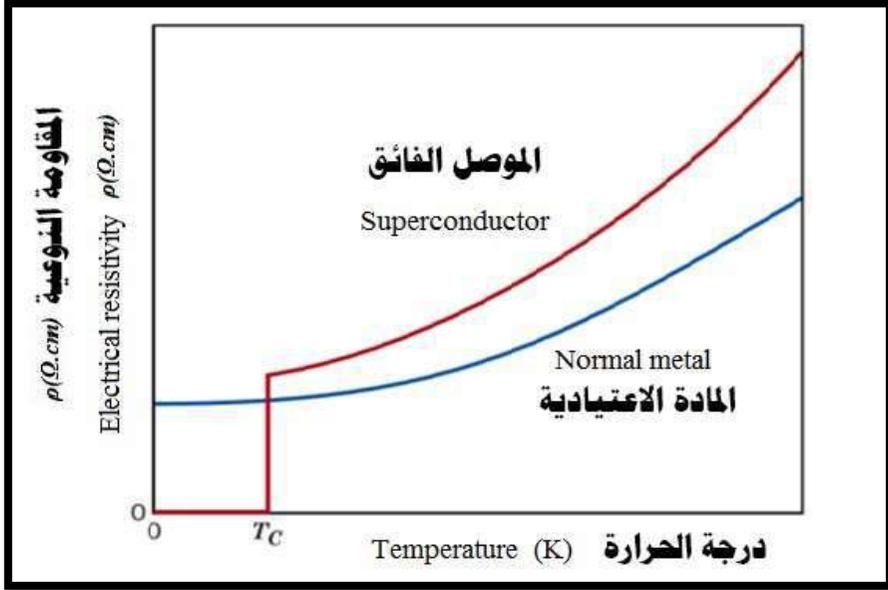
2010		Ta Ba ₇ Cu ₈ O _x Structure	99K
		BisnBa ₄ TmCaCu ₄ O ₁₄	83K
2011		(Ti _{0.5} Pb _{0.5} Sn) Ba ₄ Tm ₃ Cu ₅ O _l or	105K
		TiBa ₂ CaCu ₂ O ₇	103K
		TiBa ₂ CuO ₆	95K
2012		(YBa ₁₀ Cu ₁₂ O ₂₅) Structure	104K
2013		Nb Ba ₂ Cu ₁₀ O ₂₀ + org	255K
		Te Ba ₇ Cu ₈ O _x org	98K
2014		Nb Ba ₉ Cu ₁₀ O ₂₀ Structure org	255K
		Ta Ba ₇ Cu ₈ O _x org	99K
2015		Cd Nb Ba ₉ Cu ₁₀ O ₂₀	331K
		Ti Ba ₂ Cu ₁₀ O ₂₀ stru org	327K
		Ti Ba ₂ Cu ₁₀ O ₂₀ stru org	322K
		VBa ₂ Cu ₁₀ O ₂₂ org	314K
		VBa ₂ Cu ₁₀ O ₂₂ stru org	313K
		Zr Ba ₂ Cu ₁₀ O ₂₂ org	307K
		Zr Ba ₂ Cu ₁₀ O ₂₂ stru org	307K
2016		Ti ₂ Ba ₂ Te Cu ₂ O ₈	147K
		T ₁₂ Ba ₂ YCu ₂ O ₆	139K
		T ₁₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₆ org	127– 128K
		(T _{11.6} Hg _{0.4}) Ba ₂ Ca ₂ Cu ₂	126K

		O16	
		Ti Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₉	123K
		Bi ₂ Sr ₂ TeCu ₃ O ₈ org	139K
		Bi105 Pb0.5Sr2 Ca2 Sba1 Cu203 org	115K
2016		Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₂ O ₁₀	123K
		CaSrCu ₂ O ₄	110K
		CdNbBa ₉ Cu ₁₀ O ₂₀ +	337K
		SrTiO ₃	0.35K

٣-١ درجة الحرارة الحرجة (T_c) (Critical Temperature)

ان درجة الحرارة الحرجة للمواد فائقة التوصيل هي درجة الحرارة التي عندها تنخفض المقاومة النوعية للمادة الى الصفر , ان هذ الانتقال يحدث بصورة مفاجئة جدا ويكتمل عندما تظهر المادة بطور جديد هو الطور فائق التوصيل وهذا الطور يوصف بوساطة نظرية (BCS) , وتتعرض عدة مواد الى الانتقال للطور فائق التوصيل عند درجات حرارة منخفضة, وان درجة حرارة الانتقال الاعلى كانت بحدود (٢٣K) حتى اكتشاف المواد فائقة التوصيل ذات درجات حرارة الانتقال الحرجة العالية في العام ١٩٨٦. ان المواد ذات درجات الحرارة الحرجة العالية في المدى (١٢٠K) قد اخذت كثيراً من الانتباه والاهمية, وذلك لانها تبقى في الحالة فائقة التوصيل في درجات حرارة اعلى من نقطة غليان النيتروجين

السائل (77K), والشكل (٤-١) يوضح العلاقة بين المقاومة النوعية للمادة ودرجة الحرارة.



الشكل (٤-١) المقاومة الكهربائية النوعية كدالة لدرجة الحرارة.

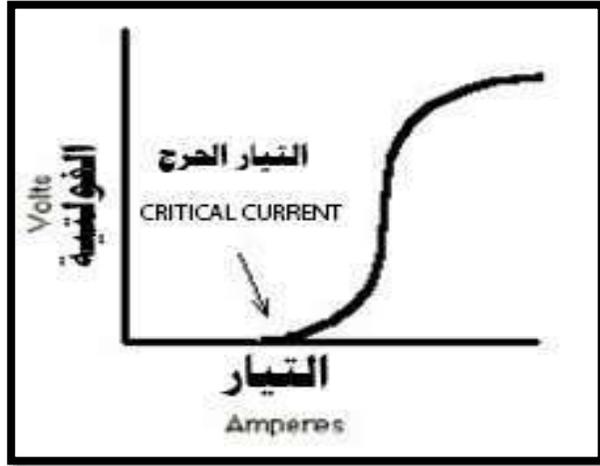
ومن الممكن أيضا ان تعرف درجة الحرارة الحرجة (T_c) بأنها الدرجة التي تتحول فيها المقاومة النوعية للفلز من المقاومة النوعية العالية إلى المقاومة النوعية الصغيرة (الصفيرية تقريبا)، أو إنها درجة الحرارة التي عندها تبدأ المقاومة النوعية للمعدن بالانخفاض وعموما فان درجة حرارة التحول (الانتقال) هي درجة الحرارة التي يبدأ عندها تحول الفلز من الحالة الاعتيادية إلى حالة التوصيلية الفائقة. وتعتمد على:

- السُمك: حيث تتناسب درجة الحرارة الحرجة مع سُمك المادة.

- الضغط: زيادة الضغط المسلط على المادة يؤدي إلى نزول درجة الحرارة الحرجة (تناسب عكسياً).
 - النقاوة: تزداد درجة الحرارة الحرجة بزيادة نقاوة المادة.
 - الشحنات المستقرة: لحد الآن لم يتم معرفة العلاقة بين درجة الحرارة الحرجة والشحنات السطحية بصورة واضحة .
- ومن الجدير بالذكر انه يوجد ارتباط بين درجة الحرارة الحرجة (Tc) والعدد الذري للعنصر (Atomic number) حيث تم التوصل إلى أن العدد الذري الواطئ للعناصر البسيطة له علاقة بدرجة الحرارة الحرجة حيث أن العناصر الخفيفة هي افضل للحصول على درجة الحرارة الحرجة (Tc). وكذلك هناك ارتباط بينها وبين المعامل الحجمي (Bulk Modulus) ومعامل هول (Hall): حيث يكونان كدالة للعمل بدرجة حرارة ديباي (Dbye) وقد تم تقديرها بواسطة العناصر البسيطة.

١-٤ كثافة التيار الحرج (J_c) Critical Current Density

هناك قيمة قصوى للتيار لهذه المواد التي ممكن ان ينتقل خلالها، وفوق هذه القيمة فان التوصيلية الفائقة سوف تتوقف. واذا اندفع تيار كبير جدا خلال الموصل الفائق فانه سوف يرجع المادة الى حالتها الطبيعية حتى لو كان تحت درجة حرارته الحرجة، ان قيمة كثافة التيار الحرج (J_c) كدالة لدرجة الحرارة هو انه كلما انخفضت درجة حرارة الموصل الفائق كان التيار المنساب اكبر، والشكل (١-٥) يوضح العلاقة بين الفولتية والتيار للموصل الفائق.



الشكل (١-٥) العلاقة بين الفولتية والتيار للموصل الفائق.

الفصل الثاني

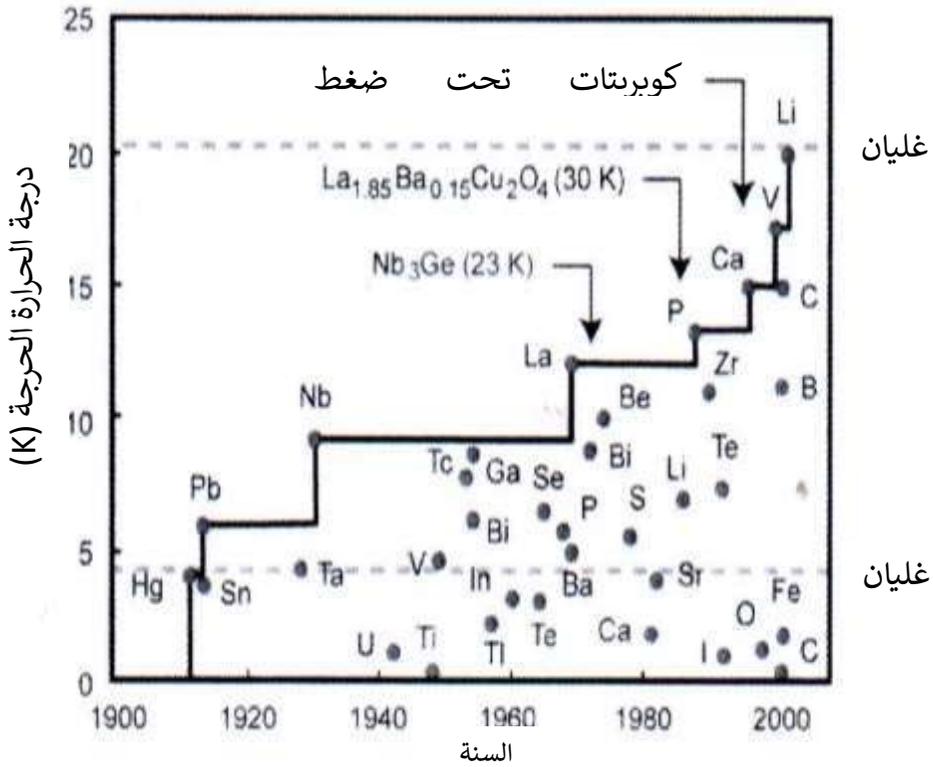
عناصر التوصيل الفائق

(Superconducting Elements)

١-٢ المقدمة (Introduction):

بعد مرور عقدين من البحوث المركزة على الموصلية الفائقة (Superconductivity) لأكاسيد النحاس أو كوبريت (Cuprate) والاهتمام بالمواد البسيطة مثل دايبورايد المغنسيوم (Magnesium diboride) ومواد أساسية أخرى. هذه البحوث الخاصة أجريت على الموصلات الفائقة بدرجات الحرارة الحرجة (T_c) والتي تساوي 40K ، مثل مركب ثاني باريوم المغنيسيوم (MgBa_2) (مركب ثنائي). بدرجة حرارة حرجة تساوي 20K ، والليثيوم (Lithium) بدرجة حرارة حرجة تساوي 20K وتحت ضغط هي أعلى درجة حرارة (T_c) للعناصر البسيطة. وفي السنوات الأخيرة لاحظت الجمعية الفيزيائية من خلال بحوث عديدة على الموصلية الفائقة لعناصر جديدة تحت ضغط مثل الكبريت (sulfur) في درجة حرارة حرجة تساوي 17K ، والأوكسجين تحت درجة حرارة حرجة T_c وتساوي $0,5\text{K}$ والكاربون في أنابيب الكربون النانوية بدرجة حرارة حرجة T_c تساوي 15K والكاربون بهيئة الماس (Diamond) بدرجة حرارة حرجة T_c تساوي 4K والمواد الحديدية غير المغناطيسية بدرجة حرارة حرجة T_c تساوي 11K والعناصر الخفيفة مثل الليثيوم (Lithium) بدرجة حرارة حرجة T_c تساوي 20K والبورون بدرجة حرارة حرجة T_c تساوي 11K . الشكل (١-٢) يبين

التطور بدرجات الحرارة الحرجة T_c . برهنت التجارب الحديثة ونظريات القصور الذري والموصلية الفائقة في الالكترونات الغازية ذات البعدين على تغييرات كبيرة في الحالات المترابطة (correlated) مع الموصلية الفائقة. إن الموصلية الفائقة للمواد الكثيفة (condensed) تبقى من بين البحوث المختلفة لمواضيع الفيزياء المبتدئة من الهيدروجين والمنتهية بالايودين.



الشكل (٢-١) يمثل التطور في درجات الحرارة الحرجة T_c للعناصر البسيطة

قدمت هذه الاكتشافات الحديثة أجوبة جيدة عن الأسئلة الأساسية حول عناصر الجدول الدوري في الشكل (٢-١) ولكن تبقى أمور غامضة في هذا الجدول سيتم إجابتها في البحوث المستقبلية.

PERIODIC TABLE OF SUPERCONDUCTING ELEMENTS

The table includes the following legend:

- Yellow box:** superconducting element only under certain conditions (pressure or film form)
- Orange box:** superconducting element in bulk form

Example for Beryllium (Be):

- Atomic number: 4
- Symbol: Be
- Critical temperature of bulk at normal pressure: 0.025 K
- Condition type (e. g. pressure value, film form): film

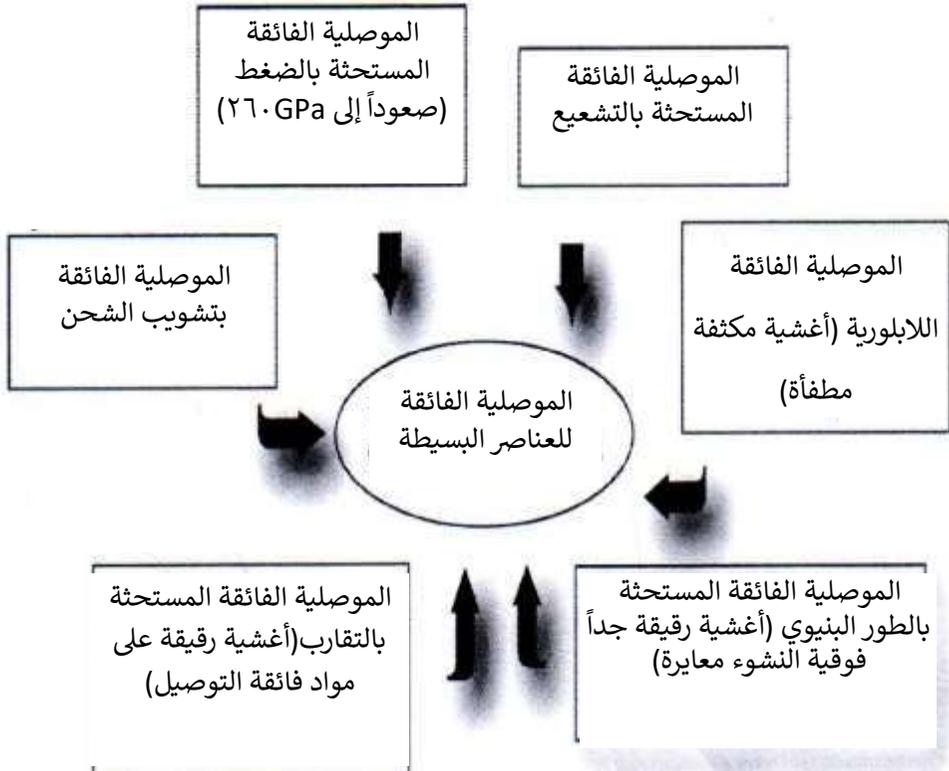
The table lists critical temperatures (K) and conditions (e.g., pressure in GPa, film form) for elements from Hydrogen (H) to Lanthanum (La) and Actinium (Ac). Elements like Niobium (Nb) and Vanadium (V) are shown with high critical temperatures (9.25 K and 5.4 K respectively) under high pressure (20 GPa and 120 GPa). Other elements like Lead (Pb) and Mercury (Hg) are shown with critical temperatures of 7.2 K and 4.2 K respectively under high pressure (33 GPa and 0.9 GPa).

الشكل (٢-٢) الجدول الدوري للعناصر الفائقة التوصيل

٢-٢ تقنيات الموصلية الفائقة (Superconducting Technology):

كان الاعتقاد بأن حدوث الموصلية الفائقة حالة شاذة، غير نظامية ولكن الآن ظهر أن حالة الموصلية الفائقة يمكن أن تتكون من معظم المواد متضمنة آلاف المركبات غير العضوية، ومعظم العناصر الطبيعية، مثل السبائك والأكاسيد والمواد العضوية، وفي حالة وجود عنصر غير فائق الموصلية

يمكن التأثير عليه بالضغط لتكوين منه موصلات فائقة. هناك عدة طرق يمكن من خلالها تكوين مواد ذات موصلية فائقة كما موضح في الشكل (٢-٣).



الشكل (٢-٣) التقنيات المستخدمة لتحويل العناصر العادية إلى موصلات فائقة

وكما يأتي:

٢-٢-١ الموصلية الفائقة بالحث (inducting Superconducting)

يمكن الحصول على الموصلية الفائقة بطريقة الحث من خلال:

١. أن مرور زوج من الالكترونات بين موصلين فائقين أحدهما أصغر من الآخر مغلق ومصنوع من صفائح لبعض المواد. هذه الظاهرة تسمى الموصلية الفائقة بالحث.

٢. إجهاد البلورات أو شبكية البلورات غير المتوازية يمكن أن تحدث موصلية فائقة بالحث.

٣. التشويب الكيميائي الذي يؤثر على الالكترونات الشاغلة (التشويب بالشحنات) ينتج موصلية فائقة في بعض المواد مثل الماس (diamond).

٤. الشبكية غير المنتظمة المحدبة الأبعاد (disorder) يمكن أن تنتج موصلية فائقة من خلال قمع (Suppression) تغير البرم.

إن التركيب البلوري للمواد يحدد خواصها الفائقة الموصلية، تزداد الموصلية الفائقة عند جمع (Collective) السلوك الانتقالي من خلال الجهد الالكتروني للبلورات عند درجات الحرارة المختلفة. وكذلك يمكن إنتاج موصلات فائقة بدرجات حرارة حرجة (T_c) لمواد البوليمر غير البلوري من بعض العناصر المحددة مثل اللانثانوم (Lanthanum) والتي تكون فائقة التوصيل بدرجة حرارة حرجة (T_c) تساوي $4,0K$ ، عندما يكون السداسي المغلق (dhcp) مقارنة بدرجة حرارة حرجة T_c تساوي $6K$ مع المكعب متمركز الأوجه fcc.

٢-٢-٢ الموصلية الفائقة بواسطة الضغط:

(Superconductivity under Pressure)

استخدام الضغط أحياناً يكون طريقة بسيطة لتطوير التركيب البلوري للمواد، حيث تتحول المواد إلى أطوار تركيبية، ولكل طور خواص بواسطة الهيكل الإلكتروني الوحيد. تحول الطور يحدث في بعض العناصر تحت الكبس وبعض الأطوار العالية تظهر الموصلية الفائقة. إن البحوث تحت الضغط العالي والمولدة الموصلية الفائقة أدت إلى تحسين خلايا مصد الماس (diamond anvil cell). إن أعلى ضغط تم التوصل إليه عام ١٩٨٦ تقريباً ٢٥ GPa باستخدام نوع جديد (Bridgman) بدرجة الهليوم السائل، وحالياً تم التوصل إلى ضغط ٢٦٠ GPa، شوهدت الموصلية الفائقة في معظم المعادن تحت ضغط. ومعظم العناصر تتحول إلى معادن دون ملاحظة حدوث الموصلية الفائقة.

٣-٢-٢ حدوث التوصيلية الفائقة (Occurrence of

Superconductivity)

تحدث الموصلية الفائقة من خلال العلاقة بين العدد الذري والحجم الذري. حيث تحدث التوصيلية الفائقة في العديد من العناصر التي تتواجد في منتصف الجدول الدوري وكذلك تحدث أيضاً في السبائك وفي اشباه الموصلات . وهي ظاهرة ليست نادرة الحدوث، ولكنها تفضل الحدوث في السبائك مقارنة بالعناصر النقية مثال ذلك عنصر التنكستن الذي يمتاز بدرجة حرارة حرجة التي تساوي $(T_C=0,01 K)$ ، بينما في المركب (NbAlGe)

فانها تمتلك درجة حرارة حرجة هي $(T_c=20,8K)$. وطبقا لهذه المبادئ هناك

بعض القواعد المفضلة في اختيار عناصر على عناصر أخرى وهي:

١. تحدث التوصيلية الفائقة في العناصر التي يتراوح فيها عدد التكافؤ

لكل ذرة بين (٢-٨) والتي تقع في منتصف الجدول الدوري وهي

غير ملحوظة في المعادن النبيلة القلوية.

٢. أن أعداد التكافؤ (٣, ٤, ٧) التي هي تقريبا اعداد فردية تكون

مفضلة جدا، هذا يعني في الحصول على درجة حرارة حرجة عالية،

بينما تكون الأعداد (٢, ٤, ٥, ٦) التي هي تقريبا زوجية غير

مفضلة. وكما في الشكل (٢-٤)

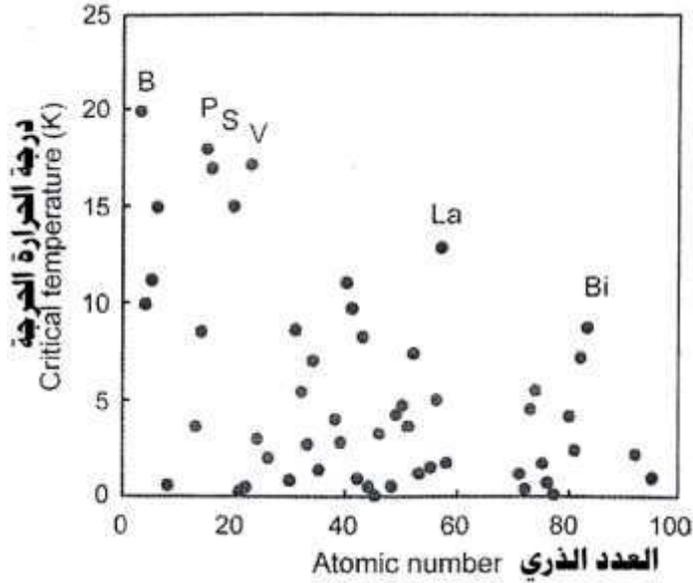
٣. أن الحجم الذري الصغير المصحوب بالكتلة الذرية الصغيرة يكون

مفضلا جدا لحدوث التوصيلية الفائقة.

٤. المعادن القلوية لا تصلح لتحضير الموصلية الفائقة بالرغم من عدم

وجود سند نظري.

٥. المعادن الغير مغناطيسية لا يحدث فيها تحول إلى موصلات فائقة.



الشكل (٢-٤) درجة الحرارة الحرجة للعناصر البسيطة دالة الى عددها الذري

٢-٣ عناصر الموصلية الفائقة (Superconductivity Elements):

٢-٣-١ الهيدروجين (Hydrogen):

الهيدروجين العنصر الأول في الجدول الدوري، جلب الانتباه والاهتمام من قبل الباحثين، وبصورة خاصة نتيجة الموصلية الفائقة تحت ضغط عالي، وضغط ودرجة حرارة متوسطان. يحدث الهيدروجين في الطور الجزيئي المعزول. إن الهيدروجين يتحول تحت الضغط العالي إلى معدن أحادي صلب، وهذا معدن يكون موصل فائق تحت الطور الذري. وبدرجة الحرارة الحرجة T_c التي تصل إلى أعلى قيمة، وربما تكون درجة حرارة الغرفة، ولكن المشكلة التقنية لدراسة الهيدروجين نتيجة إلى صغر ذراته وانتشاره العالي، وفعاليته الكيميائية التي تجعله معدناً صلباً نتيجة الضغط العالي مما

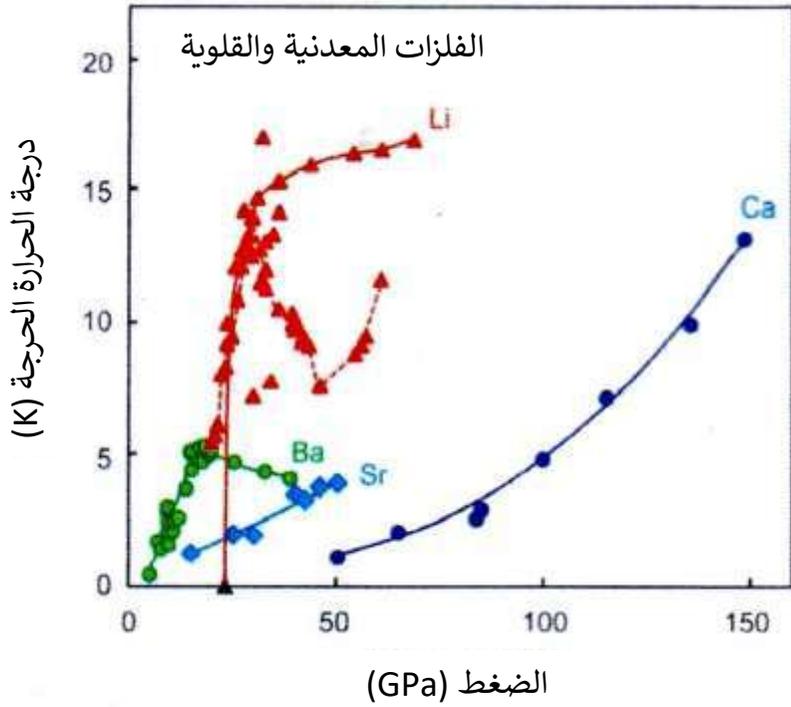
جعله هشاً، وغطائه الضعيف وبالرغم من تلك المسببات هناك دراسات مختلفة ومن ضمنها تحوله إلى سائل صلب تحت ضغط ١٤٠ GPa وخواصه الضوئية المتطورة و(الاسوداد) في درجات الضغط العالي.

٢-٣-٢ القلويات المعدنية والفلزات القلوية (Alkali and Alkaline Metals):

من بين تلك المواد الفلزية (مثل الصوديوم Na، البوتاسيوم K، الليثيوم Li، الروبيديوم Rb، السيزيوم Cs، والفرانسيوم Fr) فقط الليثيوم Li والسيزيوم (Cs)، موصلات فائقة تحت الضغط، أظهرت الحسابات أن (Li) فائق الموصل لليثيوم تحت ضغط عالي وبدرجة حرارة حرجة (T_c) تساوي ٨٠ K. إن قياسات المقاومة النوعية لليثيوم (Li) تحت ضغط وطور انتقالي انعكاسي تتم بواسطة هبوط مفاجئ بدرجة حرارة حرجة تساوي ٧ K تساهم بإمكانية حدوث الموصلية الفائقة. تمت البرهنة على إمكانية الليثيوم للتحويل إلى الموصلية الفائقة تمت عبر المنشورات الحديثة، وعند زيادة الدرجة الحرجة T_c مع الضغط للوصول إلى الموصلية الفائقة بدرجة حرارة ٢٠ K للعنصر البسيط تحت ضغط ٥٠ GPa، إن الشكل رقم (٢-٤) يوضح العلاقة بين درجة الحرارة الحرجة T_c للفلزات القلوية والضغط المسلط عليها عند تحولها إلى موصلات فائقة. إن سلوك تجارب الليثيوم Li لم تفسر بصورة كاملة. ولم يتم الاتفاق على درجة الحرارة الحرجة T_c وبالاعتماد على الضغط الثابت، الذي يبين العلاقة بين درجة الحرارة الحرجة T_c مع الضغط. من الواضح أن الموصلية الفائقة تتنافس مع انتقال الطور التركيبي التكرسي المتماثل.

السيزيوم (Cesium) تحت الضغط لم يلاحظ في الشكل (٢-٤) ذو درجة حرارة حرجة T_c اوطئ من الليثيوم (Li) مع نقصان ترتيبى لدرجة الحرارة الحرجة T_c من ١,٦٦K بزيادة الضغط. وللفلزات الأخرى مثل Na ربما يكون موصل فائق تحت الضغط، ولكن لحد الآن لم يلاحظ ذلك بالتجربة. ومن بين الفلزات للمواد الأرضية مثل (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra) عدة موصلات فائقة Ba, Be, Ca, Sr البريليوم بشكل صلب Be له متوسط درجة حرارة حرجة T_c ٢٦ Km بشكل صلب، ولكن تحصل عند درجة حرارة ٩,٩٥K، عندما يرسب على شكل غشاء صلب (quenched).

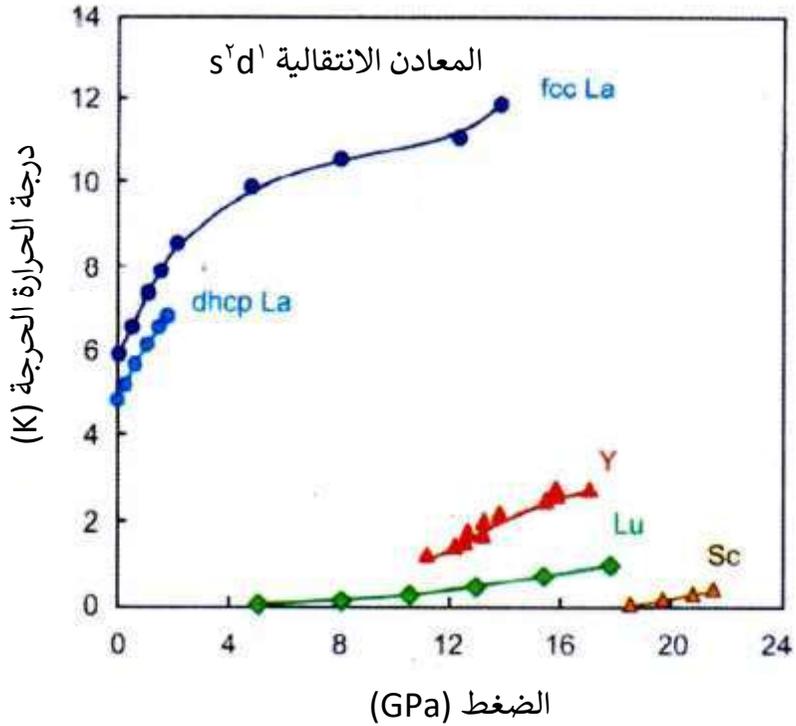
إن سلوك المواد الأرضية القلوية Sr, Ba, Ca تتحول إلى موصلات فائقة فقط تحت الضغط، مثل s-d الكترون، يتحول بارتفاع من الايون الأساس المتعامد عند الضرورة. الكالسيوم Ca والسنتيثروم (Cs) له منحنى موجب (dT_c/dp) ، بينما درجة الحرارة الحرجة T_c إلى الباريوم Ba تزداد ومن ثم تنخفض كما موضحة في الشكل (٢-٥) من الحسابات لتكوين الحزم للإلكترون. وأستنتج (concluded) أن sd مركب تحت ظروف دالة موجة الإلكترون والتي تزداد بقوة تحت الضغط حيث يتحول Ba إلى معدن انتقالي sd من خلال تهجين s-d إلى مستوى فيرمي.



الشكل (٥-٢) اعتماد درجة الحرارة الحرجة على الضغط للمعادن القلوية والقلوية

٢-٣-٣ الفلزات الانتقالية $s'd^2$ (Transition Metals):

اليتريوم (Yttrium) والذي يعود إلى معدن متحول إلى $s'd^2$ أن Lu, La, Sc ذات الميل الموجب dT_c/dp كما موضح في الشكل (٦-٢) أن اللانثانوم (Lanthanum) له طوري توصيل فائق تحت الضغط الاعتيادي، dt, cp ، في درجة حرارة حرجة $4,8K$ ، و fcc في درجة حرارة حرجة T_c تساوي $٦K$.



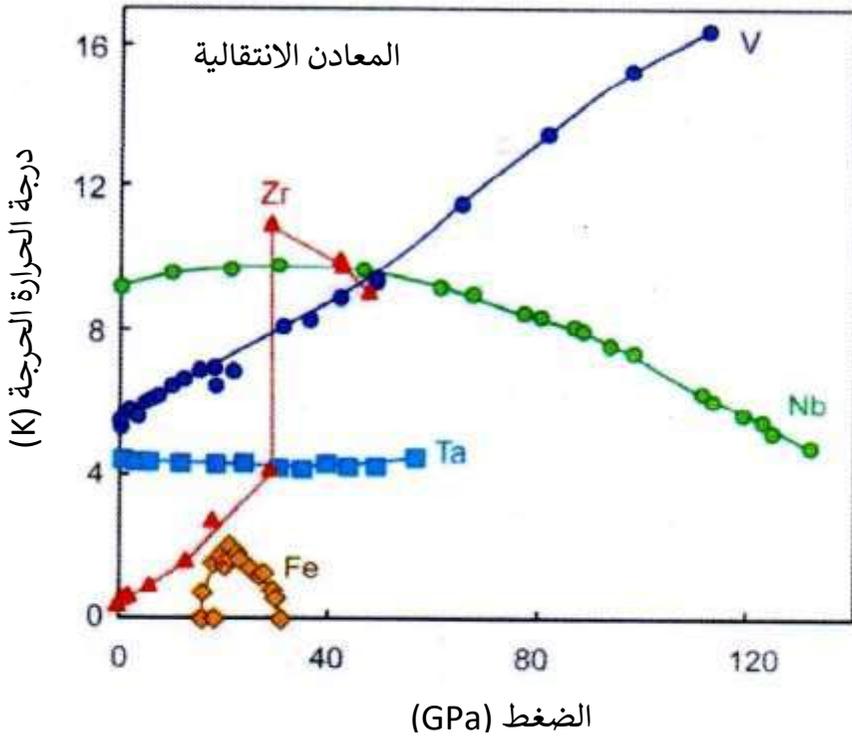
الشكل (٦-٢) اعتماد درجة الحرارة الحرجة على الضغط للمعادن الانتقالية s^2d^2

(La, Lu, Sc, Y)

٤-٣-٤ الفلزات الانتقالية (Transition Metals):

معظم المواد المتحولة، مواد من مجموعة Zn, Hg, Hf, Ti والتي هي فائقة التوصيل في الضغط الاعتيادي، إن أعلى درجة حرارة T_c للعناصر الموجودة في المجموعة الخامسة من الجدول الدوري، حيث إن Nb بدرجة حرارة حرجة T_c تساوي 9,٢٥K (V) بدرجة حرارة حرجة ٥,٤K و Ta بدرجة حرارة حرجة T_c تساوي ٤,٤K. والنيوبيوم (Niobium) موثق تحت درجة حرارة حرجة T_c

عالية تحت الضغط الاعتيادي. لم يلاحظ طور تركيبى متغير إلى Nb تحت درجة حرارة حرجة T_c ، سوى تغير في درجة حرارته الحرجة هو نتيجة للتغيرات في التركيب الالكتروني متولداً في $T_c(p)$ والذي يكون ثابتاً في Nb من ١٠ GPa إلى ٧٠ GPa ومن المحيط إلى ٤٥ GPa إلى T_a ، والملاحظ في الشكل (٧-٢) أن النيوبيوم (niobium)، تانتاليوم (Tantalum)، فانديوم (Vandium) يملكون معامل ضغط موجب عالي في درجة الحرارة الحرجة (T_c). ودرجة الحرارة الحرجة (T_c) تحت الضغط تصل إلى ١٧,٢K وتحت ضغط ١٢٠ GPa.



الشكل (٧-٢) اعتماد درجة الحرارة الحرجة على الضغط للمعادن الانتقالية (Zr, V, Nb, Ta, Fe)

إن زيادة درجة الحرارة الحرجة T_c تحدث نتيجة كبح تغير برم
الالكترونون بتوسيع سعة حزمة (d-band). إن الزركونيوم (Zirconium)
له طورين فائقا الموصلية hcp و bcc ويصل إلى درجة حرارة حرجة T_c
11K في ضغط 30GPa في شكل fcc، الكروميوم (Chromium) يتحول
إلى الموصلية الفائقة بدرجة حرارة حرجة T_c تساوي 3K في طور fcc على
شكل سندويج (Cr) بين طبقات الذهب.

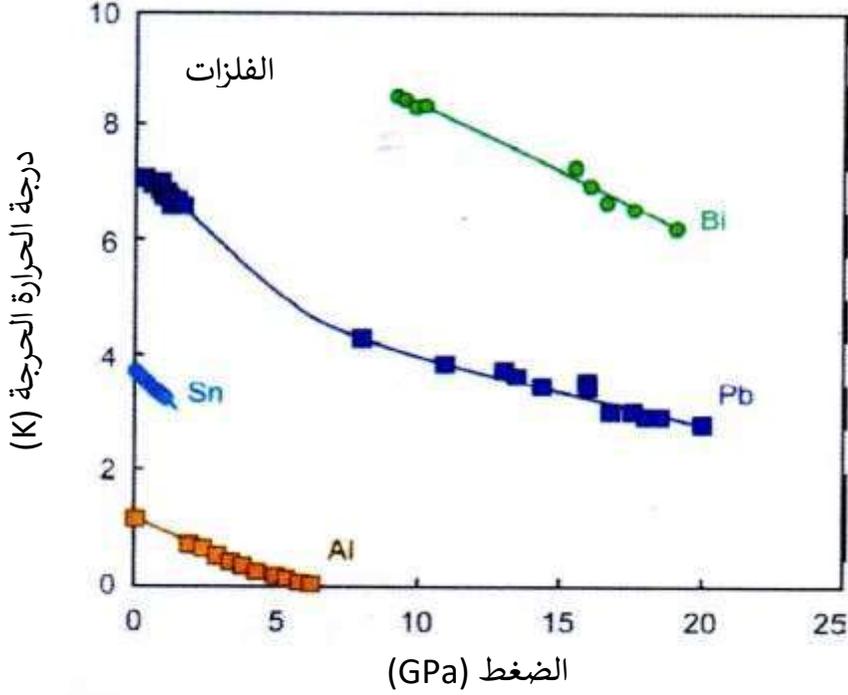
البلاديوم Palladium هو معدن مهم الخواص، ذو كثافة الكترونية
عالية وبسطح فريمي وطيف الفونون phonon، وهو ذو ازدواجية الكترون-
فون قوية وعالي الموصلية الفائقة وبدرجة تحول عالية- ان البلاديوم
Palladium يمكن أن يتحول إلى موصل فائق بدرجة حرارة حرجة عالية T_c
تساوي 3,2K.

٢-٣-٥ الفلزات (Metals):

ان المعادن أو الفلزات هي من المجموعات ١٥-١٣ التي
تشمل العناصر (Al, Ga, In, Tl, Sn, Pb, Bi) الواقعة على الحافة اليمنى
من المعادن الانتقالية في الجدول الدوري لها عدة خواص مشتركة:-
أولاً، جميعها ذات موصلية فائقة في الضغط الاعتيادي، ماعدا البزموث
(Bismuth) الذي يكون شبه فلز تقريباً.

ثانياً تنخفض درجات الحرارة الحرجة T_c للعناصر مع زيادة الضغط، كما
مبين في الشكل (٢-٨) أ للمعادن Al, Sn, Pb, Bi، أي يكون للمشتق

dT_c/dp القيم نفسها. بالإضافة إلى ذلك، يبدو أن درجة الحرارة الحرجة تزداد من المجموعة ١٣ إلى المجموعة ١٥.



الشكل (أ) (٢-٨) العلاقة بين الضغط ودرجة الحرارة للمعادلة ΔL , $B Pb^{-1}$

تكون الموصلية الفائقة الى:-

أ. الالمنيوم (Al) قليلة بدرجة حرارة حرجة T_c والتي تساوي ١,١٨K،
 وحين يكون في شكل سلك متوسط الصغر mesoscopic تكون
 مقاومتها في الذروة في حالة الموصلية الفائقة بالقرب من درجة
 الحرارة الحرجة T_c ، التي تُعزى إلى التذبذبات الحرارية المنتجة
 للانزلاقات الطورية لثابت الترتيب الفائق الموصلية.

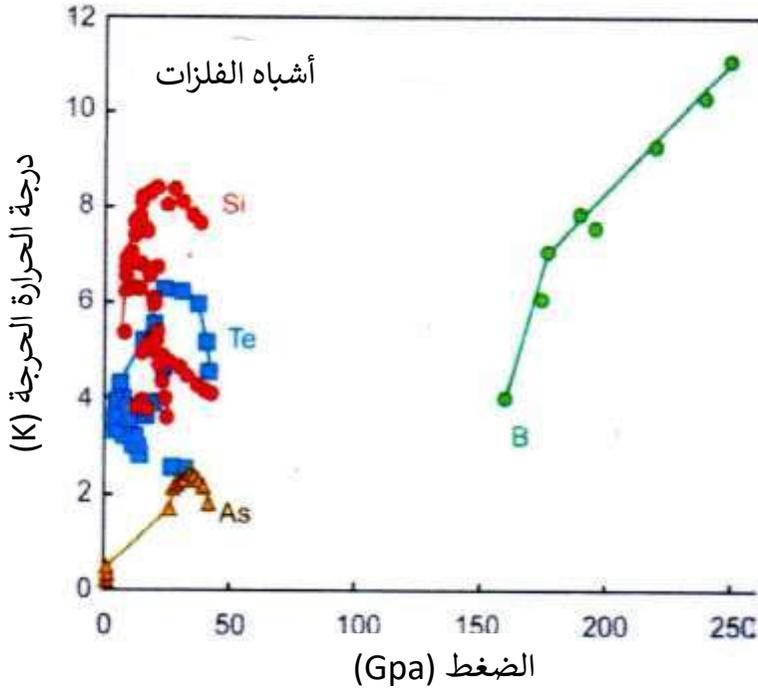
ب. للغاليوم (Gallium) بدرجة حرارة حرجة T_c هي $1,08K$ في الحالة الصلبة، وفي الشكل الغشائي اللابلوري، المكثف على مواد مبردة بسائل الهليوم، تصل درجة حرارته الحرجة إلى $8,6K$.

ج. البزموت (Bismuth) هو مثال لتلك العناصر التي لا تظهر موصلية فائقة تحت الظروف الاعتيادية، لكنه يمر بانتقالات طورية فائقة الموصلية في طور الـ fcc بعد خضوعه لضغط هايدروستاتي. وللبزموت (Bi) موصلية فائقة مع درجة حرارة حرجة T_c من $8,7K$ عند ضغط $9GPa$ ، ودرجة حرارة حرجة $T_c=4K$ في الشكل الغشائي الرقيق على مواد Ni، ومع درجة حرارة حرجة $T_c=6,2K$ عند اللاتبلور.

٢-٣-٦ أشباه الفلزات (Semi-metals):

تكمن الخاصية العامة لأشبه الفلزات في كونها لا تُظهر موصلية فائقة في الضغط الاعتيادي، بل تكون ذات موصلية فائقة عند الكبس، وتمتلك معظمها انتقالات طورية تركيبية ضمن مدى الضغط المدروس، وبدرجات حرارة حرجة (T_c) مختلفة. وكصفة مشتركة للسليكون Si، والزرنيخ As، والتلوريوم Te، تزداد درجة الحرارة الحرجة لكلٍ منهم مع الضغط، عند التشبع والهبوط كما موضح في الشكل (٧-٢ ب). وأشارت البحوث الحديثة حول الموصلية الفائقة في أخف أشباه الفلزات وهو البورون، التي لربما أُطلقت من خلال إعلان الموصلية الفائقة لـ MgB_2 في درجة حرارة $40K$ تقريباً، ان الاهتمام بفيزياء الموصلية الفائقة على مركبات ذات صلة بالبورون. وقد

لوحظت الموصلية الفائقة للبورون عند درجة حرارة حرجة قصوى هي 11,2K في ضغط 250 GPa، كما مبين في الشكل (٢-٨) ب.



الشكل (٢-٨) ب) يوضح اعتماد درجة الحرارة الحرجة T_c على الضغط لأشباه الفلزات (B, Si, As, Te)

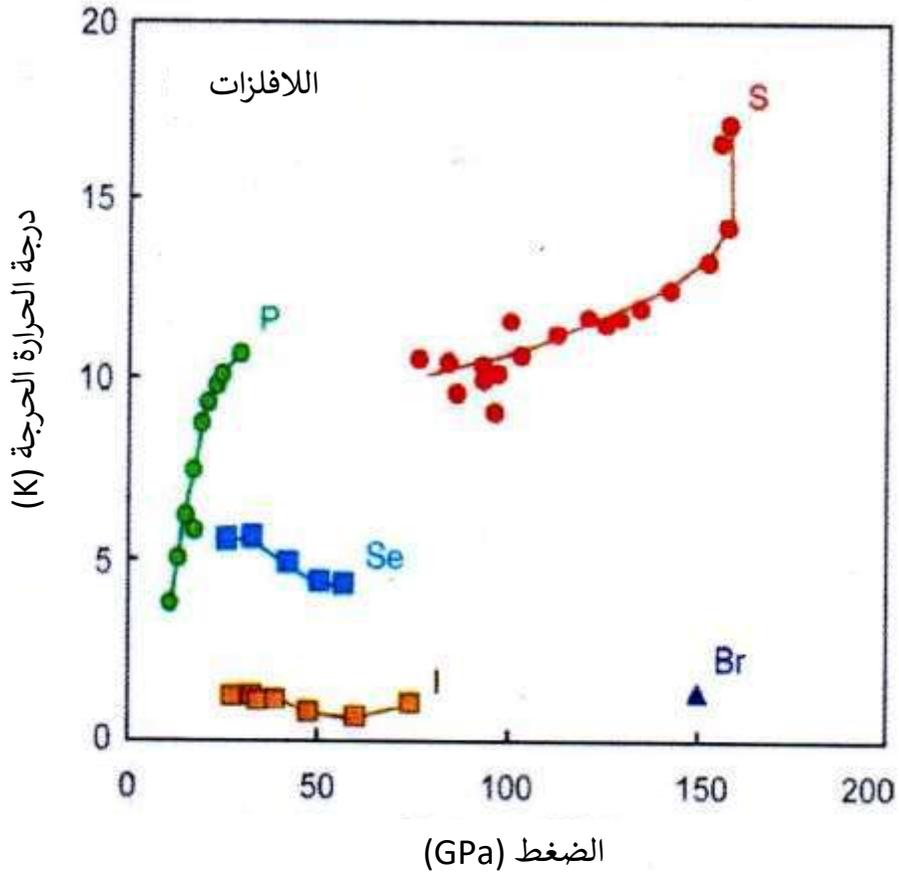
٢-٣-٧ المواد اللافلزية (Non-metal):

من بين المواد غير المعدنية:

١. الكربون (C) (بشكل الماس أو أنابيب نانوية)
٢. الأوكسجين (O_2)
٣. البروم (Br)
٤. الايودين (I₂)، وحديثاً تم تحويلهم إلى موصلات فائقة

٥. أما الفسفور (Phosphorus) والكبريت (Sulfur) (S) والسليسيوم (Selenium) (Se) تم تحويلهم إلى موصلات فائقة تحت الضغط والشكل (٨-٢ ب) يوضح ذلك، أما النيتروجين (Nitrogen) (N) فتم تحويله إلى شبه موصل تحت الضغط ولم يظهر أية موصلية فائقة. إن الكربون الموجود بعدة أشكال مختلفة والشكل المعروف منه الكرافيت (graphite) والماس (Diamond)، C_{60} الكروي (Buckminster-Fullerenes) (Carbon spheres) وكاربون الأنابيب النانوية والتي تم استخراجها من بياني صفائح الكرافيت، إن إمكانية الحصول على الموصلية الفائقة للأنابيب الكربونية النانوية اكتشفت عام ١٩٩٣ وبدرجة الحرارة الحرجة T_c والتي تتناسب عكسياً مع نصف قطر الأسلاك النانوية نتيجة تأثير تفاعل (الفونون-الالكترونون) (electron-phonon). في عام ٢٠٠١ تمكن كوسياك (Kociak) ومجموعته من الحصول على التوصيل الفائق تحت درجة حرارة حرجة T_c تساوي ٠,٥٥K من الأنابيب الكربونية النانوية أحادية الجدران وبمقاومة واطئة، وفي نفس العام نجح تانك ومجموعته (Tang et al) في ملاحظة الموصلية الفائقة في بعد واحد قطره ٠,٤nm وبدرجة حرارة حرجة T_c تساوي ١٥K بواسطة كبسولة في قناة بلورة الزيولايت (Zeolite) وبدرجة حرارة حرجة T_c تساوي ١٥K. إن اكتشاف الموصلية الفائقة في أنواع تركيب الماس يفترض أن Ge, Si ذات البلورات، يمكن أن تكون موصلية فائقة تحت شروط

التشويب. إن اكتشاف الموصلية الفائقة للفسفور (phosphorous) بدرجة حرارة حرجة تساوي ٥,٨K وتحت ضغط ١٧GPa وتزداد درجة حرارته الحرجة T_c تحت ضغط ٣٠GPa وبدرجة حرارة T_c تساوي ١٨K. إن درجة الحرارة الحرجة إلى الفسفور تحت الضغط تعتمد على مسلك مخطط الضغط و درجة الحرارة، إن الفسفور ذو الجسم الكتلي وتركيب معيني مستقيم (orthorhombic) أكثر شكلاً مستقراً تحت الشروط الاعتيادية، وعند زيادة الضغط في درجة الهليوم السائل يتحول الفسفور ذو الكتلة إلى طور معدني وبتركيب مكعب بسيط. وبدرجة حرارة حرجة T_c تساوي ١٠,٥K يستعمل الفسفور الأحمر تحت درجة حرارة حرجة T_c تساوي ٤,٥K كمعدن. وتزداد درجة الحرارة الحرجة T_c إلى ١٣K وإلى ١٨K تحت ضغط ٣٠GPa. تغير المقاومة الكهربائية مقابل درجة الحرارة الحرجة T_c تظهر هبوطاً مع سعة درجة الحرارة المحددة عند ١٨K ومقاومة صغرى عند ٨K، تم ملاحظة تركيب جديد bcc لنموذج حديدي فوق ضغط ٢٦,٣GPa.



الشكل (٩-٢) اعتماد درجة الحرارة الحرجة على الضغط للمواد غير الفلزية (P, S, Se, Br, I)

أول دراسة إلى الموصلية الفائقة إلى الكبريت (Sulfur) أجريت عام ١٩٧٨ تم توثيقها بتحويل إلى حالة الموصلية في ٥,٧K و ٩,٨K. الدراسات الحديثة عن مركب الكبريت (sulfur) بينت أن تحول العنصر إلى موصل فائق بدرجة حرارة T_c تزداد مع الضغط إلى ١,٧K في ضغط ١٠٦GPa شكل (٩-٢) إن نجاح البحوث في الموصلية الفائقة إلى مجموعة الهالوجين

(halogen)، حيث إن اليود (Iodine) والبروماينز (Bromines)، وفي حالة البروماينز تحت ضغط. الجزيء إلى طور الذرات الأحادية يحدث التحول تحت ضغط ٨٠ GPa وبضغط أعلى من ٩٠ GPa. إن البروماين (bromine) ذو التركيب bcc يصبح موصلًا. يظهر الأوكسجين خواص سالبة في الضغط الواطئ ولا يتوقع أن يصبح موصلًا فائقًا، وعند ضغط يزيد عن ٩٥ GPa، يتعرض الأوكسجين الجزيئي الصلب إلى طور تحولي ويصبح معدن تحت ضغط حوالي ١٠٠ GPa ويكون ذو موصلية فائقة، تحت درجة حرارة حرجة T_c تساوي ٠,٦ K. إن درجة تحول الأوكسجين إلى مركب أقل من عناصر (S, Se, Te) والتي تكون موصلية فائقة في درجات حرارة حرجة ٧,٤ K, ١٧,٧ K بالتتالي، وفي الغازات الثقيلة (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Ra) هي موصلات فائقة معروفة.

الفصل الثالث

أنواع (تصنيف) الموصلات الفائقة

(Types of superconductors)

١-٣ المقدمة : introduction

لا يوجد معيار واحد لتصنيف الموصلات الفائقة . ولكن يمكن الاعتماد على تصنيفها من خلال:

١ . خصائصها الفيزيائية: يمكن أن تكون من النوع الأول إذا كان التحول

الطوري من الدرجة الاولى (phase transition is first order) أو

النوع الثاني إذا كان التحول الطوري من الدرجة الثانية (phase

transition is second order)

٢ . نظرية تفسيرها: يمكن أن تكون تقليدية (النوع الأول إذا كانت موضحة

من قبل نظرية BCS أو مشتقاتها) أو غير تقليدية (النوع الثاني) إن لم

يكن.

٣ . درجة الحرارة الحرجة: يمكن أن تكون درجة الحرارة الحرجة منخفضة

(النوع الأول) أو درجة الحرارة مرتفعة (النوع الثاني) وعند الوصول إلى

حالة الموصلية الفائقة بالتبريد باستخدام النيتروجين السائل ، أي إذا كان

($T_c > 77 \text{ K}$)

٤ . المواد: يمكن أن تكون عناصر كيميائية (مثل الزئبق أو الرصاص) ،

أو السبائك (مثل النيوبيوم - تيتانيوم أو الجرمانيوم - النيوبيوم) أو

السيراميك (مثل YBCO أو ديبواريد المغنيسيوم) أو الموصلات الفائقة العضوية مثل الفوليرين.

٥. الاعتماد على الاستجابة إلى السلوك المغناطيسي. ان الموصلات الفائقة تصنف إلى نوعين هما النوع الأول والموضح في الجدول (٣-١)، والنوع الثاني كما موضح في الجدول (٣-٢)

٢-٣ الموصلات الفائقة النوع (Type-١ Superconductors)

مواد النوع الأول في حالة التوصيل الفائق هي كليا دايامغناطيسية، والتي تطرد دائما خطوط الفيض المغناطيسي عند تسليط مجال مغناطيسي خارجي عليها قبل رجوعها إلى الحالة الاعتيادي وتسمى هذه الظاهرة تأثير ميسنر (Meissner Effect) الموضحة في الشكل (٣-٢)، ويتكون من الفلزات (Metals) أو شبه الفلزات (عنصر له خصائص الفلزات واللافلزات) (Metalliods) والتي تظهر بعض الموصلية الفائقة في درجات حرارة الغرفة. عند الحاجة إلى برودة تؤدي إلى إبطاء تذبذب الالكترونات بصورة كافية لتسهيل جريان الالكترون وفقاً إلى نظرية BCS والتي افترضت أن مجاميع الالكترونات تكون أزواج كوبر (Cooper Pairs) لكي يساعد كل منهما الآخر لجعل الجزيئات غير معاقبة مثل سباق السيارات عند تقارب كل منهما الآخر لغرض الذهاب أسرع ما يمكن. إن شدة المجال المغناطيسي المستخدم Bc وشدة المجال البدائية Bo وهي القيمة الاستكمالية إلى Bc عند $T=0K$. ترتبط بقانون القطع المكافئ (Parabolic Law) المتمثل بالعلاقة الاتية:

$$B_C = B_0 \left[\left(1 - \frac{T}{T_0} \right)^2 \right]$$

حيث إن:

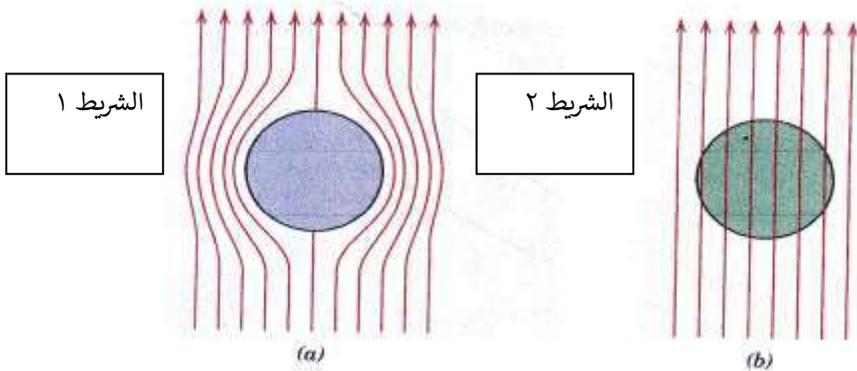
B_0 = شدة المجال المغناطيسي البدائي

B_c = شدة المجال المغناطيسي الحرج

T_0 = درجة الحرارة الأولية

T = الدرجة النهائية

معدا الفاناديوم Vanadium والنيوبيوم Niobium جميع العناصر هي نوع-1 وفق أسس الاستجابة المغناطيسية، ويكون النوع الاول مواد دايامغناطيسية (diamagnetic)، وعند استعمال المجالات المغناطيسية الخارجية تطرد هذه المواد خطوط المجال المغناطيسي خارجها. ولا تسمح لها بالمرور من داخلها هذه الحالة تسمى ظاهرة ميسنر (Meissner Effect) كما موضحة في الشكل (3-1)، حيث إن التيار المار في الموصل يولد مجالاً مغناطيسياً، وإن هذه المواد غير ملائمة لكثير من التطبيقات التي تحتاج إلى تيارات عالية وإن تلك التيارات ستعود على الموصل بالتدمير وإنهاء خاصية التوصيل.



الشكل (١-٣) يمثل تأثير ميسنر. (أ) بينما في حالة التوصيل الفائق، يبعد جسم المادة (الدائرة) المجال المغناطيسي (الأسهم) عن داخله. (ب) المجال المغناطيسي يخترق نفس جسم المادة حالما تصبح موصلة بشكل طبيعي

كما في الجدول رقم (١-٣):

(١) يمثل الموصلات الفائقة نوع-٣-١ الجدول)

Lead (Pb)	7.196 K	FCC
Lanthanum (La)	4.88 K	HEX
Tantalum (Ta)	4.47 K	BCC
Mercury (Hg)	4.15 K	RHL
Tin(Sn)	3.72 K	TET
Indium (In)	3.41 K	TET
Palladium (Pd)	3.3 K	(أنظر الملاحظة ١)
Chromium (Cr)	3 K	(أنظر الملاحظة ١)
Thallium (Tl)	2.38 K	HEX
Rhenium (Re)	1.697 K	HEX
Protactinium (Pa)	1.40 K	TET
Thorium (Th)	1.38 K	FCC
Aluminum (Al)	1.175 K	FCC
Gallium (Ga)	1.083 K	ORC

Molybdenum (Mo)	0.915 K	BCC
Zinc (Zn)	0.85 K	HEX
Osmium (Os)	0.66 K	HEX
Zirconium (Zr)	0.61 K	HEX
Americium (Am)	0.60 K	HEX
Cadmium (Cd)	0.517 K	HEX
Ruthenium (Ru)	0.49 K	HEX
Titanium (Ti)	0.40 K	HEX
Uranium (U)	0.20 K	ORC
Hafnium (Hf)	0.128 K	HEX
Iridium (Ir)	0.1125 K	FCC
Beryllium (Be)	0.023 K (SRM768)	HEX
Tungsten (W)	0.0154 K	BCC
Platinum (Pt)	0.0019 K	(أنظر الملاحظة ١)
Lithium (Li)	0.0004 K	BCC
Rhodium (Rh)	0.000325 K	FCC

الملاحظة ١: تعطى درجات الحرارة الحرجة Tc's للكروميوم السائب أو الكلي (شكل الفأ)، ماعدا البالاديوم الذي عُرض للإشعاع مع أيونات الهيليوم He، على انه غشاء رقيق، والبلاتين على انه مسحوق مدمج.

٣-٣ الموصلات الفائقة نوع-٢ (Type-٢ Superconductors)

ان الموصلات الفائقة النوع-٢ تتكون من مركبات فلزية، وسبائك ماعدا عناصر الفاناديوم (Vanadium) والتكنيتيوم (Technetium) والنيوبيوم (Niobium). إن الاكتشافات الحديثة للموصلات الفائقة تضمنت أكاسيد الفلزت الخزفية والتي تملك نسبة ذرتين من الفلز إلى ثلاث ذرات من الأوكسجين، والتي تخص مجموعة نوع-٢ من الجدول الدوري وتكون درجة حرارتها الحرجة عالية (T_c)، أكثر من الموصلات الفائقة نوع-١ وتظهر أكثر مجالات مغناطيسية بواسطة التقنيات التي لحد الان لم تفهم ، وربما تعزى إلى الانبعاث من الطبقات السطحية للتركيب الشبكي. افترضت البحوث التي اجريت خلال عام ١٩٨٣ أن الثقوب ناقصة الأوكسجين (hypocharged) من خزين الشحنات ذات درجات الحرارة العالية الحرجة T_c . إن درجات الحرارة العالية الحرجة T_c التي تم الوصول لها هي ٢٣K علما أنه إلى الان أعلى درجة حرارة حرجة ثم الوصول لها في الضغط الاعتيادي للفلزت والتي تشكل فلز نقي التركيب (Stoichiometry) تساوي (-158°C) وكذلك للفلزات التي لا تكون نقية التركيب . (No stoichiometry) إن أول موصل فائق نوع-٢ يتركب من سبيكة الرصاص Pb والبيزموت Bi ثم تحضيره عام ١٩٣٠ من قبل (J. Voogd, W. de Haas) وغير معتمد لحد الان، بعد ظاهرة ميسنر (Meissner Effect) كما في الشكل (٢-٣). والجدول (٢-٢) يشملان الموصلات الفائقة نوع-٢. إن النوع الجيد من أصناف الموصلات الفائقة تم اكتشافها من قبل العالم (L.V.

(Shubnikov) عام ١٩٣٦ عندما وجد مجالين مغناطيسيين حرجين هما BC_1 , BC_2 إلى $(PbTi_2)$. أن أول موصل فائق من الأوكسايد اكتشف عام ١٩٧٢ من قبل العالم (Dupont) من مركب $Ba(PbBi)O_2$ وبدرجة حرارة حرجة (T_c) تساوي ١٣K. ومن ثم تلاها اكتساب الموصلية الفائقة لمركبات خارج مركبات النحاس (Oxocuprate). تسمى الموصلات الفائقة نوع-٢ تسمى بالموصلات الفائقة الصلبة (Hard) والمختلفة عن الموصلات الفائقة نوع-١ عند تحولها من الحالة الاعتيادية إلى الحالة الموصلية الفائقة بتدرجها خلال منطقة الحالة المختلطة. إن الموصلات الفائقة نوع-٢ حتى في المجالات المغناطيسية العالية وعند نفوذ الفيض المغناطيسي، حيث يوجد مجالان حرجان وهما المجال الحرج الأسفل BC_1 والمجال الحرج الأعلى BC_2 . إن الفيض كلياً يطرد فقط عند أعلى مجال BC_2 . عند تطبيق مجال مشابه إلى BC_1 ، نوع-٢ ويسلكان نفس سلوك نوع-١ فوق BC_1 . وعند وصوله فوق BC_1 تعود المادة إلى الحالة الاعتيادية. إن الموصل الفائق نوع-٢ هو خليط حالة اعتيادية ومناطق فائقة التوصيل وتسمى أحياناً الدوامة (Vortex) لأن الدوامات (Vortices) الموصلات الفائقة، هي تيار يحيط بشعيرات أو أساس الفلز الاعتيادي بين (BC_1, BC_2). الجدول (٣-٢) والشكل (٣-١) يوضحان الموصلات الفائقة - ٢ .

٢ يمثل الموصلات الفائقة نوع-(٣-٢)الجدول

Sn ₇ Te ₇ Ba ₂ MnCu ₁₅ O ₃₀₊ (As an R212 structure)	+158 C
Sn ₇ SbTe ₆ Ba ₂ Mn Cu ₁₅ O ₃₀₊ (As an R212 structure)	+155 C
Sn ₁₀ SbTe ₄ Ba ₂ MnCu ₁₆ O ₃₂₊ (As a T212 structure)	+141C
Sn ₉ SbTe ₄ Ba ₂ MnCu ₁₅ O ₃₀₊ (As an R212 structure)	+136 C
Sn ₈ SbTe ₄ Ba ₂ MnCu ₁₄ O ₂₈₊ (As a P212 structure)	+129 C
Sn ₉ SbTe ₃ Ba ₂ MnCu ₁₄ O ₂₈₊ (As a P2I2 structure)	+121C
Sn ₉ Te ₃ Ba ₂ MnCu ₁₃ O ₂₆₊ (As an N212 structure)	+119 C
Sn ₉ Te ₃ Ba ₂ MnCu ₁₃ O ₂₆₊ (As an N212 structure)	+110 C
Sn ₅ Sb ₅ Ba ₂ MnCu ₁₁ O ₂₂₊ (As a J212 structure)	+95 C
Tl ₇ Sn ₂ Ba ₂ MnCu ₁₀ O ₂₀₊ (As an H212 structure)	+77 C
Tl ₇ Sn ₂ Ba ₂ MnCu ₁₀ O ₂₀₊ (As an H212 structure)	+65 C
Tl ₆ Sn ₂ Ba ₂ TiCu ₉ O ₁₈₊ (As an F212 structure)	+56 C
Tl ₇ Sn ₂ Ba ₂ SiCu ₁₀ O ₂₀₊ (As an H212 structure)	+53 C

Tl ₆ Ba ₄ SiCu ₉ O ₁₈₊ (As an F212 structure)	+48 C
Tl ₅ Ba ₄ SiCu ₈ O ₁₆₊ (As a D212 structure)	+44 C
(Tl ₅ Sn ₂)Ba ₂ SiCu ₈ O ₁₆₊ (As a D212 structure)	+42 C
(Tl ₅ Pb ₂)Ba ₂ SiCu ₈ O ₁₆₊ (As a D212 structure)	+38 C
(Tl ₅ Pb ₂)Ba ₂ Si _{2.5} Cu _{8.5} O ₁₇₊ (As a D223 structure)	+35 C
(Tl ₅ Pb ₂)Ba ₂ Mg _{2.5} Cu _{8.5} O ₁₇₊ (As a D223 structure)	+30 C
(Tl ₅ Pb ₂)Ba ₂ Mg ₂ Cu ₉ O ₁₈₊ (As a D223 structure)	+28 C
(Tl ₅ Pb ₂)Ba ₂ MgCu ₁₀ O ₂₀₊ (As a D223 structure)	+18 C
(Tl ₄ Pb)Ba ₂ MgCu ₈ O ₁₃₊ (As a 9223 structure)	+3 C
(Tl ₄ Ba)Ba ₂ MgCu ₈ O ₁₃₊ (As a 9223 structure)	~265 K
(Tl ₄ Ba)Ba ₂ Mg ₂ Cu ₇ O ₁₃₊ (As a 9223 structure)	~258 K
(Tl ₄ Ba)Ba ₂ Ca ₂ Cu ₇ O ₁₃₊ (As a 9223 structure)	~254 K
(Tl ₄ Ba)Ba ₄ Ca ₂ Cu ₁₀ O _y (As a 9212/2212C intergrowth.)	~242 K
Tl ₅ Ba ₄ Ca ₂ Cu ₁₀ O _y (As a 9212/2212C intergrowth.)	~233 K

(Sn ₅ In)Ba ₄ Ca ₂ Cu ₁₁ O _y (As a B212/2212C intergrowth.)	~218 K
(Sn ₅ In)Ba ₄ Ca ₂ Cu ₁₀ O _y (As a B212/1212C intergrowth.)	~212 K
Sn ₆ Ba ₄ Ca ₂ Cu ₁₀ O _y (As a B212/1212C intergrowth.)	~200 K
(Sn _{1.0} Pb _{0.5} In _{0.5})Ba ₄ Tm ₆ Cu ₈ O ₂₂₊ (As a 1256/1212 intergrowth.)	~195 K
(Sn _{1.0} Pb _{0.5} In _{0.5})Ba ₄ Tm ₅ Cu ₇ O ₂₀₊ (As a 1245/1212 intergrowth.)	~185 K
(Sn _{1.0} Pb _{0.5} In _{0.5})Ba ₄ Tm ₄ Cu ₆ O ₁₈₊ (As a 1234/1212 intergrowth)	~163 K
Sn ₃ Ba ₄ Ca ₂ Cu ₇ O _y (As a 5212/1212C intergrowth.)	~160 K
(Hg _{0.8} Tl _{0.2})Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8.33}	138 K
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	133–135 K
HgBa ₂ Ca ₃ Cu ₄ O ₊₀₁	125–126 K
HgBa ₂ (Ca _{1-x} Sr _x)Cu ₂ O ₆₊	123–125 K
HgBa ₂ CuO ₄₊	94–98 K

الشبيكة: TET

* ملاحظة: نتيجة "العيب" طوبولوجي، كذلك سيذهب الزئبق إلى المواقع الذرية للنحاس. بالتالي، يكون الجزء الحجمي من نوع التركيب المقصود ٣٠-١٥% فقط من الكتلة.

$Tl_2Ba_2TeCu_3O_8$	147K(Superconductors.ORG-2016)
$Tl_2Ba_2YCu_2O_6$	139K(Superconductors.ORG-2016)
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	127-128 K
$(Tl_{1.6}Hg_{0.4})Ba_2Ca_2Cu_3O_{10+}$	126 K
$TlBa_2Ca_2Cu_3O_{9+}$	123 K
$(TlSn)Ba_4TmCaCu_4O_{14+}$	121K(Superconductors.ORG-2005)
$(Tl_{0.5}Pb_{0.5})Sr_2Ca_2Cu_3O_9$	118-120 K
$Tl_2Ba_2CaCu_2O_6$	118 K
$TlBa_2Ca_3Cu_4O_{11}$	112 K
$(Tl_{0.5}Pb_{0.5}Sn)Ba_2Tm_3Cu_5O_{16+}$	105K(Superconductors.ORG-2011)
$TlBa_2CaCu_2O_{7+}$	103 K
$Tl_2Ba_2CuO_6$	95 K
$TlSnBa_4Y_2Cu_4O_x$	86K(Superconductors.ORG-2007)

TET: الشبكة

$\text{Sn}_4\text{Ba}_4(\text{Tm}_2\text{Ca})\text{Cu}_7\text{O}_x$	~127K (TmTm-Ca structure only)
$\text{Sn}_4\text{Ba}_4\text{TmCaCu}_6\text{O}_{16+}$	~115K(Superconductors.ORG-2005)
$\text{SnInBa}_4\text{Tm}_3\text{Cu}_5\text{O}_x$	~113K(Superconductors.ORG-2005)
$\text{Sn}_3\text{Ba}_4\text{Tm}_3\text{Cu}_6\text{O}_x$	109K(Superconductors-ORG-2007)
$\text{Sn}_3\text{Ba}_8\text{Ca}_4\text{Cu}_{11}\text{O}_x$	109K(One-of-a-kind Resonant-2006)
$\text{SnBa}_4\text{Y}_2\text{Cu}_5\text{O}_x$	107K(Superconductors.ORG-2007)
$\text{Sn}_4\text{Ba}_4\text{Tm}_2\text{YCu}_7\text{O}_x$	~104K(First Hi-Tc Reentrant-2007)
$\text{Sn}_4\text{Ba}_4\text{TmCaCu}_4\text{O}_x$	~100K(Superconductors.ORG-2007)
$\text{Sn}_4\text{Ba}_4\text{Tm}_3\text{Cu}_7\text{O}_x$	~98K(Superconductors.ORG-2006)
$\text{Sn}_2\text{Ba}_2(\text{Y}_{0.5}\text{Tm}_{0.5})\text{Cu}_3\text{O}_{8+}$	~96K(Supercondiictors.ORG-2007)
$\text{Sn}_3\text{Ba}_4\text{Y}_2\text{Cu}_5\text{O}_x$	~91K(Superconductors.ORG-2006)
$\text{SnInBa}_4\text{Tm}_4\text{Cu}_6\text{O}_x$	87K(Superconductors.ORG-2005)
$\text{Sn}_2\text{Ba}_2(\text{Sr}_{0.5}\text{Y}_{0.5})\text{Cu}_3\text{O}_8$	~86K(Aleksandrov, et al-

	1989)
$\text{Sn}_4\text{Ba}_4\text{Y}_3\text{Cu}_7\text{O}_x$	~80K(Superconductors.ORG-2005
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{TeCu}_3\text{O}_8$	139K(Superconductors.ORG-2016)
$\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.6}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Sb}_{0.1}\text{Cu}_3\text{O}_x$ ***	115K(thick film on MgO substrate)
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ***	110 K
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_9$ ***	110 K
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.8}\text{Y}_{0.2})\text{Cu}_2\text{O}_8$	95-96K
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	91-92K
$\text{BiSnBa}_4\text{TmCaCu}_4\text{O}_{14}$	83K(Superconductors.ORG-2012)

الشبكة: ORTH

*** رغم عدم إدراجها دائماً كمكون، إلا أن مقداراً صغيراً من الرصاص $(x=0.2-0.62)$ عادةً ما يُستخدم مع مركبات البزموت للمساعدة في تسهيل الحصول على طور بلوري ذي درجة حرارة حرجة T_c أعلى.

$\text{Cd}_3\text{CaCu}_4\text{O}_8$	187 K (Superconductors.ORG - 2016)
$\text{Cd}_2\text{CaCu}_3\text{O}_6$	153 K (Superconductors.ORG -2016)

$\text{CdCaCu}_2\text{O}_4$	123 K (Superconductors.ORG -2016)
$\text{CaSrCu}_2\text{O}_4$	110 K
$\text{YSrCa}_2\text{Cu}_4\text{O}_{8+}$	101 K (Superconductors.ORG -2007)
$(\text{Ba},\text{Sr})\text{CuO}_2$	90 K
$\text{BaSr}_2\text{CaCu}_4\text{O}_{8+}$	90 K (Superconductors.ORG - 2007)
$(\text{La},\text{Sr})\text{CuO}_2$	42 K

* المركبات الثمانية أعلاه جميعها "طبقة لا متناهية".

$\text{Pb}_3\text{Sr}_4\text{Ca}_3\text{Cu}_6\text{O}_x$	106K(Superconductors.ORG-2007)
$\text{Pb}_3\text{Sr}_4\text{Ca}_2\text{Cu}_5\text{O}_{15+}$	101K(Superconductors.ORG-2005)
$(\text{Pb}_{1.5}\text{Sn}_{1.5})\text{Sr}_4\text{Ca}_2\text{Cu}_5\text{O}_{15+}$	~95K(Supercondiictors.ORG-2006)
$\text{Pb}_2\text{Sr}_2(\text{Ca}, \text{Y})\text{Cu}_3\text{O}_8$	70K (Cava, et al-1989)
$\text{AuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$	99 K (Kopnin, et al., 2001)
$\text{AuBa}_2(\text{Y},\text{Ca})\text{Cu}_2\text{O}_7$	82 K
$\text{AuBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$	30 K

الشبكة: ORTH

CdNbBa ₉ Cu ₁₀ O ₂₀₊ (F212C structure)	337K(Superconductors.ORG- 2016)
TiBa ₉ Cu ₁₀ O ₂₀₊ (F212C structure)	331K (Superconductors.ORG- 2015)
VBa ₉ Cu ₁₀ O ₂₀₊ (F212C structure)	327K (Superconductors.ORG- 2015)
ZrBa ₉ Cu ₁₀ O ₂₀₊ (F212C structure)	322K(Superconductors.ORG- 2015)
NbBa ₉ Cu ₁₀ O ₂₀₊ (F212C structure)	314K(Superconductors.ORG- 2015)
TeBa ₁₀ Cu ₁₁ O ₂₂₊ (H212C structure)	313K(Superconductors.ORG- 2015)
TaBa ₉ Cu ₁₀ O ₂₀₊ (F212C structure)	313K(Superconductors.ORG- 2015)
	307K(Superconductors.ORG- 2015)
	255K(Superconductors.ORG- 2013)
	255K(Superconductors.ORG- 2014)

	177K(Superconductors.ORG–2009)
	107K(Superconductors.ORG–2010)
	106K(Superconductors.ORG–2005)
	104K(Superconductors.ORG–2005)
YBa ₁₀ Cu ₁₂ O ₂₅₊ (H212C structure)	104K(Superconduetors.ORG–2008)
TaBa ₇ Cu ₈ O _x (B212C structure)	104K(Superconductors.ORG–2012)
TeBa ₇ Cu ₈ O _x (B212C structure)	99 K(Superconductors.ORG–2014)
YBa ₃ Cu ₄ O _x (9223C structure)	99 K(Superconductors.ORG–2010)
YCaBa ₃ Cu ₅ O ₁₁₊	98 K(Superconductors.ORG–2013)
(Y _{0.5} Lu _{0.5})Ba ₂ Cu ₃ O ₇	97 K(Superconductors.ORG–2005)

$(Y_{0.5}Tm_{0.5})Ba_2Cu_3O_7$	96 K(Superconductors.ORG-2006)
$Y_3Ba_5Cu_8O_{18+}$	97 K(Superconductors.ORG-2005)
$Y_2Ba_5Cu_8O_{17+}$	96 K(Superconductors.ORG-2005)
$TeCaBa_4Cu_6O_{16+}$	96 K(Superconductors.ORG-2005)
$Y_3CaBa_4Cu_8O_{18+}$	96 K(Superconductors.ORG-2005)
$TeBa_3Cu_4O_x$	96 K(Superconductors.ORG-2005)
$(Y_{0.5}Gd_{0.5})Ba_2Cu_3O_7$	96 K(Superconductors.ORG-2008)
$Y_2CaBa_4Cu_7O_{16}$	
$Y_3Ba_4Cu_7O_{16}$	96 K
$Y_2Ba_5Cu_7O_x$	95K
$NdBa_2Cu_3O_7$	94K
$Y_2Ba_4Cu_7O_{15}$	92K
$GdBa_2Cu_3O_7$	90K

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	89K
$\text{TmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	62K
$\text{YbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	
$\text{YSr}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	

الشبيكة: TET

ملاحظة: لجميع المركبات أعلاه نوع بنية سلسلة النحاس.

$\text{GaSr}_2(\text{Ca}_{0.5}\text{Tm}_{0.5})\text{Cu}_2\text{O}_7$	99K(Superconductors.ORG -2006)
$\text{Ga}_2\text{Sr}_4\text{Y}_2\text{CaCu}_5\text{O}_x$	85K(Superconductors.ORG -2006)
$\text{Ga}_2\text{Sr}_4\text{Tm}_2\text{CaCu}_5\text{O}_x$	81K(Superconductors.ORG -2006)
$\text{La}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_5\text{O}_{+9}$	79K(Saurashtra Univ.,Rajkot,India-2002)
$(\text{Sr,Ca})_5\text{Cu}_4\text{O}_{10}$	70 K
$\text{GaSr}_2(\text{Ca,Y})\text{Cu}_2\text{O}_7$	70 K
$(\text{In}_{0.3}\text{Pb}_{0.7})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.8}\text{Y}_{0.2})\text{Cu}_2\text{O}_x$	60 K
$(\text{La,Sr,Ca})_3\text{Cu}_2\text{O}_6$	58 K

$\text{La}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+}$	45 K
$(\text{Eu,Ce})_2(\text{Ba,Eu})_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+}$	43 K
$(\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15})\text{CuO}_4$	40 K
SrNdCuO^{****}	40 K
$(\text{La,Ba})_2\text{CuO}_4$	35–38 K
PuCoGa_5	18.5K (First SC transuranic compound)
NbN	16.1 K

ملاحظة: بعد NbTi (في الأسفل) يكون NbN الموصل الفائق ذا درجة الحرارة المنخفضة الأوسع استخداماً.

$\text{Nb}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}$	9.8 K (First superconductive wire)
MgCNi_3	7–8K (First all-metal perovskite superconductor)

C	15 K	(as highly-aligned, single-walled nanotubes)
Nb	9.25 K	
Tc	7.80 K	
V	5.40 K	

الشبيكة: C=Fullerene, Nb=BCC, Tc=HEX, V=BCC

ملاحظة: هذه الأربعة هي الموصلات الفائقة من النوع-٢ العنصرية الوحيدة .

$\text{RuSr}_2(\text{Gd}, \text{Eu}, \text{Sm})\text{Cu}_2\text{O}_8$	Tc~58K(Ruthenium-oxocuprate)
$\text{ErNi}_2\text{B}_2\text{C}$	Tc 10.5K(Nickel-Borocarbide)
YbPd_2Sn	Tc~2.5K(Heusler compound)
UGe_2	Tc~1K(Heavy fermion)
URhGe_2	Tc~1K(")
AuIn_3	Tc 50 uK

ملاحظة: المركبات التسعة أعلاه كلها موصلات فائقة ذات مغناطيسية حديدية نادرة .

$\text{Sr}_{.08}\text{WO}_3$	2-4 K (Tungsten-bronze)
$\text{Tl}_{.30}\text{WO}_3$	2.0-2.14 K (")
$\text{Rb}_{.27-,29}\text{WO}_3$	1.98 K (")
$(\text{Nd}, \text{Sr}, \text{Ce})_2\text{CuO}_4$	35 K
$\text{Pb}_2(\text{Sr}, \text{La})_2\text{Cu}_2\text{O}_6$	32 K
$(\text{La}_{1.85}\text{Ba}_{.15})\text{CuO}_4$	30K(First HTS ceramic SC discovered-1986)

*** اكتشف الموصل الفائق السيراميكي الأول بدون طبقة أوكسيدية غير فائقة التوصيل .

ملاحظة: جميع ما ذكر أعلاه هي بيروفسكيتات النحاس، حتى لو كانت نسب الفلز إلى الأوكسجين الخاصة بها ليست بالضبط ٢-إلى-٣.

GdFeAsO _{1-x}	53.5K(Highest Tc iron-based compound)
(Ca,Sr,Ba)Fe ₂ As ₂	38 K
LiFeAs	18 K

ملاحظة: المذكورة أعلاه هي أعضاء عائلة بنكتيد (pnictide) الحديد المكتشفة حديثاً.

MgB ₂	39 K (Highest Tc Non-Fullerene Alloy)
Ba _{0.6} K _{0.4} BiO ₃	30 K (First 4th order phase compound)
Nb ₃ Ge	23.2 K

Nb ₃ Si	19 K
Nb ₃ Sn	18.1 K
Nb ₃ Al	18 K

V ₃ Si	17.1 K
Ta ₃ Pb	17 K
V ₃ Ga	16.8 K
Nb ₃ Ga	14.5 K
V ₃ In	13.9 K

الشبيكة: A١٥

من بين المديات الثنائية، هذه بعض أفضل المديات؛ التي تجمع مجموعة فلزت B٥ بنسبة ٣-إلى-١ مع عناصر A٤ أو A٣.

الشبيكة: TET

SrTiO₃ 0.35 K

هذا أول عازل أوكسيدي وُجِدَ بأنه فائق التوصيل.

٣-٤ الاختلاف بين الموصلات الفائقة النوع الاول والثاني

The Difference between superconductor type-1 and type-2

هنالك ثلاثون نوعاً من المعادن النقية التي تمتاز بظهور مقاومة كهربائية مساوية للصفر، في حالة تبريدها الى درجات حرارة واطئة وكذلك تمتاز بخاصية مميزة اخرى وهي طردها للمجال المغناطيسي من داخلها عند تحولها من الحالة الطبيعية الى الحالة فائقة التوصيل (تأثير مازنر)، وهذه المعادن تسمى بالموصلات الفائقة من النوع الاول (Type I)

(Superconductors) ، ان التوصيلية الفائقة توجد فقط عند درجات الحرارة الاقل من درجات الحرارة الحرجة وعندما يكون المجال المغناطيسي اقل قيمة من المجال المغناطيسي الحرج، وقد وصف النوع الاول من الموصلات الفائقة بصورة جيدة من قبل نظرية (BCS) والتي تعتمد على الازدواج الألكتروني بواسطة تفاعل اهتزازت الشبكة. ان النوع الاول من الموصلات الفائقة تكون ذات فائدة عملية محدودة بسبب ان المجالات المغناطيسية الحرجة تكون صغيرة جداً والحالات فائقة التوصيل تختفي بصورة مفاجئة عند درجات الحرارة الحرجة. الموصلات الفائقة ويسمى في بعض الاحيان بالموصلات الفائقة الرخوة (Soft-Superconductors) بينما تسمى الموصلات الفائقة من النوع الثاني تسمى بالموصلات الصلبة (Hard-Superconductors) والتي تبقى الحالات فائقة التوصيل عند درجات حرارة عالية ومجالات مغناطيسية عالية. ان النوع الثاني من الموصلات الفائقة كانت بدايته في عام ١٩٣٠ مع سباتك (بزموت- رصاص)، حيث ان العديد من السباتك والمركبات وجد انها تظهر الخاصية فائقة التوصيل، وقد ظهرت بانها تمتاز بمجالات حرجة اعلى بكثير وانها تستطيع حمل كثافات تيار عالية جداً بينما هي في الحالة فائقة التوصيل. ان الموصلات الفائقة من النوع الثاني بالاضافة الى كونها اشد صلابة ميكانيكياً من النوع الاول ولكنها تظهر مجالات مغناطيسية حرجة اعلى بكثير من تلك التي ممكن ان تظهر في النوع الاول مثل سبيكة (النيوبيوم-تيتانيوم) (NbTi) والتي تستعمل في بناء المغناط فائقة التوصيل ذات المجالات العالية.

وفي النوع الثاني من الموصلات الفائقة وعندما يكون المجال المغناطيسي بين المجالين المغناطيسيين الحرجين فان الموصل الفائق يكون في الحالة المختلطة (Mixed State) التي تسمى بالحالة الدوامية (Vortex State) والتي تكون فيها العديد من اللباب للمادة الطبيعية محاطة بالمادة فائقة التوصيل وعند زيادة المجال المغناطيسي فان الدوامات في الموصلات الفائقة تزداد لغاية ان تعود المادة فائقة التوصيل الى حالتها الطبيعية.

ان النوع الثاني من الموصلات الفائقة هو عبارة عن سبائك ومركبات ماعدا سبائك ومركبات النيوبيوم والفانديوم، والخلاصة فان النوع الاول يمتاز بالخواص الاتية:

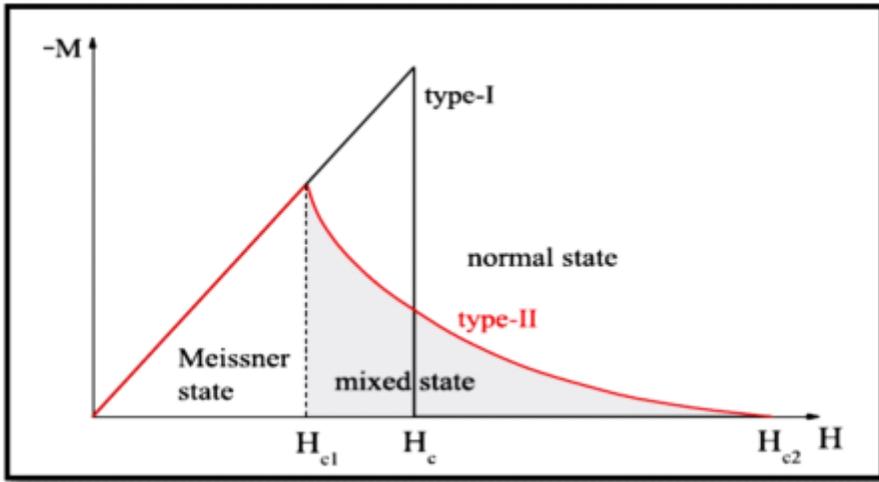
١. ان طول التشاكة (ξ) الذي هو خاصية لحجم دالة الموجة للزوج الالكتروني هو اطول من عمق الاختراق (λ).
٢. ان معامل كينزيبيرك-لانداو هو ($K < 1/\sqrt{2}$).
٣. يظهر استجابة تامة لتأثير مازنر.
٤. توجد له قيمة مجال مغناطيسي حرجة واحدة هي (H_c) وتكون واطئة جداً بحدود ($0,1 T$)
٥. لقيمة اقل من (H_c) فان المادة تكون فائقة التوصيل واعلى منها تكون المادة في حالتها الطبيعية.

اما بالنسبة للنوع الثاني فانه يمتاز بالخواص الاتية:

١. ان طول التشاكة (ξ) يكون اقل من عمق الاختراق (λ).
٢. ان معامل كينزيبيرك-لانداو هو ($K < 1/\sqrt{2}$).

٣. لا يظهر استجابة كاملة لتأثير مازنر.

٤. توجد له قيمتان للمجالات المغناطيسية الحرجة هما (H_{C1}, H_{C2}) وتكون قيمة (H_{C1}) اقل من قيمة (H_{C2}) وممكن ان تصل قيمة المجال الحرج في النوع الثاني بحدود (100) مرة اكبر من المجال الحرج في النوع الاول. وقد لوحظ ان قيمة (H_{C2}) وصلت الى اكثر من $(30T)$ ، والشكل (٢-٣) يظهر منحنى التمهبط للموصلات الفائقة بنوعها الاول والثاني.



الشكل (٢-٣) منحنى التمهبط للموصلات الفائقة النوع الاول والنوع الثاني.

الفصل الرابع

الجوانب التركيبية الأساسية للكوبريت ذي درجة الحرارة الحرجة T_c
العالية

(Basic Structural Aspects of High T_c Cuprates)

٤-١ المقدمة (Introduction):

إنّ الموصلات الفائقة للكوبريت مثل (La-M-Cu-O)،
و (Y-Ba-Cu-O)، و (Bi-Sr-Ca-Cu-O)، و (Tl-Ba-Ca-Cu-O) درست
بشكل واسع النطاق من قبل عدة جماعات. والثقوب هي أغلبية الحاملات
الحالية في هذه الأنظمة. ان الموصلات الفائقة تمتلك تركيبة بلورية شائعة
تعرف بتركيب البيروفسكايت، هذه التسمية جاءت من التركيب المعدني
(CaTiO_3). أن الاهتمام التكنولوجي والتقني لهذه المواد نجم عن اكتشاف
الخاصية الفيروكهربائية القوية للمركب (BaTiO_2) والتي اعتقدت علماً بأن
هذه المواد ليست معدنية. يمكن تمثيل جميع المواد الفائقة التوصيل
بالصيغة ($A_mE_nR_{n-1}Cu_nO_{2n+m+1}$) ومن خلال دراستنا الحالية
نجد أن

($m = 1, 2$) ($R = \text{Ca}$), ($E = \text{Ba}$), ($A = \text{Hg}, \text{Bi}, \text{Pb}, \text{Y}$)
(CuO_2) (عدد من 1 إلى n لكل وحدة خلية) تفصل من خلال R. ويمكن
وصف تركيب الموصلات الفائقة (Cuprates) والتي من ضمنها المركبات
في الدراسة الحالية، (Hg - base base)، (Bi - base)، (Pb - base)

(Y-base) على انها تراكيب بيروفسكايت تتضمن كتلاً عازلة وطبقات فائقة التوصيل التي تتناوب في الترتيب فيما بينها. هذه الكتل العازلة تمتلك تركيب (RS) (Rock Salt) وطبقة واحدة من الموصلات الفائقة ذات التركيب البيروفسكايت (P). ان اضطراب الشبكة سببه الاختلاف في طول اصرة (Bi-O) (المركب ذو Bi-base كمثل) التي تكمن في تركيب (RS) وكذلك طول الاصرة (Cu-O) والتي تكمن في تركيب (P) وهو المسؤول عن زعزعة وعدم استقرارية الأطوار فائقة التوصيل.

٤-٢ الأوكسيدات الفائقة التوصيل (Superconducting Oxides):

يُعتَقَد بأن الحالة الاعتيادية والخصائص التوصيلية تنشأ من الحركة وقوة الارتباط لحاملات الشحنة الالكترونية (الالكترونات أو الثقوب) في مستويات ثاني أوكسيد النحاس (CuO_2) التي تحدد بالأساس (HTSC) الكوبريت الطبقية. وتوفر الكاتيونات الأخرى وذرة الأوكسجين في التركيب الاستقرار التركيبي وتسيطر على عدد حاملات الشحنة في مستويات الـ (CuO_2). حرفياً، وايضاً تركيب المئات من مركبات مستوية لثاني أوكسيد النحاس (CuO_2) الفائقة التوصيل الجديدة فعلاً، ومعظمها متباينات تبادلية لحوالي إثني عشر تركيب كيميائي أساسي. ولحد الآن أظهرت جميع الأوكسيدات ذات درجة الحرارة الحرجة العالية (أي، $T_c > 50 \text{ K}$) بأنها تحتوي على النحاس جنباً إلى جنب مع اثنين أو ثلاثة أوكسيدات فلزية أخرى. وفيما يأتي ملخص لوصف

مُحدّث عن بعض المواد الفائقة التوصيل مع تشديد خاص على طبيعة التركيب البلوري والخصائص الفيزيائية:

إن المادة التي تلقت أكبر الاهتمام إلى هذا التاريخ هي $(YBa_2Cu_3O_{7-x})$. وتركيبها البلوري معيني مستقيم، مع $a=b$ و $c=3a$. وهذا يُنشئ لاختلاف في الخصائص الفائقة التوصيل. وتشير دراسة تفصيلية أجراها تشو Chu وجماعته في منظومة الـ $(Rb_{2-x}Cu_3O_{7-x})$ مع $(R=La, Nd, Sm, Eu, Gd, Ho, Er, Lu \text{ \& } Y)$ إلى أن ذرات النحاس مستوية-مربعة فريدة، كل منها محاط بأربع أو ست ذرات أوكسجين تكون حرجة على التوصيلية الفائقة للأوكسيدات بشكلٍ عام. ويمكن ربط التوصيلية الفائقة فوق $90K$ على نحوٍ خاص بشبه تجميع ثنائي البعد لطبقات $(CuO_2-Ba-CuO_{2+x}-Ba-CuO_2)$ التي تقاطعها طبقات R على طول محور c- فقط، مع تشديد خاص على طبقات (CuO_{2+x}) ، في حين توفر طبقات الـ (CuO_2) حجاباً واقٍ من طبقات R. كذلك قد يؤدي ترتيب ذرات R و Ba دوراً في درجة الحرارة الحرجة T_c العالية. وقد توفر المركبات ذات طبقات (CuO_2) الأكثر المقترنة بذرات Ba أكثر الطرق لدرجة حرارة حرجة T_c أعلى. وتكون درجة الحرارة الحرجة T_c حساسة جداً لمحتويات الأوكسجين وكذلك يُعرّف من دراسات حيود النيوترون أنّ الـ T_c تكون قصوى حين يتم ترتيب فراغات الأوكسجين. وبالاعتماد على قيم x في $(YBa_2Cu_3O_{7+x})$ ، يتأثر التركيب والخصائص الفيزيائية بما في ذلك التوصيلية الفائقة بشكلٍ مفاجئٍ وعنيف. وجميع هذه الملاحظات متسقة مع

طبقات النحاس-الأوكسجين المُعابة أو الناقصة المسؤولة عن التوصيلية الفائقة في هذه المواد.

برزت بعض التصنيفات المثيرة للاهتمام من دراساتٍ عن مركبات البزموت والثاليوم. ففي عام ١٩٨٨، قُدمت تقارير عن التوصيلية الفائقة في أنظمة الأوكسجين القائمة على Bi, Cu وأيونات أرضية القلوية. وهذه المركبات لا تحتوي على عناصر أرضية نادرة مثل العناصر السابقة. فهي تنتمي إلى عائلة تركيبية ذات الصيغة المثالية $(\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+8})$ الحاوية على عدد متغير، n ، من طبقات (Cu-O) للنحاس. وقد تم تحديد ثلاثة أطوار فائقة التوصيل إلى حد الآن. عادةً ما يُشار إليها بدرجة حرارتها الحرجة للانتقال الفائقة التوصيل أو بنيتها الذرية، مثلاً، (١) طور الـ 110K أو 2223 ، (٢) طور الـ 80K أو 2212 و(٣) طور الـ 10K أو 2201 . وأُشرت دراسة البنية بأشعة اكس $x\text{-ray}$ ، والمجهر الإلكتروني العالي الدقة والحيود النيوتروني أنّ المركب يُظهر التركيب الرباعي الزوايا الزائف مع محور c -الكبير بسبب العدد المتغير لمستويات الـ (Cu-O) . ولطور الـ 110K ثلاثة مستويات من (Cu-O) ، ولـ 80K مستويين من (Cu-O) ولـ 10K مستوي واحد فقط.

في منظومة الثاليوم، هناك سلسلتان من المركبات هما $(\text{Tl}_1\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+3})$ و $(\text{Tl}_1\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4})$ ($n = 1-5$)، يمكن نمذجتهما على انهما أملاح صخرية متداخلة وطبقات البيروفسكيت Perovskite الناقصة أو المُعابة. على سبيل المثال، يمكن اعتبار

$TiBa_2CuO_6$ على انه طبقة من أوكسيد النحاس مشطور بين طبقتين من أوكسيد الباريوم، الذي بدوره يكون مشطوراً بين طبقتين من أوكسيد الثاليوم. وهذا المركب، ١٢٠١، ليس فائق التوصيل. ويمكن إدخال طبقة نحاس ثانية في السندويج المقدم؛ الذي يكون مفصلاً عن الأول بطبقة كالسيوم. وهذا يعطي مركب الـ ١٢١٢، الذي يمتلك درجة حرارة حرجة T_c من ٩٠K تقريباً. وتسمح طبقة الكالسيوم الثانية بإدخال طبقة نحاس ثالثة معطياً مركب الـ ١٢٢٣ مع زيادة الـ T_c إلى ١١٦K. فيكون للسلاسل المتطابقة من المركبات ذات طبقات الثاليوم المزدوجة قيم أعلى نوعاً ما من الـ T_c ، بالنسبة لـ ٢٢٢٣، تكون أعلى T_c عند ١٢٨K.

إن الزيادة في الـ T_c كلما أُدخل المزيد من طبقات النحاس إلى التركيب دعمت النظرية القائلة بأن الطريق إلى التوصيلية الفائقة لدرجة حرارة الغرفة يكمن في إضافة المزيد من طبقات النحاس إلى التركيب. وهذه الآمال خابت حين تم تحضير مركب الـ ١٢٤٥ و ٢٢٣٤ وُجِدَ بأنه يمتلك T_c لا تقل عن ١٢٠K و ١٠٢K على التوالي. بالتالي، سيبدو بأن الـ T_c قد رُفِعَت إلى الحد الأعلى في مركبات Tl_1 في أربع طبقات، وفي مركبات Tl_2 في ثلاث طبقات نحاس. ولكن توجد هناك صعوبة كبيرة في تحضير الشكل النقي لكل تركيب. في جميع هذه المركبات، تكون حالات النمو البيني مشتركة بشكل مناطق متبادلة من المتباينات المختلفة. ويمكن جعل المتباينات الطبقيّة الثلاث، التي تعطي أعلى T_c ، مستقرة من خلال استبدال بعض من البزموت أو الثاليوم بالرصااص.

في أواخر عام ١٩٨٨، اكتشف كافا وجماعته (Cava et al.) عائلة جديدة من الـ (HTSC) القائمة على أكسيد-النحاس مع درجة حرارة بدء فائقة التوصيل قريبة من ٧٧K. ويمكن التعبير عن المنظومة بـ $(\text{Pb}_x\text{Sr}_y(\text{R},\text{Ca})\text{Cu}_z\text{O}_{8+x})$ حيث (R=Y, Eu, Sm & Pr). ويختلف التركيب البلوري لهذه الأوكسيدات قليلاً عن الأوكسيدات الطبقيّة الفائقة التوصيل القائمة على البزموت Bi أو الثاليوم Tl. أي إن هناك مستويين من $(\text{Cu}-\text{O}_2)$ اللذين يقعان بين طبقتين متراصتين من الـ $(\text{PbO}-\text{Cu}-\text{PbO})$ في أوكسيدات النحاس الطبقيّة القائمة على الرصاص Pb. ويُعتدّ أنّ هذه الأوكسيدات مرشحات واعدة تماماً لموصل فائق جديد ذي T_c عالية تمتلك درجات حرارة حرجة أعلى من ١١٠K. ويكون التركيب معيني مستقيم مع مجموعة حيزية $C_{mmm}(D_{2h})$. ويؤدي ترتيب الأوكسجين في الـ $(\text{PbO}-\text{CuO}-\text{PbO})$ دوراً مهماً في حدوث التوصيلية الفائقة. إنّ الموصل الفائق $(\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4)$ بدرجة حرارة ٢٣K المعروف بأنه أحد الموصلات الفائقة للتركيب T' ٢١٤ التي اكتشفها توكورا وجماعته (Tokura et al.) جذب الاهتمام منذ أن أُشّرت قياسات النقل أنّ حاملات الشحنة هي الكترونات وليست ثقبوب كما في جميع الموصلات الفائقة للـ (HTSC) المكتشفة سابقاً. وبالنسبة لجميع تركيز السيريوم Ce المحتمل، تمتلك المادة تركيب T' رباعي الزوايا متمركز حول الجسم أو الهيكل مشابه لتركيب La_2CuO_4 ولكنه يختلف عنه من خلال انتقال ذرات الاوكسجين القمية إلى موقع ذي تماثل موقعي D_{2d} .

إن اكتشاف التوصيلية الفائقة عند 94K في مركب طبقة (CuO₂) المفردة (Hg-1201) HgBa₂CuO_{ε+x} وعند 133K في نظائره ذات الطبقتين والثلاث طبقات من النحاس (Hg-1212 و Hg-1223) له اهتمام متجدد في البحث عن موصلات فائقة جديدة ذات درجة حرارة حرجة T_c عالية. من الناحية التركيبية، تحتوي العدد (n) = 1، 2 أو 3 من صفائح أكسيد النحاس المتجاورة، مما يشكل سلسلة تركيبية (Hg₁Ba₂Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+2+d}). وكما في المواد المشابهة القائمة على الثاليوم والبزموت، فإن التوصيلية الفائقة بلا شك تتولد في طبقات أكسيد النحاس المشوبة (الثقب) الكترونياً. ومثل العائلات السابقة، للنظائر القائمة على الزئبق، درجة حرارة حرجة T_c، التي تزيد مع عدد الطبقات n، ذات القيم 133K & 110K، 90K للعدد n = 1، 2، و 3 على التوالي. وهذه القيم المرتفعة لاسيما بالنسبة للعضو النهائية ذي العدد = 1 (Hg-1201) الذي يمكن تركيبه واستعادته بسهولة، تفسر جزئياً إثارة التيار في هذا الحقل. والجذب الكامن الآخر هو تركيبها الرباعي الزوايا البسيط نسبياً الذي يفتقر إلى تعقّد سلاسل (Cu-O) في (Y-123) أو التضمينات الفائقة التركيب كما في (Bi-Sr-Ca-Cu-O). علاوةً على ذلك، فإن التباعد المتقارب نسبياً بين مجموعات طبقات (Cu-O) يجعل الموصل الفائق متناحياً (متساوي الخواص) أكثر ويحسن خواصه نسبةً إلى المواد القائمة على البزموت والثاليوم اللامتناحية (المتباينة الخواص). وهذه المادة تمتلك أيضاً بعض الجوانب المتزنة التي تبيّن بأن التطبيقات من غير المرجح أن تكون سهلة. ويكون توصيل التيار الفائق بين حبيبات عشوائية التوجيه

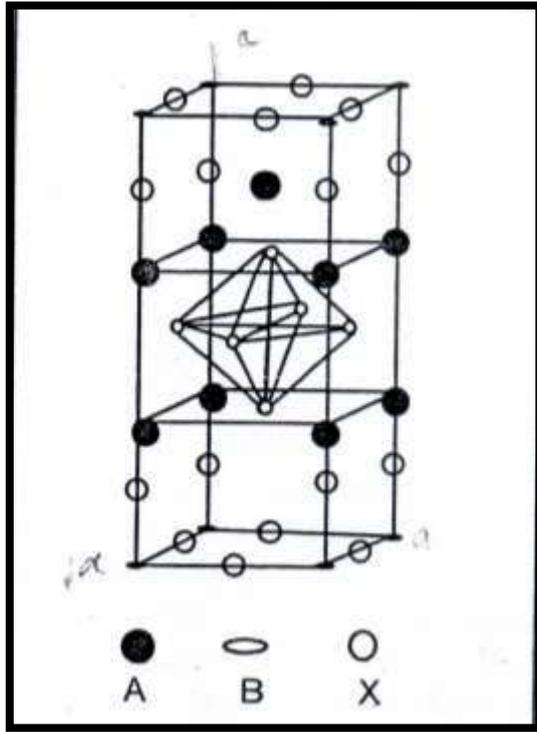
ضعيفاً. وهذا الترابط الضعيف بين الحبيبات ذات التوجيه العشوائي يبدو موجود في كل مكان في الـ (HTSC) التي تمتلك طول تماسك فائق التوصيل قصيراً جداً.

إن اكتشاف الموصلات الفائقة الجديدة ذات الخصائص اللافتة للنظر ودرجة الحرارة الحرجة T_c الأعلى يُعدّ واعداً جداً ولكن لها مشكلات أكبر أيضاً. ولعل المشكلات والوعد هي وجهات نظر مختلفة مثلما هي الشيء نفسه - لكن التحديات الحقيقية المتبقية الآن هي ترجمة الأولى إلى الثاني.

٣-٤ منظومة La-M-Cu-O (La-M-Cu-O System):

ان تركيب $La_{2-x}Ba_xCuO$ يكون شبه ثنائي البعد من الـ (K_2NiF_4) كما موضح في الشكل (٤-١ أ). في هذا التركيب، يمكن لأيون الفلز الانتقالي (Cu) التفاعل فقط في مستوي ab. ويمتلك المركب الأم (La_2CuO_4) والمشتقات الأخرى مثل $(La_{2-x}Sr_xCuO_4)$ هذا التركيب مع ثماني السطوح الى النحاس-الأوكسجين. ويكون الـ (La_2CuO_4) معيني مستقيم في درجة حرارة الغرفة ويصبح رباعي الزوايا في درجة حرارة $500K$ تقريباً. وحين يكون هناك إفراط أو زيادة في الأوكسجين يُصبح فائق التوصيل في درجة حرارة $30K$ تقريباً. وقد حاول بدنورز ومولر (Bednorz and Muller) الحصول على حالة تكافؤ مختلطة للنحاس من أجل تحقيق السلوك الفلزي. ويسبب الـ Cu^{2+} مركباً عازلاً بينما يعطي الـ Cu^{3+} فلزاً غير فائق التوصيل $La_{2-x}M_xCuO_4$ (M= Ca, Sr & Ba) يمتلك تركيباً رباعي الزوايا في درجة

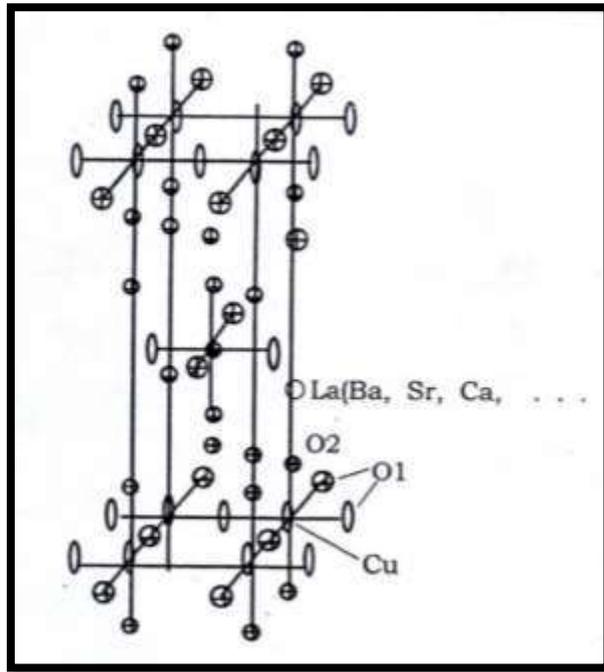
حرارة الغرفة ويصبح معينياً مستقيماً في درجة حرارة 180K تقريباً. ويظهر أعلى درجات حرارة حرجة T_c 's من 30K و 35K لتراكيز $x=0,15$ و $x=0,2$ تقريباً للباريوم Ba والسترونتيوم Sr. ويمكن تبديل أيون الـ La في La_2 (Pr, Nd, Gd) بـ $M_x\text{CuO}_4$ وأيونات أرضية نادرة أخرى دون فقدان التوصيلية الفائقة. مع ذلك حين يُستبدل النحاس Cu جزئياً بالنيكل Ni أو الزنك Zn، يكون هناك انخفاض مفاجئ في درجة الحرارة الحرجة T_c .



الشكل (٤-١ أ) تركيب K_2NiF_4 الرباعي الزوايا

إن CuO_4 ($\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{0,15}$) رباعي الزوايا مع مجموعة حيزية $14/mmm$ في درجة حرارة الغرفة ويمتلك تركيباً مماثلاً لـ K_2NiF_4 . ويتم تنسيق كل

نحاس مع ٤ ذرات O(١) في زاوية تامة مثل صفٍ أو مجموعة من المستويات المربعة. هناك ذرتي O(٢) فوق وأسفل ذرات Cu(١) وبذلك يصبح موقع الـ Cu ثماني السطوح. يختلف تركيب (La_{٢-x}CuO_٤) عن تركيب البيروفسكيت (Perovskite). ولا يرتبط الأوكسجين القمي بالطبقات الثمانية السطوح المتجاورة لتشكل صفٍ (مجموعة) ثلاثية الأبعاد. ويتم تنسيق الـ La مع ذرات الأوكسجين التسعة كما في الشكل (٤-١ ب)



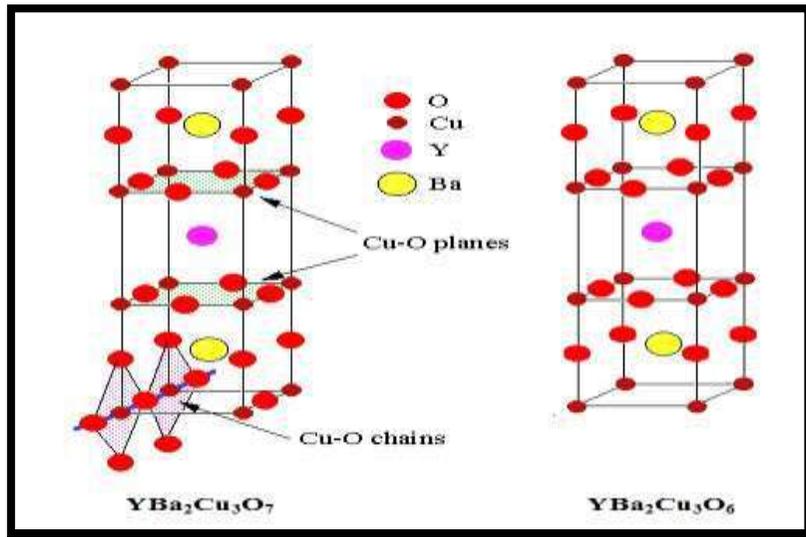
الشكل (٤-١ ب) تركيب تركيب الـ La_{٢-x}A_xCuO_٤

٤-٤ منظومة YBCO(١٢٣) System (YBCO(١٢٣):

في أوائل عام ١٩٨٧ تم الاعلان عن المركب (Y-Ba-Cu-O) والتي فاقت درجة حرارته الانتقالية درجة الغليان لغاز النيتروجين والبالغة (77°K)، حيث بلغت درجة حرارة تحوله نحو (90°K). كما اصبح اساسا لمركبات عديدة تلتها حيث تنبه الباحثون إلى دراسة ذلك الجيل الجديد من المركبات بأمل الحصول على مركبات تتحول إلى موصلات فائقة عند درجة حرارة الغرفة. يتكون النظام السيراميكي فائق التوصيل (YBCO) من (اوksيد الايتيريوم ، أوksيد الباريوم و اوksيد النحاس)، حيث يتميز التركيب البلوري ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$) (Y١٢٣) بترتيب مستويات وسلاسل (CuO) ، حيث يتناسب مع تصنيف HTSC العام كتعديل من Cu-١٢١٢ حيث يتم استبدال Ca تماما ب Y، وهذا البديل يقدم اضافية شحنة سالبة في طبقات CuO_2 بسبب ارتفاع التكافؤ في (+٣) Y مقارنة مع (+٢) Ca. كما يكون تسلسل التراص لطبقات (YBCO) على طول المحور و للبلورة (BaO - CuO_2) تكون $\text{BaO} - \text{CuO}_2 - \text{Y}$ ، وطبقات بنية perovskite للـ (YBCO) تكون منفصلة بواسطة CuO_2 مع ذرات الايتيريوم بين مستويات (CuO)، وتختفي الموصلية الفائقة عندما ينخفض الأوكسجين عن ٦,٣ كما في الشكل (٤-٢) يمتلك الـ ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$) الشكل (٤-٢) تركيباً معينياً مستقيماً مع صفحتي (Cu-O) في مستوي a-b وسلاسل (Cu-O) على طول محور b. وحُدِّدَت أبعاد خلية الوحدة بالكترون و حددت حالات حيود أشعة اكس التركيب على انه مرتبط ببيروفسكيت تكعيبي مع واحد من المحور التكعيبي مجموعة

ثلاثية. ويحدد المحتوى الأوكسجيني δ ثوابت (بارامترات) شبكية. فحين يكون $\delta \sim 0,6$ ، يصبح التركيب رباعي الزوايا. وفي الـ $(\delta=1)$ $YBa_2Cu_3O_7$ ، لا توجد هناك أية سلاسل. وكذلك تختلف درجة الحرارة الحرجة T_c لـ $(YBa_2Cu_3O_{7-d})$ مع δ وتصبح المادة غير فائقة التوصيل عند $d=0,6$. وتبقى درجة الحرارة الحرجة T_c عند حوالي $90K$ صعوداً إلى $d=0,2$ ومن ثم تُظهر هضبة عند درجة حرارة $60K$ حين يكون $d=0,3-0,4$. وتكون T_c ($40K$) حين يكون $d=0,5$. وتبين الدراسات البنيوية أن الأوكسجين يمكن ترتيبه حين يكون $0,75$ & $d=0,5$. في تركيب $d=0,5$ ، تكون سلسلة (CuO) المشبعة بالأوكسجين تماماً موجودة على طول محور b ، بالتناوب مع موقع $O(1)$ الفارغ تماماً. ولم يتم العثور على أي ترتيب أوكسجيني واضح في $d=0,3-0,4$. ويوجد هناك ميل لأن تشغل فراغات ذرة الأوكسجين سلسلة واحدة وتميل مركبات الـ $(YBa_2Cu_3O_{7-d})$ مع $0 < d < 1$ إلى امتلاك صفوف مرتبة من السلسلة المستنفدة من الأوكسجين تماماً. وحين يكون $d=1$ ، فلن تكون هناك أية سلاسل. كذلك تكون جميع الكوبريتات الفائقة التوصيل ذات الصيغة العامة $(LnBa_2Cu_3O_7)$ ، ($Ln=Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm, Yb \& Lu$) معينة مستقيمة مع درجة حرارة حرجة T_c حوالي $90K$ ما عدا حين يكون $Ln=Pr, Ce$ أو Tb . وتصبح البنية المعينية المستقيمة رباعية الزوايا فوق درجة حرارة معينة مصحوبة بتغيير في قياس اتحادية الأوكسجين. وتُسمى الـ $(LnBa_2Cu_3O_7)$ كوبريتات $(1-3-2-1)$ (cuprates) $2-3$ لأن أيونات الفلزات الثلاثة $Ln, Ba \& Cu$ تكون بنسبة

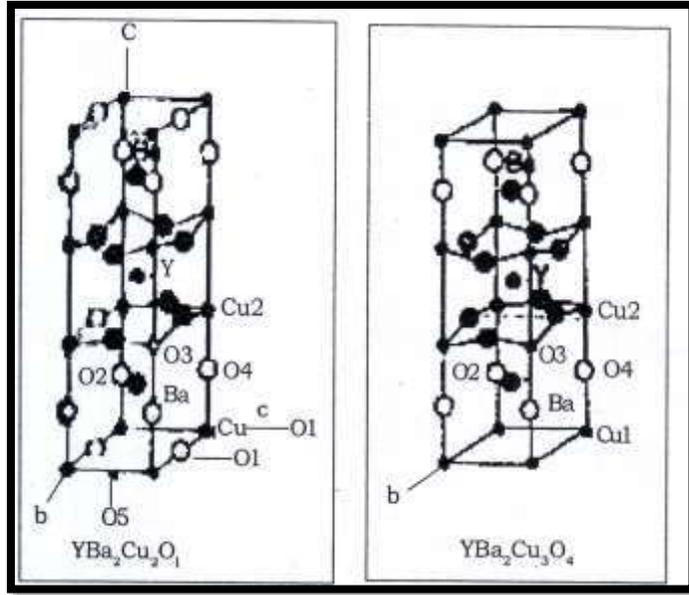
١:٢:٣. وبسبب البنية المعينية المستقيمة، تُظهر المركبات ١-٢-٣ توأمة واسعة. وعبر الحدود التوأمية، يوجد هناك دوران 90° لمحوري a و b. وتصبح السيطرة على المحتوى الأوكسجيني والبنى المايكروية حاسمة إن كان على المرء استخدام مواد ١-٢-٣ لتطبيقات متنوعة. وتوجد العلاقات الارتباطية المضادة للمغناطيسية الحديدية في مواد ١-٢-٣ وكذلك في $(La_{2-x}M_xCuO_4)$ في $(GdBa_2Cu_3O_7)$ و $(DyBa_2Cu_3O_7)$ ، توجد التوصيلية الفائقة مع المغناطيسية (بسبب Gd^{3+} و Dy^{3+}) في درجة حرارة منخفضة جداً.



الشكل (٢-٤) تاركييب بلورية من سلسلة متجانسة من الموصلات الفائقة (YBCO).

يحتوي (١-٢-٣) $YBa_2Cu_3O_8$ على سلسلتي Cu-O، بدلاً من سلسلة Cu-O (O واحدة كما في $(YBa_2Cu_3O_7)$). ويكون كلا مركبا الـ ١-٢-٤ فائقي

التوصيل. ويمتلك ($Y_2Ba_4Cu_7O_{10}$) نمواً بينياً متكرراً لوحدات ١-٢-٣ و١-٢-٤. وتكون كوبريتات ١-٢-٤ أكثر استقراراً فيما يتعلق بالمحتوى الأوكسجيني. وتتحل كل من كوبريتات ١-٢-٤ و١-٢-٤-٧ إلى ١-٢-٣ و CuO عند تسخينها إلى درجة حرارة ١١٩٣K.



الأوكسجينات ٠,٢,٠٣ * ٠,١,٠٤

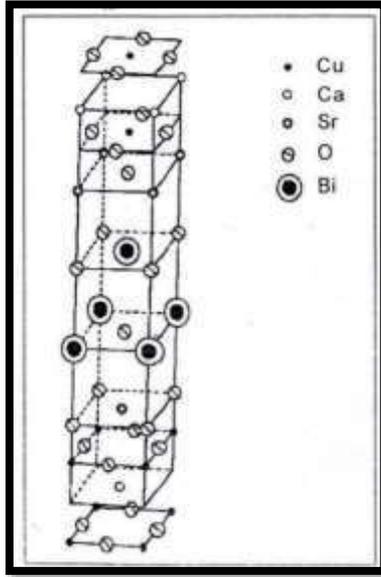
الشكل (٣-٤) تركيب الع. $YBa_2Cu_3O_7$

- (أ) التركيب المعيني المستقيم لطور $\delta=0$ الفائق التوصيل.
 (ب) التركيب الرباعي الزوايا لـ $\delta=1$ غير الفائق التوصيل مع عدم وجود سلاسل Cu-O.

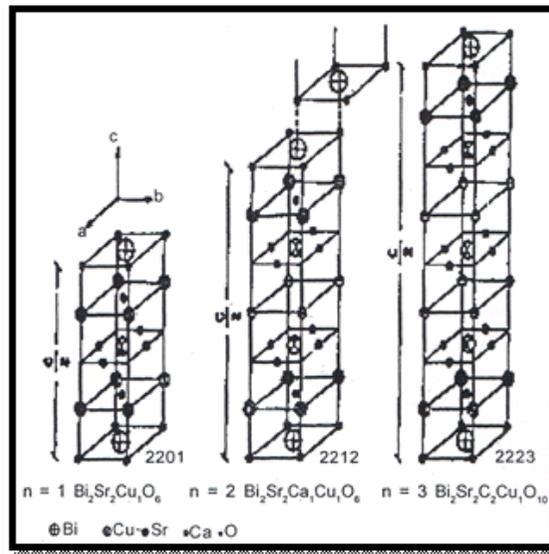
٤-٥ منظومة (Bi Sr Ca Cu O System):

من تقارير سابقة تقول بأن $(\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_7)$ هو موصل فائق مع $T_c \sim 22\text{K}$ قصوى اعتماداً على نسبة الـ Bi/Sr وبالتالي تُكتشف كوبريتات البزموت ذات الصيغة العامة $\text{Bi}_2(\text{CaSr})_{n+1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$. وتتراوح قيمة درجة الحرارة الحرجة T_c من 90- 100K على التوالي لـ $n=2$ و $n=3$. وتكون الكوبريتات معينة مستقيمة وتحتوي على صفائح (Cu-O)، إلى جانب طبقتين من Ca, Sr-O وطبقتين من (Bi-O) (الشكل ٤-٤أ). في هذه المنظومة، تزداد درجة الحرارة الحرجة T_c مع عدد طبقات CuO_2 (الشكل ٤-٤ب). مع ذلك، تكمن المشكلة المعتادة التي تواجهها كوبريتات البزموت في الانتقال إلى نقاء الطور. ويمكن استبدال ايون Ca الثنائي التكافؤ بأيون أترية نادرة ثلاثي التكافؤ كما في $\text{Bi}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Ln}_x\text{Sr}_2\text{Cu}_2\text{O}_{8+d}$ (Ln=Y أو أترية نادرة). ويبدو أن الاستبدال الجزئي لـ Bi بـ Pb يسهل تشكيل كوبريتات البزموت الأحادية الطور. وإضافة الـ Pb يرفع درجة الحرارة الحرجة T_c إلى فوق الـ 100K . وتكون مواقع الـ Bi, Ca & Sr في كوبريتات الـ Bi قابلة للتبادل ولا تكون تركيبات (نسب Bi:Ca:Sr) أبداً ٢١٢٢ أو ٢٢٢٣ بالضبط كما موصوف بالصيغة العامة $\text{Bi}_2(\text{CaSr})_{n+1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$. وتميل معظم العينات إلى أن تكون غنية بالكالسيوم Ca. ويمكن استبدال البزموت Bi جزئياً بالرصاص Pb صعوداً إلى ٢٥٪. وهذا عموماً يفضّل تشكيل تراكيب أحادية الطور أفضل مع درجات حرارة حرجة T_c s معززة قليلاً. ويتبلور مركب ٢٢١٢ في

المجموعة الحيزية الرباعية الزوايا $4/mmm$ ، 1 (D_{4h}^{17}) مع وحدتي صيغة لكل خلية.



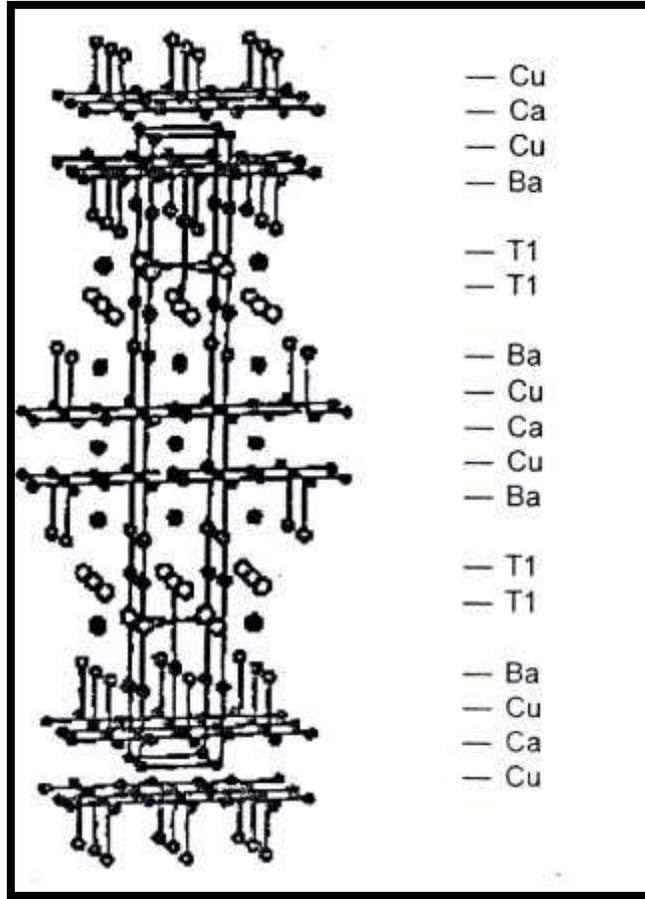
الشكل (٤-٤) (أ) التركيب البلوري لـ $\text{BiSr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$



الشكل ٤-٤ (ب) تركيب عائلة الموصلات الفائقة للسيراميك القائم على البزموت

٤-٦ منظومة (TI Ba Ca Cu O System):

تكون كوبريتات الثاليوم ذات الصيغة العامة $(\text{Ti}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Ba}_2\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4})$ رباعية الزوايا وتحتوي على طبقتي TI-O وصفائح n Cu-O (الشكل ٤-٥). وتكون درجات الحرارة الحرجة T_c لهذه الكوبريتات هي ١٢٥K & ١١٠, ٨٠ على التوالي لـ ٣ & ٢, n+١. وفي هذه الكوبريتات، هناك طور في تجانس بسبب توارد مختلف أعضاء السلسلة. ويحتوي أعضاء عائلة $(\text{Ti}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Ba}_2\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4})$ التي تمتلك بنية رباعية الزوايا بدائية، على طبقة TI-O واحدة. ويُظهر أعضاء ٣ & ٢ n=٢ للسلسلة درجات حرارة حرجة T_c من ٩٠ و١١٥ على التوالي. ولقد تميزت كوبريتات الثاليوم مع $n > ٣$ ولكن درجة الحرارة الحرجة T_c لا تزيد ما بعد $n=٣$. وينشئ الاستبدال الجزئي لـ TI بـ Pb أو Ca بأثرية نادرة كما في $\text{Ti}_{1-x}\text{Pb}_x\text{CaSr}_2\text{Cu}_2\text{O}_{7+d}$ ($T_c \sim ٩٠\text{K}$) التوصيلية الفائقة. يكون الرصاص Pb في كوبريت الثاليوم هذا في حالة +٤، مما يجعل $\text{Ti}_{1-x}\text{Pb}_x\text{CaSr}_2\text{Cu}_2\text{O}_{7+d}$ و $\text{TiCa}_{1-x}\text{Ln}_x\text{Sr}_2\text{Cu}_2\text{O}_{7+d}$ متساوي الكترولونات التكافؤ. ويمكن ملاحظة أنه في كوبريتات Bi و TI كذلك في مركبات ٣-٢-١، يوجد هناك دائماً Ca و/أو Ba. في الوقت نفسه، تم تحضير كوبريتات TI الفائقة التوصيل ذات الصيغة $\text{TiSr}_{n+1-x}\text{Ln}_x\text{Cu}_n\text{O}_{2n+3}$ وكذلك كوبريتات من النوع $\text{Ti}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_{n+1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+3}$ التي لا تحتوي على كالسيوم Ca أو باريوم Ba أو حتى أثرية نادرة.



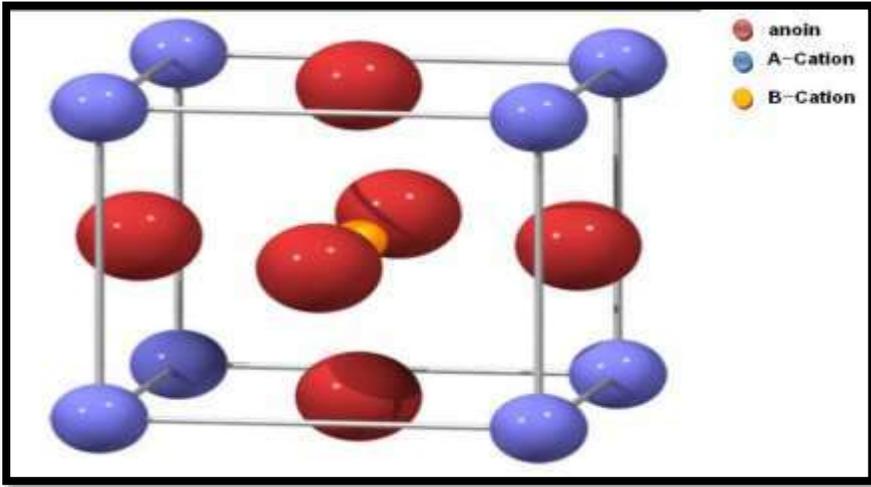
الشكل ٤-٥ تركيب الـ $Tl_2CaBa_2Cu_2O_{8+\delta}$

٧-٤ تراكييب البيروفسكايت Perovskite Compositions

اكتشفت المواد الفائقة التوصيل الكهربائي عند درجات الحرارة العالية (HTSC) في مركبات البيروفسكايت (perovskite) وهي عبارة عن مواد سيراميكية، حيث تمتاز بكثرة تطبيقاتها وتمتد إلى انتاج الطاقة، والاحتواء البيئي والمتمثل في حاويات النفايات المشعة

(Radioactive Waste Encapsulation)، والاتصالات (المواد الرنينية العازلة).

أن تركيب البيروفسكايت يمتلك صيغة كيميائية كمية عامة هي (ABX_3) ، وهو يتكون من ترابط مواد معدنية تشمل الأيون الموجب الكبير (A-Cation) عند اركان المكعب، والأيون الموجب الصغير (B-Cation) في مركز المكعب، مع مواد غير معدنية (x) تشمل ذرات الأيون السالبة (anion) مثلا الأوكسجين والتي تقع في مراكز الأوجه الستة للمكعب، كما مثبتة في الشكل (٤-٦) الذي يمثل تركيب البيروفسكايت المكعبي المثالي.



الشكل (٤-٦) وحدة الخلية للتركيب البيروفسكايت المكعبي.

ان الايونات الموجبة (B) ، (A) ممكن أن تمتلك تنوعا في الشحنات وان التركيب البيروفسكايت المعدني الاصلي هو $(CaTiO_3)$ وفيه الأيون الموجب (A) والمتمثل بالكالسيوم (Ca) ويمتلك تكافؤ ثنائي بينما الايون الموجب (B)

والمتمثل بالتيتانيوم (Ti) يمتلك تكافؤ رباعي. ان النظرية التقليدية لشبكة البيروفسكايت تتضمن الايون الموجب الصغير (B) ضمن التركيب الشبكي ثماني السطوح للاوكسجين، في حين ان الايون الموجب الكبير (A) فانه محاط بعدد تناسق (١٢) ذرة من ذرات الأوكسجين، وسمي هذا التركيب بعد ظهور التركيب المعدني (CaTiO_3) بالتركيب المعيني القائم (Structure Orthorhombic) والذي يمتاز بمجموعة فراغية من النوع (Pnma). ان حالة الاستقرار في تراكيب البيروفسكايت تكون ممكنة من خلال ادخال اوكسجين اضافي ($\delta > 0$) في تركيب (RS)، حيث أن ادخال اوكسجين اضافي سوف يخلق فجوات اكثر في طبقات البيروفسكايت وكذلك يخلق فجوات في طبقات (CuO) اللتين سوف تقصران من طول اصرة-Cu O. أن طبقة (Bi - O) تعمل كطبقة لخرن الشحنة التي تنظم كثافة الشحنة في طبقات (CuO_2) أن الفجوات تتكون بوساطة الزيادة في ذرات الأوكسجين في طبقات اوكسيد النحاس والنقص في طبقات اوكسيد الباريوم. بينما يحدث توصيل الشحنة خلال طبقات اوكسيد الباريوم. وهنا فان ذرات الكالسيوم تعمل كطبقة عازلة والتي تحصر (Sandwiched) في الحيز بين طبقات التوصيل لأوكسيد النحاس. التخمين تأثير طبقات اوكسيد النحاس على درجة الحرارة الحرجة فانه من الضروري الأخذ بنظر الاعتبار تأثير الازدواج بين الطبقات ، وان قيمة درجة الحرارة الحرجة العظمى تقترن بعدد طبقات اوكسيد النحاس القصوى. أن الازدواج ما بين الخلايا وداخلها ممكن ان يحدث في الموصلات فائقة التوصيل المعتمدة على اوكسيد النحاس، ولكن الازدواج بين

الخلايا بين طبقتي اوكسيد النحاس يكون اصغر بكثير بسبب طبقة الفراغات لكل من (X) والباريوم والكالسيوم، والازدواج بين الخلايا يكون اكبر بكثير كما هو ظاهر في صغر التباين في الخواص للتوصيلية، وبسبب المدى الواسع للتركيب والتركيز العالي للعيوب، فان الموصلات الفائقة المستندة في تركيبها على اوكسيد النحاس تكون متباينة الخواص بصورة كبيرة وكذلك فان عدم التجانس له دور مهم في الموصلات الفائقة. من الصعب جدا انتاج طور منفرد للمركبات التي تحت الدراسة، كمثال (Hg-١٢٢٣) ، (Bi-٢٢٢٣) (Pb - ٢٢٢٣) , (Y - ١٢٣) ويعزى هذا إلى النمو البيني للأطوار الأخرى، وأن متطلبات شروط المعالجة التشكيل الطور المنفرد فائق التوصيل لم تحدد لحد الان، وبالنتيجة فان التراكيب والخواص لم تدرسا على نطاق واسع ، والاسباب تكمن في أن تشكيل الطور المنفرد يتطلب عدة مئات من الساعات وان عملية التشكيل تحدث ببطئ شديد ضمن مدى محدود جدا من درجات الحرارة. أن عملية التليد هي العملية التي يتقلص فيها مزيج المسحوق السيراميكي المضغوط خلال عملية التسخين والتي بعدها تزداد كثافة الجسم السيراميكي الناتج، وان عملية التليد تنقسم الى ثلاث مراحل هي (المرحلة الابتدائية والمرحلة المتوسطة والمرحلة النهائية، حيث تحدث في المرحلة الابتدائية من التليد زيادة في مساحات الاتصال بين الجسيمات في المضغوط السيراميكي وتتكون حالة نمو الاعناق Neck) (Growth)، وعندما تتشكل حدود ثابتة بين جسيمات المسحوق فانها تتكون ما تسمى بالحبيبات (Grains) ، أما في الحالة المتوسطة فانها تبدأ عندما تقوم

الحبيبات الكبيرة بالنمو على حساب الحبيبات الصغيرة التي تتبعها عملية كسر الشبكات من المسامات المفتوحة بين الحبيبات واختزالها الى مسامات مغلقة منفردة التي تعد هي المرحلة النهائية لعملية التليد، لهذا ولزيادة معرفتنا وتحسين فهمنا فانه من المهم دائماً دراسة الظروف وتجربتها وطرائق التحضير المختلفة والتي تؤثر في سلوك عملية التليد.

٤-٨ التركيب البلوري للنظام فائق التوصيل (HBCCO)

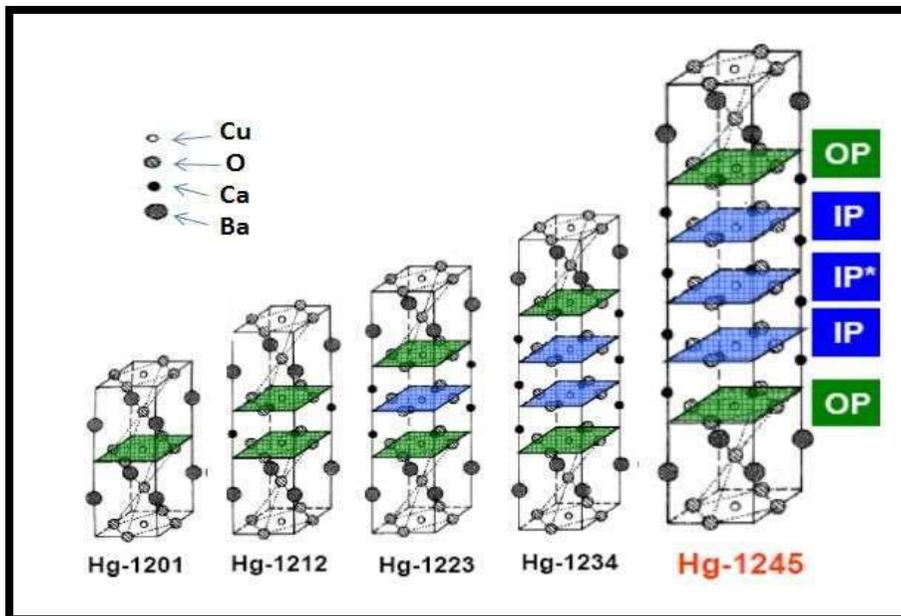
تعد المواد فائقة التوصيل ذات أساس الزئبق $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n+1}\text{Cu}_{2n+2+\delta}$ حيث أن (n) هو عدد صحيح موجب ($n=1,2,3,\dots$) ويمثل عدد طبقات CuO_2 لكل وحدة خلية) موضوع شيقاً للدراسة حيث تمتلك هذه المواد أعلى درجة حرارة انتقال (T_c) معروفة حتى اليوم من بين المواد فائقة التوصيل التي تحتوي على أكاسيد النحاس، حيث وصلت درجة حرارتها الحرجة الى 136 K° عند الضغط العادي، كما وصلت درجاتها الحرجة 164 K في المركب $(\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta})$ (١٢٢٣ - Hg) عند الضغط المرتفع .

يتكون النظام السيراميكي فائق التوصيل (HBCCO) من (أكسيد الزئبق، أكسيد الباريوم، أكسيد الكالسيوم وأكسيد النحاس) ، حيث هناك ثلاثة من الأنظمة المهمة للمواد فائقة التوصيل ذات أساس الزئبق، حيث أن العضو الأول من عائلة هذا النظام هو عندما ($n=1$) والمركب هو ($\text{Hg}-1201$)، وأن درجة الحرارة الحرجة تساوي ($T_c = 94 \text{ K}$) ، أما العضو الثاني في هذه العائلة فهو عندما يكون ($n=2$) والمركب هو ($\text{Hg}-1212$) والذي يمتلك ($T_c = 127 \text{ K}$) ، وان العضو الثالث في هذا النظام

هو (Hg-1223) والذي فيه ($n = 3$) درجة الحرارة الحرجة تساوي ($K = 136^\circ K$) . كما تملك جميع الاطوار للمركب الفائق نظاما متبلورة ذا تركيب

رباعي (tetragonal) وطبقات perovskite.

تحتوي أكاسيد النحاس المعقدة ذات اساس الزئبق (cuprates) ، على تراكيب بلورية متعددة الطبقات، حيث توجد أربعة أنواع مختلفة من الطبقات، منها طبقات (CuO_2) والتي تختلف في عددها (من 1 إلى n لكل خلية وحدة). يمكن فصل هذه الطبقات (CuO_2) عن بعضها بواسطة طبقات (Ca) ومن الواضح (1-1) تمثل الطبقات لكل خلية وحدة بشكل عام. وفقا للنظرية الفيزيائية الحالية، تكون طبقات (CuO_2) مسؤولة عن التوصيلية الفائقة لهذه المركبات. وإن طبقات (CuO_2) و (ca) تشكل معاً الكتلة الموصلة أو الكتلة الفعالة (active block) ، وكما موضحة في الشكل (4-7) ومن الجدير بالذكر أن هناك طورين آخرين في النظام (HBCCO) وهما الطوران (1234) و (1245) اللذان يتكونان من اربع طبقات وخمس طبقات من اوكسيد النحاس على التوالي، ويمتاز هذان الطوران بان درجة حرارتهما الحرجة اقل من درجة الحرارة الحرجة للطور (2223)، حيث أن قيمتهما تساوي ($T_c = 127^\circ K$) و ($T_c = 110^\circ K$) على التوالي ، وغالبا ما يستخدم هذان الطوران في الأغشية الرقيقة من خلال طريقة التبخير الحراري، حيث يمكن تحضيره كتركيب صفائحية بلورية نامية وبمستوى سمك وحدة الخلية.



الشكل (٤-٧): تراكيب بلورية من سلسلة متجانسة من النظام (HBCCO) فائق التوصيل.

وفقا لهذه الصيغة ، توجد عدة مركبات تختلف عن بعضها البعض فقط في عدد طبقات (CuOg) و (CaO_٢) لكل وحدة خلية. كما نلاحظ اختلاف في معاملات الشبكة حيث تقل ثابت الشبكة a تقابلها زيادة في قيمة c ، حيث نجد ان c تتغير مع تغير الاطوار وحسب العلاقة.

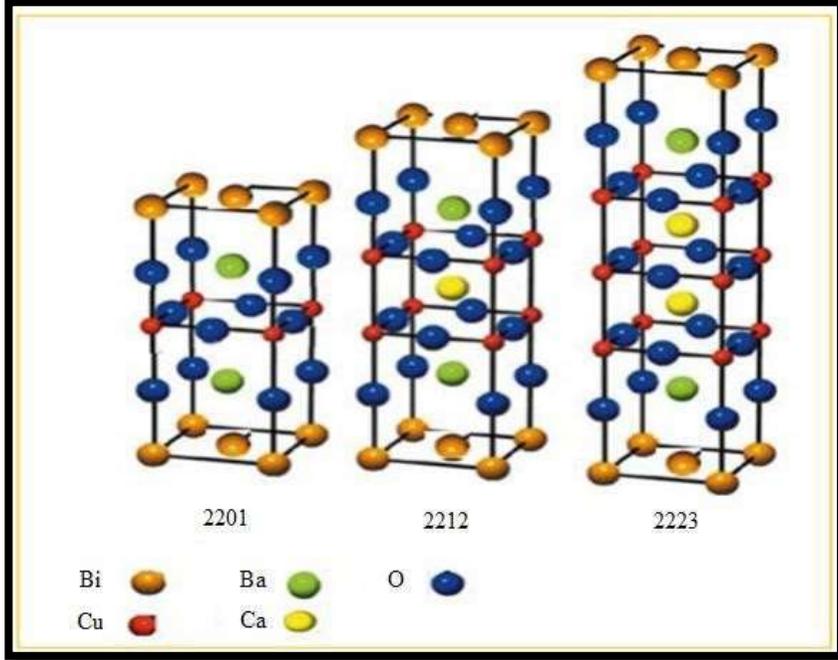
$$c \approx 9.5 + 3.2(n - 1) \text{ \AA} \dots \dots (1 - 4)$$

عندما يكون ($n > 3$) فان طبقتي OP الخارجية (المرتبطة بخمس ذرات اوكسجين) تبقى ثابتة في المركب بينما تزداد طبقات IP الداخلية (المرتبطة بأربع ذرات اوكسجين).

٩-٤ التركيب البلوري للنظام فائق التوصيل (BBCCO)

أن النظام السيراميكي فائق التوصيل (BBCCO) الذي يتكون من (أوكسيد البزموت، وأوكسيد الباريوم، وأوكسيد الكالسيوم و أوكسيد النحاس) يعد نظاما مهما من بين الأنظمة فائقة التوصيل (HTSC) والتي تمتلك درجة حرارة انتقال حرجة عالية، يمتلك هذا النظام ثلاثة اطوار مميزة، (Bi-٢٢٠١)، (Bi-٢٢١٢)، (Bi-٢٢٢٣)، ويعد الطورين الأخيرين الأكثر اهمية حيث أن درجة حرارتيهما الحرجة أعلى من نقطة غليان النتروجين السائل . اكتشفت الموصلات الفائقة ذات اساس البزموت بعد النظام فائق التوصيل ذي اساس اليتريوم وهو ذو فوائد متنوعة أكثر منه. ان الفوائد الرئيسية لهذا النظام هي انه صديق للبيئة أكثر من أنظمة الزئبق والثاليوم، وامتلاكه لدرجات حرارة الانتقال الحرجة العالية، والتيار الحرج العالي، ومقاومته للماء ، ووفرة العناصر ونقاوتها التي يعمل منها الموصل الفائق، وتحمله للمجالات المغناطيسية العالية أكثر من بقية الأنظمة وكذلك استعمال تقنيات النمو البلوري القياسية لتحضيرها . وبالرغم من امتلاكها كل هذه الفوائد الا أن الحصول على عوامل وظروف النمو المثلى تبقى مهمة صعبة ولم يتم تحقيقها لحد الان. أن الصيغة العامة للنظام ذي اساس البزموت هي $(Bi_2Ba_2Ca_nCu_{n+1}O_{2n+6})$ حيث أن (n) هو عدد صحيح موجب (٣، ٢، ١، ٠) والشكل (٤-٨) يبين التركيب البلوري لأطوار النظام الثلاثة. وفي هذا النظام هناك مجاميع من طبقات (CuO_2) ، وكل مجموعة مفصولة بوساطة ذرة (Ca) من دون اوكسجين، ان طبقات

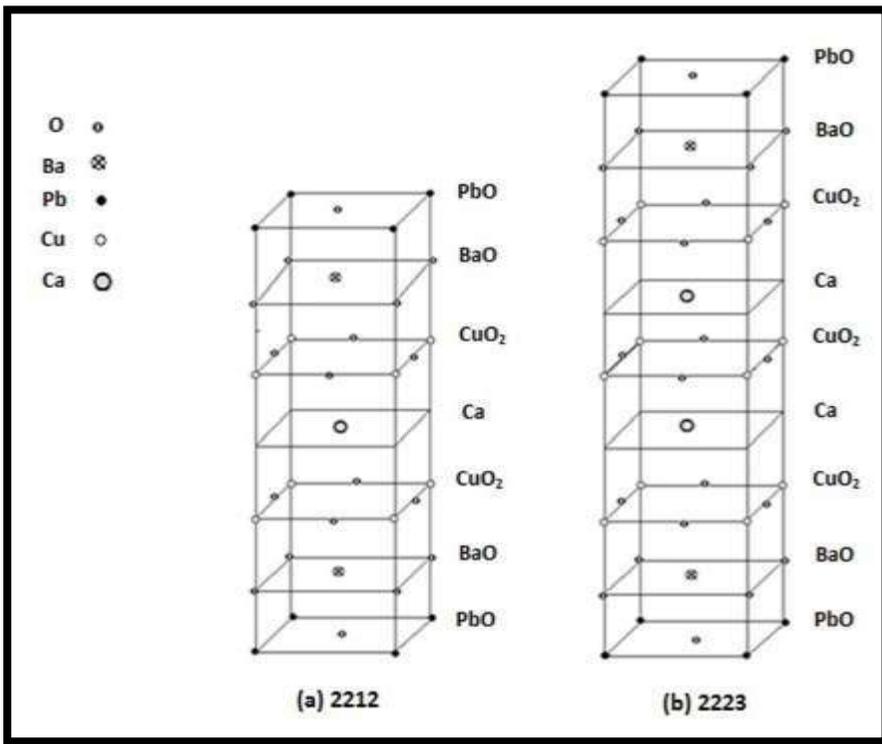
(CuO₂) ترتبط سويا بواسطة طبقات متخللة وفاصلة من (BiO) و (BaO). ومن الجدير بالذكر أن العضو الأول من عائلة هذا النظام هو عندما (n=0) والمركب هو (٢٢٠١)، ويمتاز هذا المركب بأنه يمتلك تنسيقاً ثماني السطوح من (C) ويمتلك (T_c = ٩٠°K). أما العضو الثاني في هذه العائلة فهو عندما يكون (n=١) والمركب هو (٢٢١٢) والذي يمتلك (T_c=٩٠°K) مع طبقة واحدة من (Ca). هنالك طبقتان من (CuO₂) مفصولة الواحدة عن الأخرى بواسطة طبقة (Ca). ان المسافة بين (CuO) إلى (Ca) هي (١,٦٦Å) أن العضو الثالث في هذا النظام هو (٢٢٢٣) والذي فيه (n=٢) حيث يمتلك ثلاث طبقات من (CuO₂) مفصولة عن بعضها البعض بواسطة مستويات (Ca) والتي تمتلك (T_c=١١٠°K). ان الاطوار (٢٢٠١ , ٢٢١٢) تعتمد بصورة كبيرة على محتوى الأوكسجين، بينما يكون الطور (٢٢٢٣) ضعيف الاعتماد على محتوى الأوكسجين. ومن الجدير بالذكر أن هناك طورة اخر في النظام (BBCCO) وهو الطور (٢٢٣٤) الذي يتكون من اربع طبقات من النحاس، ولكن يمتاز هذا الطور بان درجة حرارته الحرجة اقل من درجة الحرارة الحرجة للطور (٢٢٢٣)، حيث أن قيمتها تساوي (T_c=٩٠°K)، وغالبا ما يستخدم هذا الطور في الأغشية الرقيقة والتي يتم تحضيرها بواسطة طريقة التبخير الحراري، حيث يمكن تحضيره فقط كتراكيب صفائحية بلورية نامية وبمستوى سمك وحدة الخلية.



الشكل (٨-٤) التركيب البلوري لأطوار النظام فائق التوصيل (BBCCO)

توصف مركبات الرصاص بالصيغة $Pb_2Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ حيث أن $n=2, 3$ ، وقد شخصت من قبل العالمين (Yamauchi و Tamura) بوجود طورين من منظومة البروفسكايت ($Pb-2212$) و $Pb_2Ba_2Ca_1Cu_2O_8$ و ($Pb-2223$) $Pb_2Ba_2Ca_2Cu_2O_{10}$ ، حيث أن البنية البلورية لهذه المركبات تحتوي من وحدة الخلية على حد طبقتين او ثلاث طبقات من (CuO) على التوالي مفصولة بطبقة من (CaO). كما نلاحظ في الشكل (٩-٤). ويمكن الإشارة هنا إلى إن تركيب وحدة الخلية للمركب (2223) ذات نوع (Orthorhombic) يشبه بقفص كبير (مرتب) وينقسم إلى ثمانية (أقفاص) أقسام صغيرة مرصوفة فوق بعضهما البعض، وتوجد على الأركان

الثمانية ذرات (Pb) وتشارك مع ذرات الأوكسجين مكونة طبقات (PbO) المزدوجة ، أما باقي ذرات النحاس والباريوم والكالسيوم فتتوزع في المركب (Pb-٢٢٢٣) بالشكل الاتي إذ أن المركب يتكون من ثلاث طبقات من الاكاسيد النحاس وذرة الكالسيوم توجد بين كل طبقتين من الطبقات الثلاث لاكاسيد النحاس وذرات الباريوم وتقع على مراكز طبقات (PbO) ، (CuO) من الاعلى الى الاسفل.



الشكل (٩-٤) البنية البلورية لاطوار PBCC المختلفة (٢) ٢٢١٢ ، ٢٢٢٣ (b)

٤-١٠ التركيب البلوري للنظام فائق التوصيل (BSCCO)

أن النظام السيراميكي فائق التوصيل (BSCCO) الذي يتكون من (أوكسيد البزموت، أوكسيد السترونتيوم، أوكسيد الكالسيوم، أوكسيد النحاس) بعد نظاما مهما من بين الأنظمة فائقة التوصيل (HTSC) والتي تمتلك درجة حرارة انتقال حرجة عالية، يعرف هذا النظام بأنه يمتلك ثلاثة أطوار مميزة تسمى عموما بالاطوار (Bi-٢٢٠١)، (Bi-٢٢١٢)، (Bi-٢٢٢٣) من بين هذه الأطوار يعد الطورين (Bi-٢٢١٢) و (Bi-٢٢٢٣) أكثر أهمية حيث أن درجة حرارتهما الحرجة أعلى من نقطة غليان النتروجين السائل، وهو أمر مرغوب أيضا في انتاج مركبات بشكل أغشية رقيقة، اما العينات التي تكون بشكل كتل فهي عادة ما تكون متعددة التبلور، وأن الموصلات الفائقة ذات الأساس البزموت اكتشفت بعد النظام فائق التوصيل ذي الأساس اليتريوم وهو ذو فوائد متنوعة أكثر منه. أن الفوائد الرئيسية لهذا النظام هي انه صديق للبيئة اكثر من انظمة الزئبق والثاليوم، وذلك امتلاكه لدرجات حرارة الانتقال الحرجة العالية، والتيار الحرج العالي، ومقاومته للماء، وغياب عناصر الاتربة النادرة، ووفرة العناصر ونقاوتها التي يعمل منها الموصل الفائق ، وتحمله للمجالات المغناطيسية العالية اكثر من بقية الأنظمة وكذلك استعمال تقنيات النمو البلوري القياسية لتحضيرها. وعلى الرغم من امتلاكها كل هذه الفوائد الا أن الحصول على عوامل وظروف النمو المثلى تبقى مهمة صعبة ولم يتم تحقيقها لحد الان. ان هذه الموصلات الفائقة تمتلك تركيبا بلوريا شائعا يعرف بتركيب البيروفسكايت المعدل، أن عائلة المواد البيروفسكايت تمتلك صيغة عامة هي

(ABO_3). ان اسم البيروفسكايت اتي من التركيب المعدني ($CaTiO_3$). ان الاهتمام التكنولوجي والتقني لهذه المواد نجم عن اكتشاف الخاصية الفيروكهربائية القوية للمركب ($BaTiO_3$)، والتي اعتقدت عموما بان هذه المواد ليست معدنية. ان الصيغة العامة للنظام ذي الاساس البزموت هي ($Bi_2Sr_2Ca_nCu_{n+1}O_{2n+6}$) حيث أن (n) هو عدد صحيح موجب ($n=0,1,2,3$) والشكل (٢-٢١) يبين التركيب البلوري لاطوار النظام الثلاثة. وفي هذا النظام هناك مجاميع من طبقات (CuO_2)، وكل مجموعة مفصولة بوساطة ذرة (Ca) من دون اوكسجين، أن طبقات (CuO_2) ترتبط سويا بوساطة طبقات متخللة وفاصلة من (SrO) (BiO). ومن الجدير بالذكر أن العضو الأول من عائلة هذا النظام هو عندما ($n=0$) والمركب هو (2201)، ويمتاز هذا المركب بانه يمتلك تنسيقا ثماني السطوح من (Cu) ويمتلك ($T_C = 90K$). اما العضو الثاني في هذه العائلة فهو عندما يكون ($n=1$) والمركب هو (2212) والذي يمتلك ($T_C=90K$) مع طبقة واحدة من (Ca). هنالك طبقتان من (CuO_2) ومفصولة الواحدة عن الأخرى بوساطة طبقة (Ca). ان المسافة بين (CuO) إلى (Ca) هي ($1,66A^\circ$)، أن تركيب الشبكة الفائق حدد على طول المحور (a) والمحور (b) وهذا يعني أن التعديل البسيط في وحدة الخلايا شخص تقريبا لكل خمس مسافات شبكية. ان العضو الثالث في هذا النظام هو (2223) والذي فيه ($n=3$) حيث يمتلك ثلاث طبقات من (CuO_2) مفصولة عن بعضها البعض بوساطة مستويات (Ca) والتي تمتلك ($T_C = 110K$)، ان الاطوار ($2201, 2212$) تعتمد

بصورة كبيرة على محتوى الأوكسجين، بينما يكون الطور (٢٢٢٣) ضعيف الاعتماد على محتوى الأوكسجين.

ومن الجدير بالذكر أن هناك طور آخر في النظام (BSCCO) وهو الطور (٢٢٣٤) الذي يتكون من أربع طبقات من النحاس ، ولكن يمتاز هذا الطور بان درجة حرارته الحرجة اقل من درجة الحرارة الحرجة للطور (٢٢٢٣)، حيث أن قيمتها تساوي ($T_c=90\text{K}$)، وغالبا ما يستخدم هذا الطور في الأغشية الرقيقة والتي يتم تحضيرها بواسطة طريقة التبخير الحراري وكذلك بواسطة أي طريقة تليد تقليدية، أن الطور (٢٢٣٤) يمكن تحضيره فقط كتراكيب صفائحية بلورية نامية وبمستوى سمك وحدة الخلية. وبطريقة أخرى ممكن وصف تركيب الموصلات الفائقة (Cuprates) والتي من ضمنها (Bi - base) على أنها تراكيب بيروفسكايت تتضمن كتلا عازلة وطبقات فائقة التوصيل التي تتناوب في الترتيب فيما بينها . هذه الكتل العازلة تمتلك تركيبا (RS) (Rock Salt) وطبقة واحدة من الموصلات الفائقة ذات التركيب البيروفسكايت (P). ان اضطراب الشبكة سببه الاختلاف في طول اصرة (Bi-O) التي تكمن في تركيب (RS) وكذلك طول الاصرة (Cu-O) والتي تكمن في تركيب (P) وهو المسؤول عن زعزعة وعدم استقرارية الأطوار فائقة التوصيل. ان حالة الاستقرارية في تراكيب البيروفسكايت يحكمها عامل مهم يسمى عامل التحمل (Tolerance Factor(t_f)) حيث تكون هذه التراكيب مستقرة عندما تكون قيمة هذا العامل في المدى ($0.8 \leq t_f \leq 0.9$)، وان عامل التحمل (t_f) في

النظام فائق التوصيل ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+\delta}$) يمكن التعبير عنه
بالمعادلة الآتية:

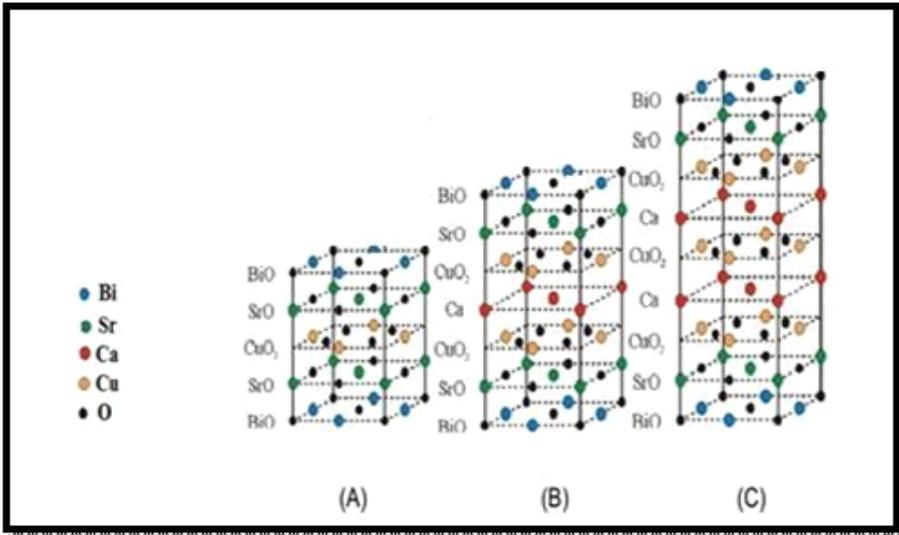
$$t_f = \frac{R_{Bi}^{+3} + R_O^{-2}}{\sqrt{2} (R_{Cu}^{+2} + R_O^{-2})} = 0.78 \dots \dots \dots (2 - 4)$$

حيث أن (R) هو نصف القطر الأيوني للعنصر، فإذا كانت قيمة هذا العامل كبيرة فإنها تحسن من استقرارية التركيب بالنسبة للأطوار فائقة التوصيل، وبالإضافة إلى ماسبق فإن التركيب ممكن أن يستقر من خلال ادخال اوكسجين اضافي ($\delta > 0$) في تركيب (RS)، حيث ان ادخال اوكسجين اضافي سوف يخلق فجوات اكثر في طبقات البيروفسكايت و كذلك يخلق فجوات في طبقات (CuO) اللتين سوف تقصران من طول اصرة (Cu-O) .

حددت معاملات الشبكة لوحدات الخلية الأولية باستخدام حيود الأشعة السينية حيث ظهرت بالنسبة للطور (2201) بالقيم $(a=5,383A^\circ, b=5,390A^\circ, c=24,38A^\circ)$ وللطور (2212) بالقيم $(a=5,395A^\circ, b=5,390A^\circ, c=30,65A^\circ)$ وللطور (2223) بالقيم $(a=b=5,4A^\circ, c=37A^\circ)$ ان عملية استبدال الأيونات الموجبة ممكن ان يحصل غالبا في هذه الأطوار وان قيمة هذه المعاملات تتغير بعض الشيء بالاعتماد على نوع الأيون الموجب الذي يتم به الاستبدال. بالإضافة الى ذلك فان عملية الاستبدال هذه لها تأثير مهم ايضا في استقرارية الأطوار وخصوصا في تشكيل الطور (2201). أن عملية الاستبدال الجزئي للبيزموث ثلاثي التكافؤ بوساطة ايون يختلف عنه في نصف القطر الأيوني والتكافؤ

وخواص التاصر ممكن أن تؤثر على المركب من حيث تشكيل الطور (HTSC)، وكذلك الاستقرار الكيميائية والخواص الفائقة التوصيل عموماً. على أي حال فإن من الصعب جداً إنتاج طور منفرد من (Bi-2223) ويعزى هذا إلى النمو البيني للطور (Bi-2212). ومن هنا فإن طبقة (Bi-O) تعمل كطبقة لخرن الشحنة التي تنظم كثافة الشحنة في طبقات (CuO₂) أن الفجوات تتكون بواسطة الزيادة في ذرات الاوكسجين في طبقات اوكسيد النحاس والنقص في طبقات اوكسيد السترونتيوم. بينما يحدث توصيل الشحنة خلال طبقات اوكسيد السترونتيوم. وهنا فإن ذرات الكالسيوم تعمل كطبقة عازلة والتي تحصر (Sandwiched) في الحيز بين طبقات التوصيل الأوكسيد النحاس. لتخمين تأثير طبقات اوكسيد النحاس على درجة الحرارة الحرجة فإنه من الضروري الاخذ بنظر الاعتبار تأثير الازدواج بين الطبقات، أن قيمة درجة الحرارة الحرجة العظمى تقترن بعدد طبقات اوكسيد النحاس القصوى. ان الازدواج مابين الخلايا وداخلها ممكن ان يحدث في الموصلات فائقة التوصيل المعتمدة على اوكسيد النحاس، ولكن الازدواج بين الخلايا بين طبقتي اوكسيد النحاس يكون اصغر بكثير بسبب طبقة الفراغات لكل من الازدواج والسترونتيوم والكالسيوم، والازدواج بين الخلايا يكون اكبر بكثير كما هو ظاهر في صغر التباين في الخواص للتوصيلية، وبسبب المدى الواسع للتركيب والتركيز العالي للعيوب، فان الموصلات الفائقة المستندة في تركيبها على اوكسيد النحاس تكون متباينة الخواص بصورة كبيرة وكذلك فان عدم التجانس له دور مهم في الموصلات الفائقة ذات الأساس الازدواج. واخيراً فإن

متطلبات شروط المعالجة لتشكيل الطور المنفرد (Bi-٢٢٢٣) فائق التوصيل لم تحدد لحد الان، وبالنتيجة فان التراكيب والخواص لم تدرس على نطاق واسع ، والاسباب تكمن في أن تشكيل الطور المنفرد (Bi-٢٢٢٣) يتطلب عدة مئات من الساعات وان عملية التشكيل تحدث ببطئ شديد ضمن مدى محدود جدا من درجات الحرارة. أن عملية التليد هي العملية التي يتقلص فيها مزيج المسحوق السيراميكي المضغوط خلال عملية التسخين، التي بعدها تزداد كثافة الجسم السيراميكي الناتج، ان عملية التليد تنقسم الى ثلاث مراحل هي (المرحلة الابتدائية والمرحلة المتوسطة والمرحلة النهائية)، حيث تحدث في المرحلة الابتدائية من التليد زيادة في مساحات الاتصال بين الجسيمات في المضغوط السيراميكي وتتكون حالة نمو الاعناق (Neck Growth) ، وعندما تتشكل حدود ثابتة بين جسيمات المسحوق فانه تتكون ما يسمى بالحبيبات (Grains)، اما في الحالة المتوسطة فانها تبدأ عندما تقوم الحبيبات الكبيرة بالنمو على حساب الحبيبات الصغيرة التي تتبعها عملية كسر الشبكات من المسامات المفتوحة بين الحبيبات واختزالها الى مسامات مغلقة منفردة التي تعد هي المرحلة النهائية لعملية التليد، لهذا ولزيادة معرفتنا وتحسين فهمنا فانه من المهم دائما دراسة الظروف وتجريبها والعوامل المختلفة التي تؤثر في سلوك عملية التليد. واذا لم نتمكن من التغلب على مصاعب تحضير الطور (Bi-٢٢٢٣) لكانت فرصة التقدم والمعالجة التكنولوجية لدراسة هذا الطور ضعيفة جدا. الشكل (٤-١٠) يمثل تركيب (BSCCO).



الشكل (٤-١٠) التركيب البلوري لاطوار النظام فائق التوصيل (BSCCO) .
 (A)Bi-2201 (B)Bi-2212 (C)Bi-2223

الفصل الخامس

طرق تحضير المواد فائقة التوصيل الكهربائي

Conduction Material Preparation Methods

١-٥ المقدمة (Introduction):

يجب اختيار العناصر التي يمكن من خلالها التوصل إلى تحضير موصلات فائقة وخطها بنسب وزنية، وفق الصيغة الكيميائية لتفاعلها، أما تحت ضغط أو بدون ضغط والتأكد من وجود الأجهزة اللازمة لتحضير المركب والأجهزة التي من خلالها يتم فحص المركب الناتج. واعتماد المعايير الاتية في اختيار اكاسيد المواد. هناك عدة معايير يمكن اعتمادها لاختيار العناصر المعتمدة لتحضير الموصلات الفائقة هي:-

- أن يكون عدد تكافؤ ذرات العنصر بين (٢-٨) وتشمل العناصر في الأعمدة الداخلية للجدول الدوري. شكل (٢-٢)
- أن أرقام التكافؤ ٧,٥,٣ للعنصر أرقام فردية مناسبة للحصول على الموصلية الفائقة، أما الأرقام ٦,٤,٢ أرقام تكافؤ زوجية للعنصر غير مناسبة للحصول على الموصلية الفائقة.
- أن يكون الحجم الذري والكثافة الذرية للعنصر صغيران.
- المعادن القلوية لا تصلح لتحضير الموصلية الفائقة بالرغم من عدم وجود سند نظري.
- المعادن الغير مغناطيسية لا يحدث فيها تحول إلى موصلات فائقة.

٢-٥ الأجهزة (Apparatus):

تستخدم الأجهزة الآتية في تهيئة وتحضير المواد المستخدمة في الموصلات الفائقة وهي:

- جهاز طحن لغرض سحق وتنعيم وخلط العناصر المراد استخدامها.
- فرن للحرق والتسخين.
- جهاز كبس لصنع نماذج متماسكة من الخليط.
- جهاز فحص مقاومة النماذج التي تم تهيئتها لغرض معرفة سلوكها ومقاومتها الكهربائية.

٣-٥ التحضير (Preparation):

هناك عدة طرق لتحضير الموصلات الفائقة ذات الدرجات الحرجة العالية T_c هي:

١ - التفاعل الكيميائي للمساحيق الصلبة متضمناً ما يلي:

- أ. تهيئة العناصر المراد استخدامها لتحضير الموصل الفائق .
- ب. كتابة المعادلة التفاعلية وتوازنها.
- ج. حساب النسب الوزنية لكل عنصر وحسب معادلة التفاعل .
- د. الخلط (Mixing)، الكلسنة (Calcination) والتلييد (Sintering) بكميات متكافئة (متناسبة) (appropriate) لمساحيق المواد والتي تكون بشكل أكاسيد أو كربونات تخلط وتطحن بواسطة طاحونة كروية (Ball Mill).
- هـ. عمل محاليل كيميائية سائلة كثيفة (Coprecipitation) والتجميد والتجفيف.

٢- طريقة (Sol-gel) احتياطية لتحضير خليط متجانس من محلول

جيلاتيني:

يلبد المسحوق بدرجات حرارة بين $(800-900)^{\circ}\text{C}$ لبضع ساعات، يبرد المسحوق أعلاه، ويطحن ويكلس مرة أخرى، وتعاد العملية عدة مرات للحصول على مسحوق متجانس. يكبس المسحوق لصنع أقراص (pellets) ومن ثم يُلبد. إن ظروف التلبيد مثل درجة الحرارة، زمن التلدين، الجو، معدل التبريد مهمة للحصول على موصلات فائقة بدرجات حرارة حرجة عالية T_c . فمثلاً، إن مركب $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x})$ يحضّر بحرقه وتلبيده من خليط متجانس $(\text{Y}_2\text{O}_3, \text{BaCO}_3, \text{CuO})$ بنسب وزنية متناسبة، ومن ثم يحرق بدرجات حرارة $(900-800)^{\circ}\text{C}$ ، ويلبد بدرجة حرارة 950°C في محيط أوكسجيني. إن قياس اتحادية عنصر الأوكسجين في هذه المادة حاسم جداً للحصول على مركب $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x})$ فائق التوصيل. في وقت التلبيد، يتشكل مركب $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7)$ شبه الموصل رباعي الزوايا الذي يتحول إلى $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x})$ فائق التوصيل عند تبريده ببطء في محيط أوكسجيني. إن امتصاص وفقدان الأوكسجين يمكن عكسه في مركب $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x})$. ويمكن تحويل عينة $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x})$ المعيني المستقيم المؤكسد إلى $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7)$ رباعي الزوايا بالتسخين في الفراغ بدرجة حرارة تزيد عن 700°C . إن تحضير الموصلات الفائقة بدرجات حرارة حرجة عالية T_c من العناصر $(\text{Bi}, \text{Tl}, \text{Hg})$ يصعب مقارنته مع (YBCO) ، حيث تبرز مشاكل في هذه الموصلات الفائقة بسبب وجود ثلاثة أطوار أو أكثر متشابهة في البنية

الطبقية. بالتالي، يحدث النمو البيني الترابطي والعيوب مثل أخطاء التراصّ خلال التركيب ويصبح من الصعب عزل طور واحد فائق التوصيل. بالنسبة لمركب (Bi-Sr-Ca-Cu-O)، من السهل نسبياً تحضير طور الـ (Bi-2212) ($T_c \approx 85K$)، بينما من الصعب جداً تحضير طور واحد من الـ (Bi-2223) ($T_c \approx 110K$). ولا يظهر طور Bi-2212 إلا بعد بضع ساعات من التليد بدرجة حرارة ($870-860^\circ C$)، لكن الجزء الأكبر من طور Bi-2223 لا يتشكل إلا بعد زمن تفاعل طويل لأكثر من أسبوع بدرجة حرارة $870^\circ C$. وعلى الرغم من أن استبدال الرصاص Pb في مركب (Bi-Sr-Ca-Cu-O) يُجد بأنه يعزز نمو طور درجة الحرارة العالية T_c ، إلا إن الحاجة إلى زمن تليد طويل لا ازلت مطلوبة .

مثال/ لتحضير موصل فائق من ($Cd Be Cu_2 O_7$):

١- جلب أكاسيد العناصر أعلاه وهي:



٢- معادلة التفاعل:



$$n = \frac{m}{w} \quad m = nw$$

$$m = Mn \quad n = \frac{m}{M}$$

حيث ان

$$\text{عدد الذرات} = n$$

$$\text{وزن العنصر} = m$$

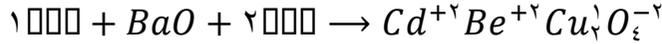
$$W = \text{الوزن الكلي للمركب}$$

$$M = \text{الوزن الجزيئي}$$

$$200 = 0.5 \text{ g} \div M_{\text{CuO}} = 2M$$

$$200 = 0.3 \text{ g} \div M \times M_{\text{CdO}} = 1$$

$$200 = 0.6 \text{ g} \div M \times M_{\text{BeO}} = 1$$



$$100 \div 1 = 157.26 \text{ gm} \times \text{CdO} = 157.26$$

$$100 \div 1 = 157.33 \text{ gm} \times \text{BeO} = 157.33$$

$$100 \div 2 = 159.1 \times \text{CuO} \rightarrow 79.55$$

$$\text{CdO} \rightarrow 1.574 \text{ gm}$$

$$\text{BeO} \rightarrow 1.5373 \text{ gm}$$

$$\text{CuO} \rightarrow 1.591 \text{ gm}$$

٣- تخلط هذه النسب وتتبع خطوات التحضير السابقة .

٣-٥ طريقة تفاعل الحالة الصلبة Solid State Reaction Method

تعد طريقة تفاعل الحالة الصلبة من أقدم وأسهل وأكثر الطرائق شيوعاً وهي فعالة في تحضير كل مواد الفائقة التوصيل، ويتم من خلالها التفاعل المباشر

لمزيج المساحيق عند درجة حرارة عالية تتراوح بين (٧٠٠-١٠٠٠) °C وذلك لتجهيز التفاعل بالطاقة وان المادة الناتجة من هذا التفاعل تكون دائماً مستقرة ثرموداينميكياً.

تتضمن هذه الطريقة تهيئة المواد الاولية وتهيئة الخلطات للمواد المتفاعلة وعلى شكل أكاسيد نقية بحسب النظام فائق التوصيل ولجميع المركبات التي تحت الدراسة، كما تم توضيح المعادلات الخاصة بتحضير الانظمة فائقة التوصيل ولجميع المركبات، وكما مبينة في الجدول الاتي(١-٥):

الجدول (١-٥) المعادلات الخاصة بتحضير الاكاسيد النقية للمركبات التي تحت الدراسة

النظام	الاكاسيد النقية
(HBCCO)	$\text{HgO}+2\text{BaO}+2\text{CaO}+3\text{CuO} \rightarrow \text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$
(BBCCO)	$\text{Bi}_2\text{O}_3+2\text{BaO}+2\text{CaO}+3\text{CuO} \rightarrow \text{Bi}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$
(PBCCO)	$\text{Pb}_2\text{O}_3+2\text{BaO}+2\text{CaO}+3\text{CuO} \rightarrow \text{Pb}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$
(YBCO)	$\text{Y}_2\text{O}_3+2\text{BaO}+3\text{CuO} \rightarrow \text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+\delta}$

وتم من خلال ذلك إجراء الحسابات اللازمة للحصول على نسبة الاوازن الذرية لكل خلطة، وكما مبينة في الجدول الاتي (٢-٥):

الجدول (٥-٢) الاوازن الذرية للأكاسيد المستخدمة

النظام	مسحوق المادة	نسبة الاوازن الذرية
HBCCO	HgO	$((200.59)+(15.9994))$
	BaO	$2*((137.33)+(15.9994))$
	CaO	$2*((40.078)+(15.9994))$
	CuO	$3*((63.546)+(15.9994))$
BBCCO	Bi ₂ O ₃	$2*(1/2)*((208.98)*2+(15.9994)*3)$
	BaO	$2*((137.33)+(15.9994))$
	CaO	$2*((40.078)+(15.9994))$
	CuO	$3*((63.546)+(15.9994))$
PBCCO	Pb ₂ O ₃	$2*(1/2)*((207.2)*2+(15.9994)*3)$
	BaO	$2*((137.33)+(15.9994))$
	CaO	$2*((40.078)+(15.9994))$
	CuO	$3*((63.546)+(15.9994))$
YBCO	Y ₂ O ₃	$(1/2)*((88.906)*2+(15.9994)*3)$
	BaO	$2*((137.33)+(15.9994))$
	CuO	$3*((63.546)+(15.9994))$

حيث يتم تجفيف كميات مناسبة من مساحيق الاكاسيد تحت درجة حرارة (١٢٠°C) وذلك للتخلص من الرطوبة، ومن ثم توزن نسبة كل مسحوق وكلاً على حدة. بعد ان يتم تهيئة المواد الاولية وتهيئة الخلطات للمواد المتفاعلة واجراء الحسابات اللازمة للحصول على نسبة الاوازن الذرية

المناسبة لكل خلطة ،يمكن ان نورد خطوات تحضير النموذج بطريقة تفاعل الحالة الصلبة حسب ما يأتي:

١- تجفيف المساحيق والتخلص من الرطوبة من خلال وضعها في بودقة الألومينا وادخالها في فرن لمدة ساعتين وعند درجة حرارة 120°C .

٢- وزن الكميات المطلوبة لكل مسحوق باستخدام ميزان حساس وبمدى تحسس تصل الي (٤ digit) كل على حدة.

٣- مزج المساحيق مع بعض بوساطة عمليتي الخلط والطنن وعلى مرحلتين، الاولى باستخدام الهاون اليدوي المصنوع من مادة العقيق (Gate Mortar) ولمدة ساعة كاملة ويتم خلالها بإضافة الايثانول لضمان تجانس الخليط. اما الثانية فكانت بوساطة خلاط كهربائي دوامي باستخدام كرات من الفولاذ الصلب ولمدة (٤hr). وان الهدف من هذه الآلية هو الحصول على مساحيق دقيقة وكذلك الحصول على افضل حالة من التجانس .

٤- ثم يتم تجفيف المسحوق في الفرن تحت درجة حرارة 250°C لمدة ساعة واحدة.

٥- تشكيل الخلطات على شكل اقراص اسطوانية، وباستخدام مكبس هيدروليكي وتحت ضغط كبس ($7\text{ton}/\text{cm}^2$) ولمدة دقيقة واحدة. ويفضل استعمال أسلوب الكبس المحوري من اتجاهين، وذلك لضمان أفضل وأعلى قيمة للكثافة.

٦- تليد الاقراص في الهواء، حيث يتم في هذه المرحلة اجراء عدة تجارب لاختيار الظروف المثلى في الحصول على افضل العينات والتي تشمل درجة حرارة التليد وزمن التليد المناسبة للعينات المكبوسة، وذلك للحصول على عينات متماسكة ومن اجل ضمان عملية انتشار مثلى بين الذرات، ثم بعد ذلك تم تبريد العينات الى درجة حرارة الغرفة.

٥-٤- طريقة الصول - جل :

وهي معالجة كيميائية لمحلول تستخدم لعمل المواد السيراميكية والزجاج لتشكيل اغشية رقيقة والياف ومساحيق. تستخدم عملية الصول جل تجارياً في العديد من التطبيقات، مثل تشكيل الطلاء على زجاج النافذة. حيث تعطينا هذه العملية تحكماً ممتازاً في نقاء المنتج وتكوينه لسبب أننا نبدأ بمواد نقية. كما إنه يسمح لنا بترسيب الأفلام والطلاء على مجموعة من الأسطح المختلفة، مما يتيح المرونة التي لا توجد في العديد من طرائق الطور البخاري.

وتمتاز هذه الطريقة بإمكانية الحصول على مواد عالية النقاوة وتراكيب متجانسة ويمكن انتاجها تحت درجات حرارية اقل مما في الطرائق الاخرى. والشرط الاساسي في هذه الطريقة هو ان نختار مذيباً لا يتفاعل مع المكونات. ولتوضيح الطريقة بصورة مفصلة نأخذ امثلة لتحضير بعض المركبات بهذه الطريقة حيث حضرت المركبات على شكل نترات نقية وكما مبينة في الجدول (٥-٣) الاتي:

الجدول (٣-٥) المعادلات الخاصة بتحضير النترات النقية للمركبات التي تحت الدراسة

النظام	النترات النقية
(HBCC O)	$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O}) + 2\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 3x\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ $+ x\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ $\longrightarrow \text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_{2.8}\text{Zn}_{0.2}\text{O}_{8+\delta} + 11(\text{H}_2\text{O}) + 16(\text{NO}_2)$
(BBCC O)	$2\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5(\text{H}_2\text{O}) + 2\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 3-$ $x\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O}) + x\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ $\longrightarrow \text{Bi}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_{2.8}\text{Zn}_{0.2}\text{O}_{10+\delta} + 18(\text{H}_2\text{O}) + 24(\text{NO}_2)$
(PBCC O)	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 3-$ $x\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O}) + x\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ \longrightarrow $\text{Pb}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_{2.8}\text{Zn}_{0.2}\text{O}_{10+\delta} + 11(\text{H}_2\text{O}) + 20(\text{NO}_2)$
(YBCO)	$(\text{Y}_2\text{O}_3) + 2\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + 3-$ $x\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O}) + x\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ $\longrightarrow \text{YBa}_2\text{Cu}_{2.8}\text{Zn}_{0.2}\text{O}_{7+\delta} + 11(\text{H}_2\text{O}) + 10(\text{NO}_2)$

وتم من خلالها إجراء الحسابات اللازمة للحصول على نسبة الاوازن الذرية لكل خلطة، وكما مبينة في الجدول (٤-٥) الاتي:

الجدول (٥-٤) الاوازن الذرية للنتارت المستخدمة

النظام	مسحوق المادة	نسبة الاوازن الذرية
HBCCO	$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	$((200.59) + ((214.007) + 3 * (15.9994)) + 2 * (2 * (1.0079) + (15.9994)))$
	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	$2 * ((137.33) + 2 * ((14.007) + 3 * (15.9994)))$
	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	$2 * ((40.078) + 2 * ((14.007) + 3(15.9994)))$
	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	2.8 ($(63.546) + 2 * ((14.007) + 3 * (15.9994)) + 2 * (1.0079) + (15.9994)$)
	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$	$0.2 * ((65.39) + 2 * (14.007 + 3 * (15.9994)) + 6 * (2 * (1.0079) + (15.9994)))$
BBCCO	$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$	$2 * ((208.98) + 3 * ((14.007) + 3 * (15.9994)) + 5 * (2 * (1.0079) + (15.9994)))$
	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	$2 * ((137.33) + 2 * ((14.007) + 3 * (15.9994)))$
	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	$2 * ((40.078) + 2 * ((14.007) + 3(15.9994)))$
	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	2.8 $((63.546) + 2 * ((14.007) + 3 * (15.9994)) + 2 * (1.0079) + (15.9994))$
	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$	$0.2 * ((65.39) + 2 * (14.007 + 3 * (15.9994)) + 6 * (2 * (1.0079) + (15.9994)))$
PBCCO	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	$2 * ((207) + 2((14.007) + 3 * (15.9994)))$
	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	$2 * ((137.33) + 2 * ((14.007) + 3 * (15.9994)))$
	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	$2 * ((40.078) + 2 * ((14.007) + 3(15.9994)))$
	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	2.8

		$((63.546)+2*((14.007)+3*(15.9994))+2*(1.0079)+(15.9994))$
	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6(H_2O)$	$0.2*((65.39)+2*(14.007+3*(15.9994))+6*(2*(1.0079)+(15.9994))$
YBCO	(Y_2O_3)	$(1/2)*(2(88.906) + 3*(15.9994))$
	$Ba(NO_3)_2$	$2*((137.33)+2*((14.007)+3*(15.9994)))$
	$Cu(NO_3)_2 \cdot 2(H_2O)$	$2.8*((63.546)+2*((14.007)+3*(15.9994)) + 2(2*(1.0079)+(15.9994))$
	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6(H_2O)$	$0.2*((65.39)+2*(14.007+3*(15.9994))+6*(2*(1.0079)+(15.9994))$

ويمكن ان نبين خطوات تحضير النموذج بطريقة الصول جل ما يأتي:

١. وزن الكميات المطلوبة من المواد بوساطة استخدام ميزان حساس من نوع (digit-٤) كلاً على حدة.

٢. حل وتذويب كل من $Bi(NO_3)_3 \cdot 5(H_2O)$ و $Zn(NO_3)_2 \cdot 6(H_2O)$ بحامض الخليك، وكل من $Hg(NO_3)_2 \cdot 2(H_2O)$ و $Pb(NO_3)_2$ و (Y_2O_3) بحامض النتريك وبمعدل (٣,٥ ملي لتر لكل غرام) لكل حالة وباستخدام خلاط مغناطيسي ولمدة ساعتين.

٣. تذويب بقية المركبات بالماء المقطر وبمعدل (١ ملي لتر لكل غرام) لكل حالة وباستخدام خلاط مغناطيسي ولمدة ٣٠ دقيقة .

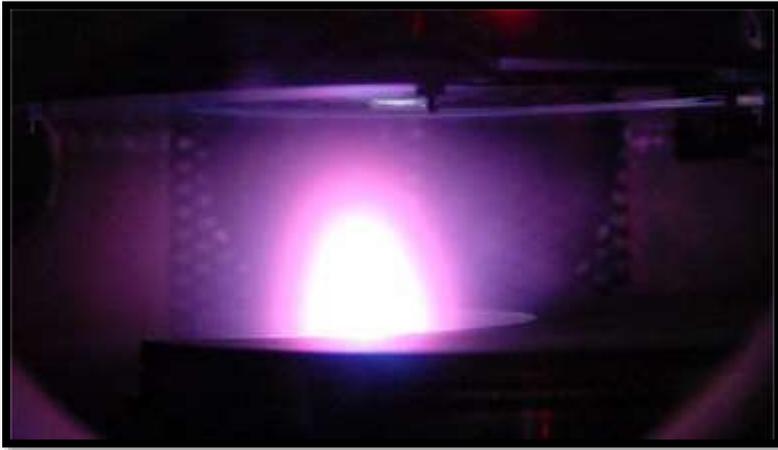
٤. اضافة بقية العناصر المذابة والمشكلة لكل مركب الى العناصر الرئيسية لكل من $Pb(NO_3)_2$ ، $Bi(NO_3)_3 \cdot 5(H_2O)$ ،

- المذاب الناتج من خلط النترات في جفنة من الألومينا وخلطها بوساطة خلاط مغناطيسي حراري عند $(60-70)^{\circ}\text{C}$ ولفترة زمنية محددة.
٥. من جهة اخرى، يبقى المحلول في $\text{PH}(1-1,5)$ لمدة $(1-1,5)$ ساعة.
٦. ثم يتم بعدها اضافة الأمونيا لرفع قيمة PH للمحلول الى $(3-4)$ للمساعدة في تشكيل الجل.
٧. بعد مدة زمنية محددة (ساعتين تقريباً) نلاحظ تشكل مادة الجل للمزيج، ثم نقوم بعدها بوقف الخلاط ونترك المزيج ليبرد وعند درجة حرارة الغرفة.
٨. ندخل الجل المشكل في فرن عند درجة حرارة 250°C ولمدة ساعتين ومن ثم نتركه ليبرد الى درجة حرارة الغرفة.
٩. حرق المزيج في الفرن عند درجة حرارة 600°C ولمدة ١٢ ساعة للتخلص من غاز النتريك.
١٠. طحن المزيج بوساطة خلاط دوامي لمدة ٤ ساعات تقريباً للحصول على مسحوق دقيق جداً.
١١. الكبس الى اقراص بقطر $(1,5 \text{ cm})$ وسمك بين $(0,15 \text{ cm}-0,25 \text{ cm})$ باستخدام مكبس هيدروليكي يدوي وتحت ضغط كبس (7 ton/cm^2) ولمدة دقيقة واحدة .

١٢. تلييد الاقراص وحرقتها في فرن عند درجة حرارة 800°C ولمدة ٢٤ ساعة لنظام (HBCCO) ولمدة ١٤٠ ساعة لنظام (BBCCO) ولمدة ٤٨ ساعة لنظامي (PBCCO) و(YBCO) وتجري هذه العملية بمعدل تسخين $(5^{\circ}\text{C}/\text{min})$ ، ومن ثم يبرد الى درجة حرارة الغرفة بمعدل التسخين نفسه.

٥-٥ طريقة الترسيب الليزر (PLD):

تقنية الترسيب بالليزر النبضي (PLD)، هي عملية تبخير سطح المواد بتوجيه نبضات الليزر المركزة على سطح المادة المستهدفة والحصول على البلازما المكونة من جزيئات المادة. تقتلع الجسيمات المستأصلة من الهدف وتتكثف على سطح الشريحة أرضيات زجاجية من نوع Aitay بأبعاد $(25,4 \times 76 \times 1)\text{mm}$ ، وتحدث عملية الترسيب في حجرة مفرغة لتقليل تناثر الجسيمات ولكي لا تفقد الإلكترونات. في هذه العملية تضرب الحزمة الليزرية النبضية المادة وتتفاعل معها بطريقة تتبخر بعض المادة وتشكل عمود بلازما. يوضح الشكل (٥-١) عمود البلازما في عملية القلع.



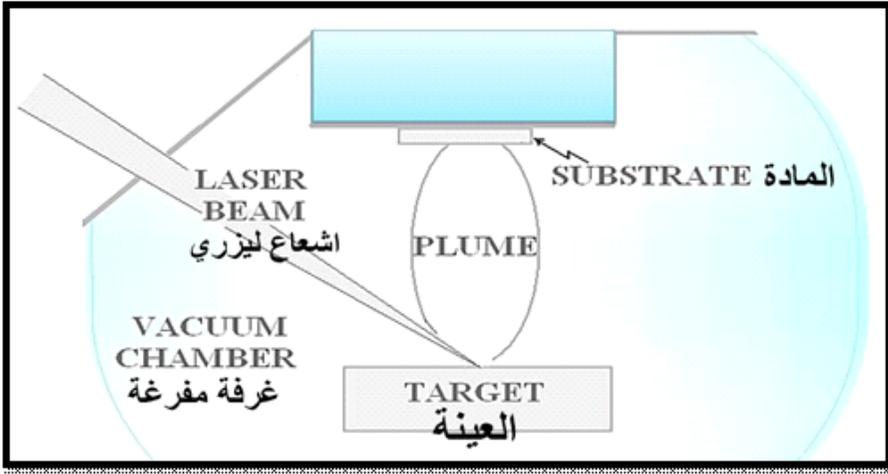
الشكل (٥-١) صورة فوتوغرافية عمود البلازما في عملية القلع.

يتفاعل هذا العمود مع السطح ويشكل الغشاء الرقيق عليه. عندما يقوم ضوء الليزر بضرب الهدف، ويتم امتصاصه عن طريق إثارة الإلكترون الذري الخارجي. عندما تتجاوز طاقة التهيج (الإثارة) طاقة الربط للمادة المستهدفة تنكسر الرابطة وتحدث عملية القلع للهدف. تعتمد كثافة قدرة العتبة اللازمة لإنتاج عمود البلازما على المادة المستهدفة، وطول موجة نبضة الليزر. تخضع عملية القلع لشروط حالة PLD القياسية بتأثير $(1-10) \text{J/cm}^2$ ، ومدى يتراوح من $(10^{15}-10^{16}) \text{atom/pulse}$ ، عادة ما تكون عملية القلع بالليزر مقسمة على مرحلتين وبوقت منفصل، هما:

١. تبخر مادة الهدف وتشكيل البلازما.

٢. توسيع وانتشار البلازما.

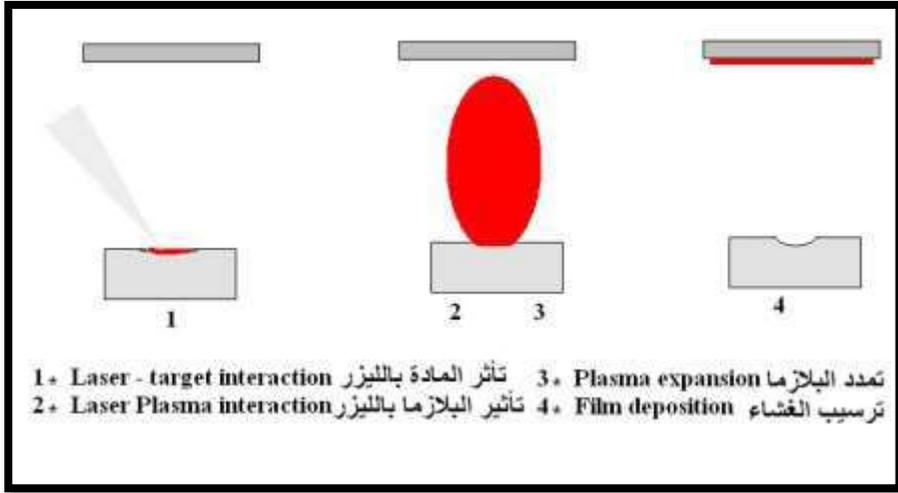
في عملية القلع بالليزر، تعمل أشعة الليزر وبشكل شائع على طول الموجة فوق البنفسجية، لأن الأطوال الموجية المؤثرة لمعظم المواد أقل بكثير من الأشعة تحت الحمراء. هذا يعزز امتصاص ضوء الليزر ويزيد من كفاءة القلع، والليزر المستخدم في عملية القلع من نوع (Nd: YAG). يوضح الشكل (٥-٢) ترسب الليزر النبضي أو القلع النبضي.



الشكل (٢-٥) ترسب الليزر النبضي أو القلع النبضي.

يتم في تقنية PLD، قصف المواد المستهدفة أولاً أو (تستأصل) لتشكل عمود من البلازما بواسطة شعاع ليزر مركّز بزاوية ٤٥° ، وعادة ما تكون المسافة بين الهدف وسطح الركيزة (السطح المارد ترسيب الغشاء عليه) هو (٢-١٠) سم. ثم بعد ذلك، تطير المادة المستأصلة على سطح الركيزة والذي يتم فيه إنتاج الأغشية الرقيقة المطلوبة. ويمكن تلخيص مراحل تشكيل الأغشية الرقيقة من خلال الترسيب بالليزر النبضي PLD بالنقاط الآتية:

١. تفاعل اشعاع الليزر مع المواد المراد ترسيبها.
٢. تطاير الذرات المستأصلة.
٣. الترسيب على سطح الهدف.
٤. التتوي والنمو للغشاء على سطح الركيزة. والشكل (٣-٥) يبين جميع هذه المراحل:



الشكل (٥-٣) مراحل تكوين الغشاء الرقيق

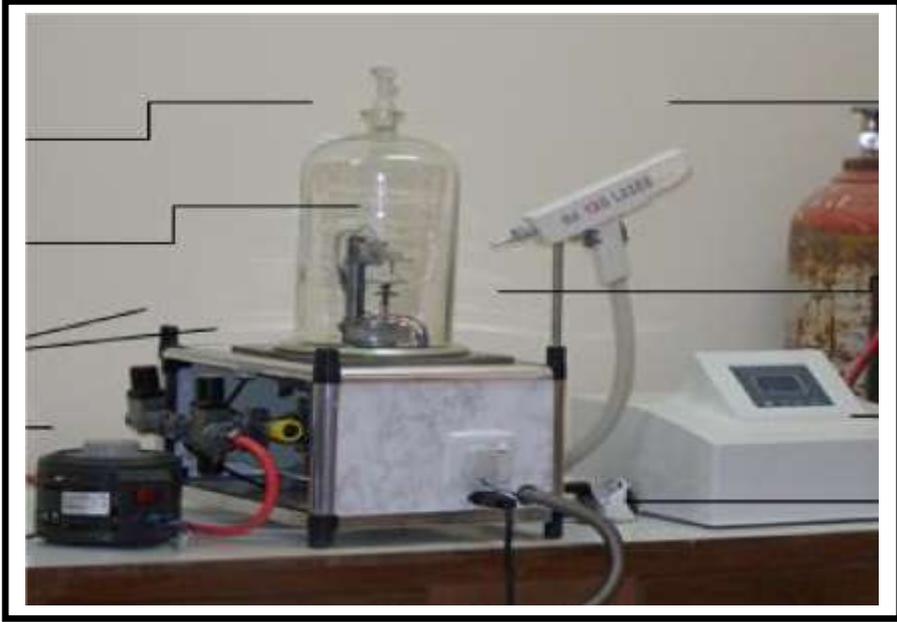
لتقنية PLD العديد من المزايا، فمن خلال هذه الطريقة يتحقق انتقال الذرات بطريقتين مختلفتين يمكن تلخيصها على النحو الآتي:

- أ- بشكل رئيسي مع تمدد الجزء المستأصل بسبب ارتفاع درجة حرارة الغيمة المقذوفة (الكثافة الأيونية) فوق السطح المستهدف بواسطة أشعة الليزر، وهذه السخونة ناتجة من التفاعل بين إشعاع الليزر
- ب- والمادة المستهدفة من خلال امتصاص الفوتونات بواسطة الإلكترونات الذرية للنظام، والطاقة الممتصة تجعل الإلكترونات في حالة متهيجة وبطاقة عالية ونتيجة لذلك يتم تسخين المواد إلى درجة حرارة عالية في وقت قصير جداً.
- ت- ان طاقة ذرات الجزء المستأصل عالية جداً وزمن الانتقال من الهدف إلى الركيزة يصبح صغيراً جداً، نحو نانو ثانية، وامكانية نقل كمية كبيرة

من المادة المستهدفة في وقت قصير يتحدد بمعدل الترسيب المرتفع لترسب الليزر النبضي.

تساعد الطاقة العالية لذرات الجزء المتأصل والتي تأتي على سطح الركيزة أثناء الترسيب في تشكيل مساحات ملساء للفيلم تتعامد مع سطح الركيزة، حيث ينتج PLD انتقالاً متساوياً تقريباً من الذرات المنزاحة إلى الركيزة وينتج عنها افلام ذات جودة عالية مع العناصر المتفاعلة قرب المادة المستهدفة.

يوضح الشكل (٥-٣) مثالا للإعداد التجريبي العام المستخدم في عمل بعض المركبات، ويمثل الهدف احد المركبات المستخدمة وهي كل من الانظمة (HBCCO)، (BBCCO) و (YBCO) وذلك باستخدام حجرة تفريغ 10^{-4} ميلي بار، وبطول موجي عند ٥٣٢ nm تعمل خلالها منظومة الليزر النبضي Nd: YaG، ومدة نبض نحو ٧ nsec وكثافة الطاقة المركزة على الهدف $4.0 - 8$ J/cm² لتوليد عمود البلازما. حيث تنمو جميع العينات في سطح الركيزة على ارضيات زجاجية وعند ٣٠٠°C، وترسبت خلالها جميع العينات للمركبات المختلفة (تم قصفها ب ١٢٠٠ نبضة خلال ٣ دقائق) بسمك مختلف حسب اختلاف المركبات.



الشكل (٥-٤) صورة فوتوغرافية لمنظومة الترسيب بالليزر النبضي.

بعد ان تم تحضير العينات بطريقة تفاعل الحالة الصلبة باستخدام الاكاسيد النقية للعناصر، (مروراً بمرحلة تجفيف المساحيق والتخلص من الرطوبة، والخلط والطحن بمرحلتين مختلفتين للحصول على مساحيق دقيقة ومتجانسة، وتشكيل الاقراص باستخدام مكبس هيدروليكي للوصول لأعلى قيمة للكثافة، وصولاً الى مرحلة التليد للأقراص وبأزمان مختلفة)، ثم يتم بعد هذه المرحلة البدء بترسيب العينات (المحضرة سابقاً) كأغشية رقيقة على ارضيات من الزجاج وعند درجة حرارة الغرفة، وباستخدام تقنية الترسيب بنبضات الليزر. ويمكن ان نورد خطوات تحضير النموذج بطريقة الترسيب بنبضات الليزر ما يأتي:

١ . يتم تحضير العينات بطريقة تفاعل الحالة الصلبة.

٢. بعد اتمام عملية التحضير بطريقة تفاعل الحالة الصلبة وتهيئة العينات، ثم نضع العينة على المسند المخصص للهدف داخل انبوبة التفريغ، وتكون المسافة بين الهدف وسطح الركيزة (السطح المراد ترسيب الغشاء عليه) هو (٥ cm).

٣. يتم تفريغ الانبوبة جيداً وتحت ضغط 10^{-4} ميلي بار، لكي نمنع من تشتت المواد المتطايرة وتركزها على سطح الركيزة، وكذلك لمنع فقدان الالكترونات.

٤. يتم وضع الليزر المستخدم (من نوع (Nd:YAG) ومدة نبض نحو ٧ nsec وكثافة الطاقة المركزة على الهدف J/cm^2 (٤.٠ - ٨) ب ازاوية ٤٥° درجة لنضمن اكبر مساحة مستهدفة من العينة لتوليد عمود البلازما.

٥. بعد تشغيل الجهاز وبمعدل ٤٠٠ نبضة بالدقيقة ولمدة ٣ دقائق ثم يتم إطفاء المنظومة بعد ان يشاهد تكوين الغشاء الرقيق، ويجب مراعاة عدم ارتفاع درجة حرارة المنظومة اكثر من درجة حرارة الغرفة ($٢٧^\circ C$) لتجنب التقليل من كفاءتها، وان حدث ذلك نقوم بتبريدها بالسرعة الممكنة.

٦. فحص العينات المحضرة قبل اجراء عملية التلدين للشرائح الزجاجية ولجميع الانظمة لمعرفة التغيرات التي تطرأ عليها بعد عملية التلدين من خلال شكلها العشوائي ونمط تداخل القمم وصعوبة حساب معاملات الشبكة.

٧. اجراء عملية التلدين للشرائح الزجاجية وحرقتها في فرن عند درجة حرارة 600°C ولمدة ٢ ساعة لجميع الانظمة (لإزالة الإجهادات المتبقية)، كلاً بمعدل تسخين واحد ($5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) ومن ثم تبرد الى درجة حرارة الغرفة بمعدل التسخين نفسه.

٨.

٦-٥ طريقة تحضير مركب $\text{HgBa}_2\text{Ca}_x\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+\sigma}$

وكمثال لتحضير المركب اعلاه طريقة مقتبسة من دليل طرق العمل لمختبر الدراسات العليا للمواد فائقة التوصيل في كلية ابن الهيثم جامعة بغداد المعد من قبل الدكتور ابراهيم التميمي

- تهيئة المواد الاتية:
- علبة اسيتون للتنظيف.
- الهيدروليك مخفف للتنظيف.
- بواق (crucible) صغيرة بعدد مناسب.
- حافظات بلاستيك صغيرة (cap).
- ملعقة الصيدلي (spatula).
- قلم سيدي (permanent).
- ملقط (tweezers).
- كامات (gag).
- كفوف طبية (glove).
- صدرية بيضاء.

- كاغد جام صفري.
 - ورق ساندوج.
 - ورق زبدة.
 - علبة كلينكس وقطن.
 - تهيئة اكاسيد المواد المطلوبة على لتحضير المركب.
 - كيفية حساب اوزان المسحوب
- أ. القيام بالحسابات بواسطة برنامج (اكسل Excel) حسب الجدول المرفق (اي من الجدول الدوري لكل مركب)، مثل المركب HgO
- ب. ناخذ الوزن الذري للـ (Hg) مضروبا في (واحد) ثم نجمعه مع الوزن الذري للـ (O) مضروبا في (واحد). من جدول الاوزان
- (٥-٥)

جدول (٥-٥) يمثل الاوزان الذرية

HgO:	2 BaO
2.97356 (1)	4.2104 (1)
2.9078 (2)	4.11728 (2)
2.449 (3)	4.02822 (3)
2.7356 (4)	3.94292 (4)
	(2-X) Ca O

ج. حساب وزن المركب HgO_2 (اولاً: الجزء الايمن) مثلاً نأخذ

$X=0$ نأخذ اولاً وزن كل من Hg و O من الجدول الدوري:

$$Hg \rightarrow 200.5923$$

$$O \rightarrow 15.9999$$

المجموع 216,5913

ثم نأخذ اوزان $2BaO$ من الجدول الدوري:

$$Ba \rightarrow 137.32771$$

$$O \rightarrow 15.9999$$

المجموع 153,32671 مضروباً في 2 فيكون الناتج 306,6

ثم نأخذ $3CuO$ من الجدول الدوري:

$$Cu \quad 63.546$$

$$O \quad 15.9999$$

المجموع 79,545 مضروباً في 3 فيكون الناتج 238,635

ثم نأخذ CaO من الجدول الدوري:

$$Ca \quad 40.08$$

O ١٥.٩٩٩٩

المجموع مضروباً في (٢-X)

ثم نأخذ XLaO من الجدول الدوري:

La ١٣٨.٩٠٥٤٧

O ١٥.٩٩٩٩

المجموع ١٥٤,٩٠٥٣٧ مضروباً في مقدار $X=٠$ فيكون المجموع = صفراً.

نوجد مجموع النواتج الصف الأول من الجدول

$$\text{Total} = 216,0913 + 103,32671 + 238,635 + 0 + 30,98089 + \text{الايمن} \\ (= 874,06)$$

أ. الجزء الأيسر من الجدول أعلاه:

مثلاً HgO: نقسم وزن HgO على مجموع الصف الأول: $0.247796 =$

$$\frac{216.089}{874.06}$$

ونضرب الناتج في عدد العناصر وهو (٦) فيكون الناتج هو:

$$0.247796 \times 6 = 1.48678$$

وهكذا لباقي العناصر، فمثلاً ٢BaO:

- ٣٠٦ مقسوم على ٨٧٤,٠٦ ينتج ٠,٣٥٠٧٧ ونضربه في ٦ فيكون

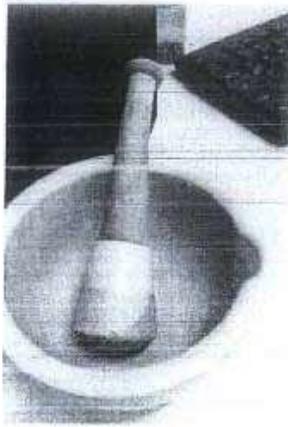
الناتج ٢,١٠٥٢٦٦.

- طحن المواد بواسطة هاون العقيق (agate mortar).

- تهيئة الميزان الحساس (balance)، كما يأتي:
- نضغط زر التشغيل (ON/OFF).
- انتظر ثواني حتى يظهر رقم، اضغط زر (Tare) الموجود في وسط
الواجهة الامامية للجهاز ليظهر رقم مكون من اصفار فقط.
- اقطع ورقة زبدة صغيرة وضعها على كفة الميزان حتى يظهر رقم معين
ثم اضغط على زر (tare) لتظهر اصفار فقط.
- ضع كمية من المادة المطلوب ايجاد وزنها باستخدام ملعقة الصيدلي
قليلا قليلا.
- نلاحظ قراء الميزان حتى نصل الى قراءة الوزن المطلوب.
- بعد وزن $x=0$ مثلا لكل مركب، وكذلك $x=0,2$ و $x=0,4$ و $x=0,6$.
- خذ المواد لـ $x=0$ فقط جميعها واخلطها في الهاون شكل (0-0) مع
سكب القليل من الاسيتون مع

ملاحظة (notice):

يجب ظهور اربعة مراتب بعد الفارزة للحصول على الدقة المطلوبة.



شكل (٥-٥) يمثل الهاون

المسحوق ليتحول الى مايشبه العجينه وذلك لضمان عدم تطاير قسم من المادة اثناء السحن، وباستمرار السحن لنصف ساعة تقريبا سيتم تبخر الاسيتون من المواد شيئاً فشيئاً حتى تعود العجينة مسحوقاً مرة اخرى فتوضع في علبة نظيفة يكتب عليها بواسطة قلم السيدي ($x=٠$).

- ثم خذ المواد ل ($x=٠,٢$) فقط جميعها واجر عليها نفس الخطوتين السابقتين.

ويحصل الشيء نفسه ل $x=٠,٤$ وكذلك $x=٠,٦$.

- الان اصبح لدينا خليط ل $x=٠,٦$, $x=٠,٤$, $z=٠,٤$, $x=٠,٢$, $x=٠$ جاهز للمسحوق.

- التجفيف (drying):

أ. ضع كل مسحوق في جفنة خزفية (بودقة) شكل (٥-٦) ونكتب

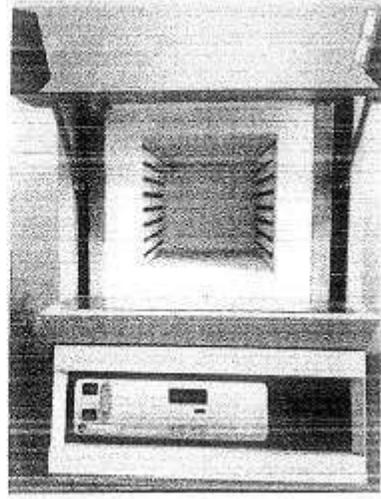
على جسم البودقة $x=٠$ وكذلك باقي البواق ($x=٠,٢$ $x=٠,٤$

$x=٠,٦$).



شكل (٦-٥) يمثل البوداق

ب. ضع هذه البوداق في الفرن شكل (٧-٥) ذي درجة الحرارة ١٠٠ درجة ولفترة زمنية قدرة ساعة واحدة، بعدها نطفئ الفرن ونستخرج البوداق حيث هنا تمت عملية التجفيف من بقايا الاسيتون وبخار الماء ان وجد.

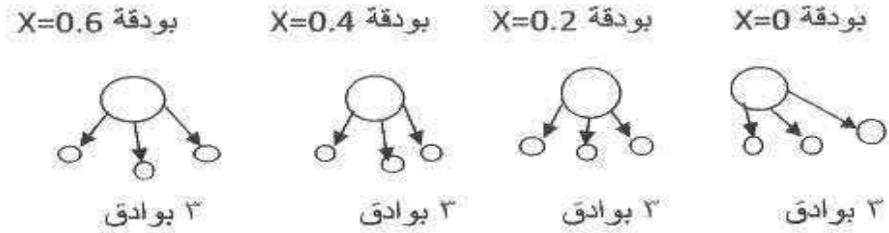


الشكل (٧-٥) يمثل الفرن

- السحن:

- أ. خذ البودقة الاول ($x=0$) ووضف الى محتواها مسحوق (HgO) واخلطه بواسطة السباجولا (spatula) اولا ثم بواسطة الهاون.
- ب. تجري نفس العملية لباقي البوداق، اي اضف (HgO) اوكسيد الزئبق لكل واحدة منها.

- قسم محتوى كل بودقة الى عدة اجزاء كما في الشكا (٥-٨) في عدة بوداق اخرى، مثلا ثلاثة اجزاء. او وزن مثلا كل ٢ غم في بودقة واحدة، وبما انه لديك اربعة مخاليط كل على حدة:

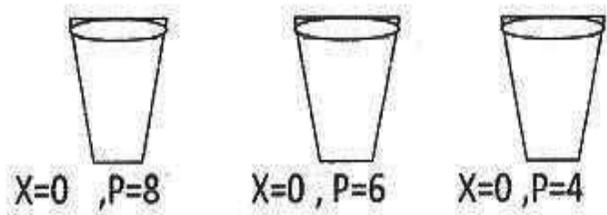


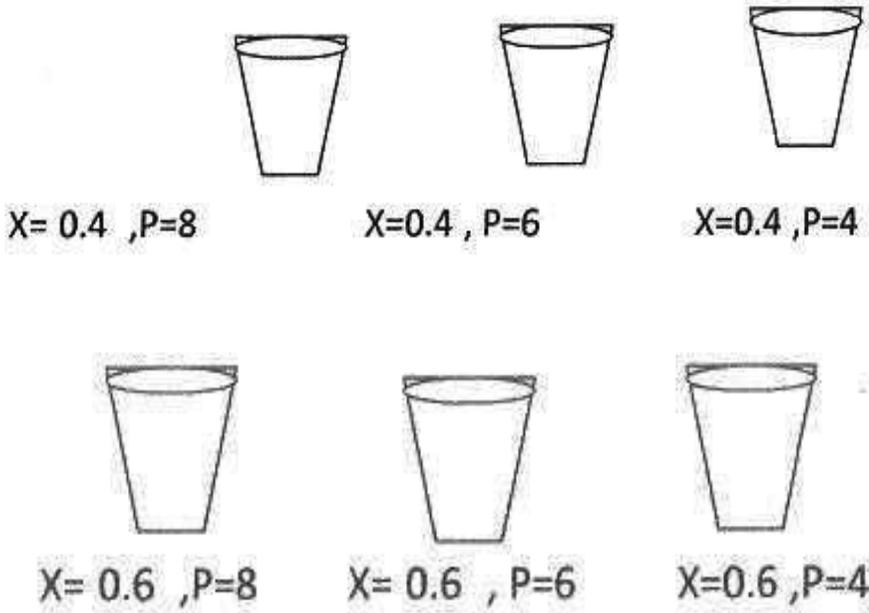
الشكل (٥-٨) يمثل البوداق

فيصبح لديك مثلا ١٢ ورقة (ثلاثة من $x=0$ وثلاثة من $x=0,2$ وثلاثة من $x=0,4$ وثلاثة من $x=0,6$).

- اكتب على جسم البوداق الثلاثة الاولى التي تخص $x=0$ الاتي:

- قم بنفس الاجراء للبوداق الباقية:





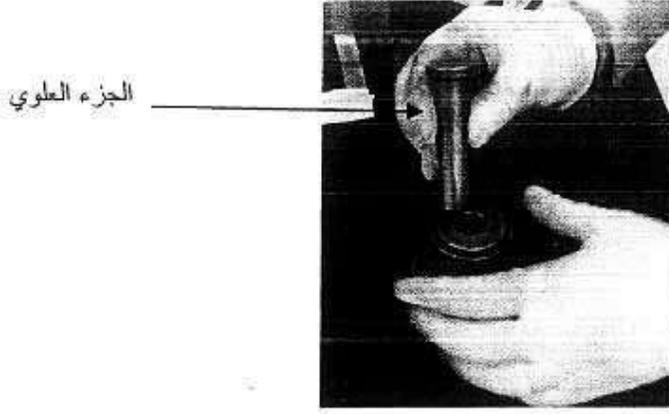
– الكبس (COMPACTION):

أ. ضع محتوى البودقة الاولى (مثلا $x=0$, $p=6$) على ورقة الزبدة
 كما في الشكل (٥-٩) ثم هبئ القالب الخاص بالكبس كما في
 الشكل (٥-١٠):



الشكل (٥-٩) يمثل ورقة الزبدة

ارفع الجزء العلوي من القالب ثم صب في موضعه (حيث توجد فتحة) المسحوق (powder). ثم اغلق الفتحة بالابهام وحرك القالب يمينا ويسارا والى الامام والخلف ليتجانس وضع المسحوق داخل القالب.
 ب. ثم اعد الجزء العلوي (upper) من القالب الى موضعه بهدوء تام.

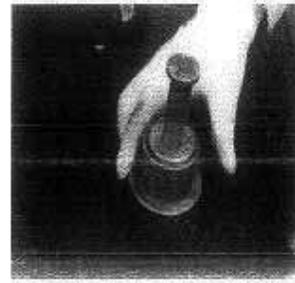


الشكل (١٠-٥) يمثل نموذج قالب

ج. ضع القالب (mold) في داخل المكبس الشكل (١١-٥)



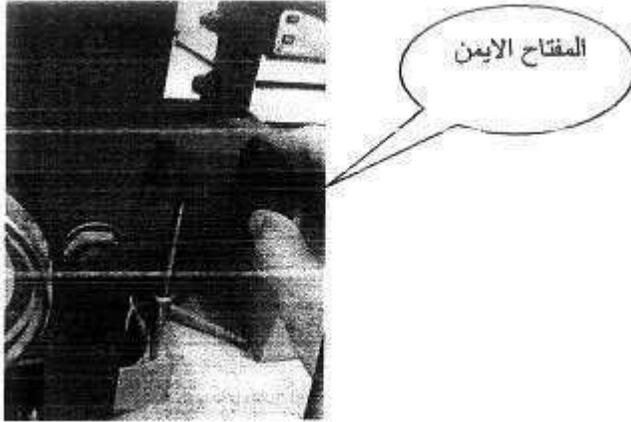
القالب داخل المكبس



تجهيز القالب

الشكل (١١-٥) مكبس

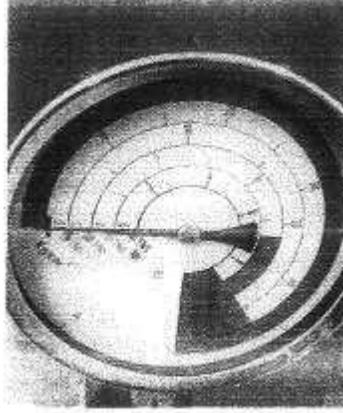
واغلق المفتاح الایمن للمكبس (وهو عتلة صغيرة) بواسطة اليد.



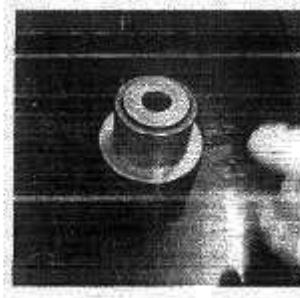
- ارفع الذراع الایمن (Lever) واخفضه عدة مرات حتى تحصل على الضغط المطلوب.



- ومع رفع وخفض الذراع يجب النظر الى مقياس الكبس (cage) الموجود في واجهة المكبس وتكرر العملية حتى نصل الى قيمة الكبس المطلوب مثلا ٤ طن.

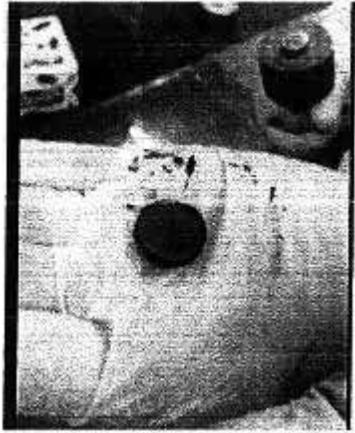


- ١- يجب الانتظار لمدة دقيقة ليتم الكبس بشكل جيد.
٢- بعدها نحرر الذراع ونحصل على النموذج المكبوس كالآتي:



- أ. نقلب القالب راسا على عقب.
ب. نعيد القالب بعد قلبه الى وضعه الطبيعي.

ج. ضع القالب في المكبس واقفل المفتاح الايمن وحرك الذراع قليلا وبهدوء حتى يضغط على راس القالب مع وضع اصبع اليد تحت القالب لتفادي سقوط العينة الناتجة.

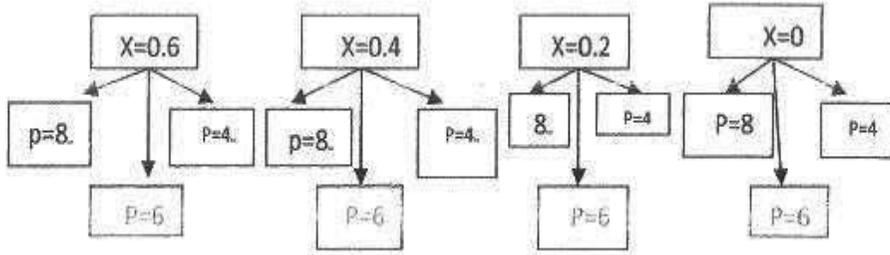


د. حتى يتم نزول العينة وقد تكونت على شكل قرص، اعد عندئذ فتح المفتاح الايمن لتحرير القالب.

هـ. ارفع القالب من المكبس واقبله راسا على عقب وقد اصبحت العينة على راحة يدك ثم بواسطة الملقط وبهدوء احملة ثم ضعها في بودقة واكتب عليها (مثلا: $p=6, x=0$)

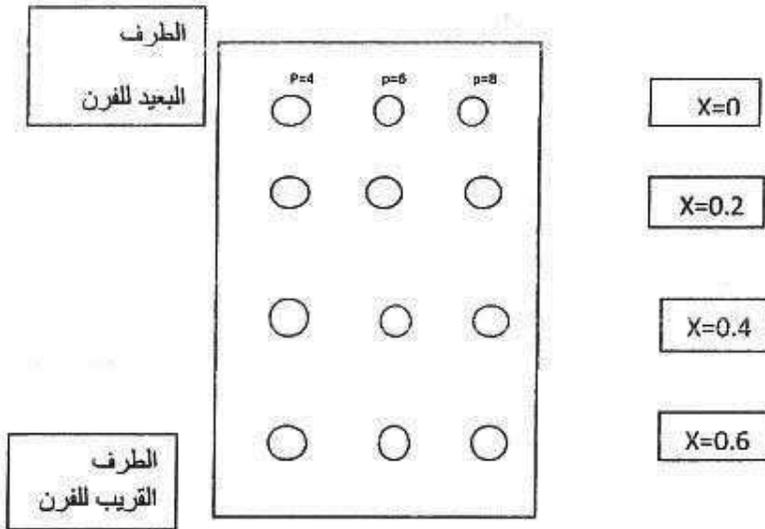
و. اجر الخطوات السابقة على العينات الاخرى وبنفس الكيفية وعلى ضغوط اخرى

($p=8, p=10$) يصبح لدينا ١٢ عينة.



– التلييد (sintering):

نضع العينات (specimens) الموجودة في البواق داخل فرن (c ٨٥٠) لمدة ٢٤ ساعة بمعدل زيادة ٥C/h، مع رسم خارطة لمواقعها وذلك لان الكتابة على البواق سيتم مسحه بسبب الحرارة الفرن العالية. فتكون الخارطة مثلا بالشكل الاتي:

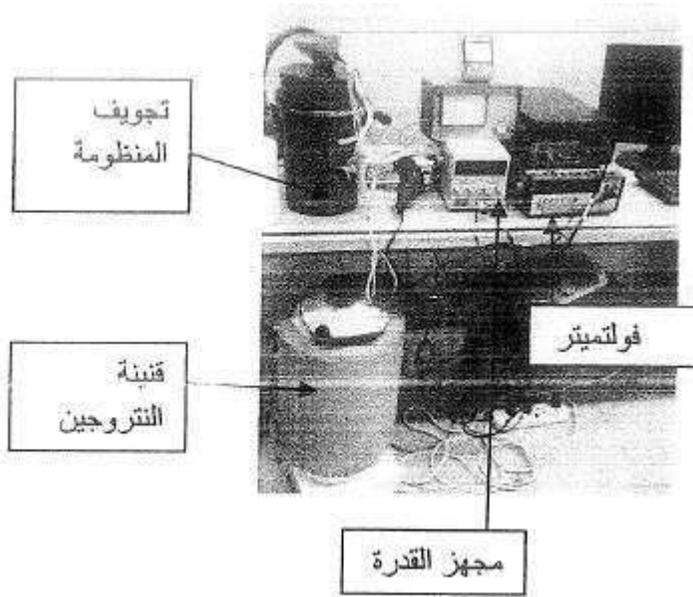


– يتم اطفاء الفرن بعد مضي ٢٤ ساعة دون ان يفتح الفرن الى ان تمر ٢٤ ساعة اخرى لكي تبرد العينات ومن ثم اخرجها.

- احتفظ بكل عينة بلفافة كلينكس وتوضع داخل علبة بلاستيكية حافظة لتلافي كسرها.

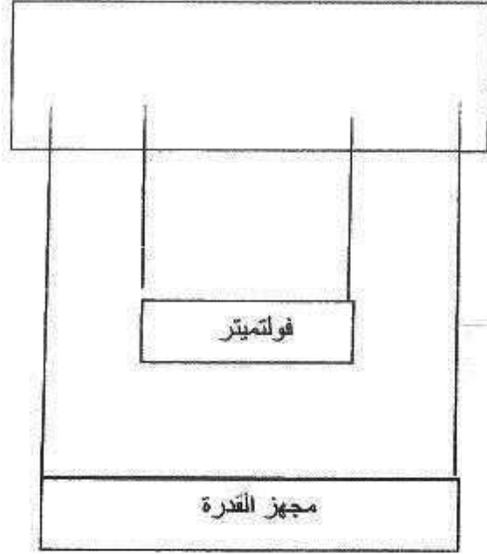
- استعمل منظومة الاربعة اطراف (4-prope):

تتكون المنظومة من تجويف منظومة التبريد، ثرموميتر نوع (Eclipse MT- ٤٠١١) لقياس درجة الحرارة واسلاك نحاسية لتوصيل الاطراف الاربعة مع استعمال معجون الفضة، ومجهاز قدرة نوع () وفولتميتر نوع () لقياس فرق الجهد، ومقياس الضغط، وجهاز تفريغ الهواء (vacume) لتفريغ تجويف منظومة التبريد، وملي اميتر لقياس التيار المار في العينة.



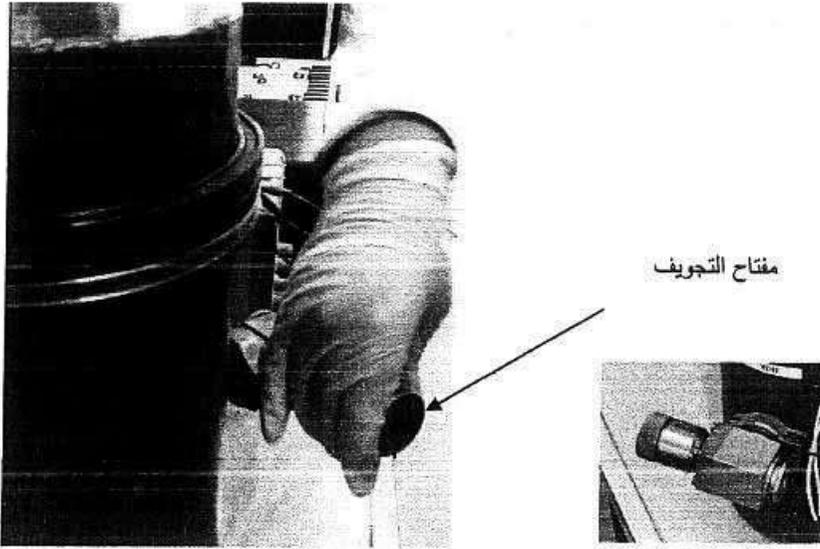
توصيلات النقاط الاربعة:

تربط النقطتان الداخليتان الى نانو فولتمتر والنقطتان الخارجيتان الى جهاز قدره رقمي.



وبعد اكمال التوصيلات:

- أ. نظف موضع العينة بالاسيتون.
- ب. ضع العينة على القرص، ثم ثبت الصامولات على البراغي بهدوء لتلافي كسر العينة.
- ج. ضع عجينة الفضة على الاقطاب الاربعة وثبت الاطراف على جسم العينة.
- د. احكم غلق مفتاح التجويف.



هـ. شغل المفرغ (الفاكيوم) وانظر الى مؤشر مقياس الضغط حتى يصل الى القيمة (١٠).

و. صب النتروجين في التجويف، وفي نفس الوقت افتح شاشة الحاسبة واضغط على زر (setting) فيظهر في الشاشة خط ازرق يتقدم نحو اليمين.

ز. لاحظ وجوب ان يثبت مقدار درجة حرارة النتروجين على (-١٩٦) على شاشة الترموميتر فيجب التوقف عن اضافة النتروجين وكذلك ثبوت قيمة التيار على (٢٠A).

ملاحظة:

عند هبوط درجة الحرارة عن (١٧٢) يجب اضافة كمية اخرى من النتروجين

ح. عند وصول درجة الحرارة الى ١٢٥ التفت الى شاشة الحاسبة واضغط
(stop).

ط. اضغط على الخزن (save) بعد ملاحظة السجل (record) (يجب ان
يتوفر اربعة اصفار على الاقل بعد الفارزة.
ي. نلاحظ وصول درجة الحرارة مثلا ١٤٤ فنحولها:

$$273-144=129$$

ك. نلاحظ اخر قراءة في الحاسبة.

- بعد انتهاء هذه العملية تهيأ لعينة اخرى وذلك بفك مفتاح التفريغ وارفع
غطاء تجويف حاوية النتروجين وفرغ ما تبقى منه في قنينة الغاز مرة
اخرى.

ملاحظة: استعمل الشسوار لاعادة اسطوانة المنظومة الى درجة حرارة الغرفة.

قراءة الحاسبة:

١. انقر ايقونة البرنامج (M٣٥٠٠A-AR-TOOL).
٢. اضغط الخيار (setting) ومنه اختر (setting mode).
٣. ستظهر لائحة اختر منها (save).
٤. ثم من المسطرة اختر:

Please select a record ↑

نختار منه رقم السجل (record)، مثلا: ١ record

٥. اضغط موافق (ok).

٦. وعندما يصل مقياس الضغط الى ١٠ (max) نبدأ بضخ سائل
النتروجين وعندما تكون  درجة حرارة السائل في شاشة
الثرموميتر ١٧٢ اضغط على زر (play)

٧. يستمر تسجيل البيانات الى ان تصبح درجة حرارة العينة (٣٠) مثلا
عندئذ اضغط (stop)

٨. اضغط (record)، ثم اضغط (view record)، اختر (١ record)
مثلا.

٩. ثم اضغط (output to save) وستظهر نافذة (save as).

١٠. اختر اسما للعينة واضغط (save).

١١. اضغط (exite).

وتعاد العملية لبقية العينات.

رسم المنحنيات:

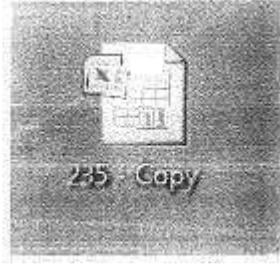
لرسم منحنيات النتائج التي حصلت عليها من خطوات العمل السابقة اجر ما
يأتي:

مثلا: العينة (X=٠, P=٨, T=١٤٢):

١. افتح صفحة القراءات التي تم تسجيلها في اكسل وظلل عمود القراءات ثم

اضغط (CTRL+C) لنسخ العمود.

٢. اذهب الى الايقونة الاصلية (COPY-٢٣٥) في سطح المكتب وفتحها.



٣. القراءات موجودة في يسار الصفحة، ظل العمود A ثم اضغط على (CTRL+V) للصقه.

A1		fx		0.041802365
	A	B	C	D
1	0.041802	1	272	0.021091
2	0.041799	2	271	0.02109
3	0.041799	3	270	0.021089
4	0.041781	4	269	0.02108
5	0.041761	5	268	0.021071
6	0.041718	6	267	0.021049
7	0.041712	7	266	0.021045
8	0.041684	8	265	0.021031
9	0.04168	9	264	0.02103
10	0.041638	10	263	0.021008
11	0.041635	11	262	0.021007
12	0.041582	12	261	0.02098

٤. بما ان درجة الحرارة هي (١٤٢) فننزل بالعمود (B) الى حد الرقم ١٤٢ ونظل الصف المرقم ١٤٢ بلون مميز.

141	0.03428	141	132	
142	0.034252	142	131	0
143	0.034226			
144	0.033894			

٥. ابدأ من اسفل العمود A (نهاية العمود) وظلل باتجاه الاعلى الى حد ١٤٢.



141	0.03428	141
142	0.034252	142
143	0.034226	
144	0.033894	
145	0.033824	
146	0.033791	
147	0.033554	
148	0.033403	
149	0.033101	
150	0.033077	
151	0.033027	
152	0.032764	
153	0.032604	

٦. اضغط (CTRL+C) لاجل نسخ المحتويات.

٧. ظلل ابتداءً من اعلى العمود الى حد ١٤٢ واضغط (CTRL+V) لاجل اللصق.

٨. ظلل ماموجود اسفل ١٤٢ في العمود (D) ثم احذفه.



٩. اجعل محتوى اخر خلية في العمود D يساوي صفرا.

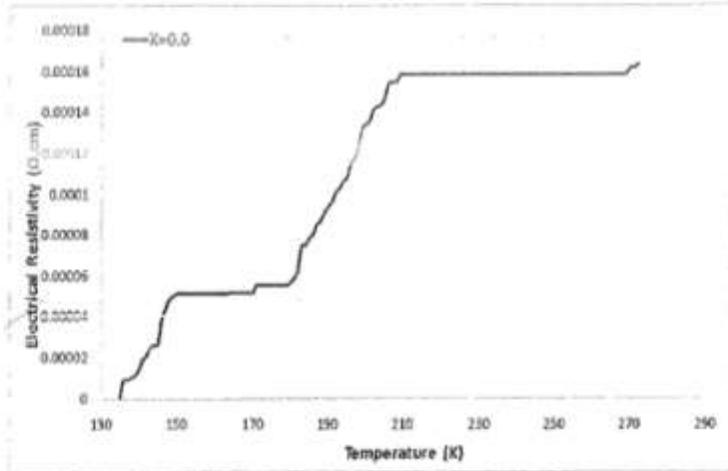
١٠. من تنسيق محور (بالضغط باليسار على المحور y) فتظهر اللائحة

الآتية:



١١. اختر الحد الأدنى والحد الأقصى (كلمة ثابت) وضع القيم المناسبة للرسم

١٢. حفظ باسم.



ايجاد ثوابت الشبكية (a,b,c):

بعد فحوصات جهاز الـ (x-ray) واخذ بطاقة (card) القياسات العالمية (standard)

00-045-0615 (Fixed Slit Intensity) - Cu Kα1 1.54056Å

2θ	d(Å)	I	h	k	l	*	2θ	d(Å)	I	h	k	l	*
5.6964	15.501800	28	0	0	1		41.5489	2.171700	4	1	0	6	
22.5894	3.932900	16	0	0	4		43.8975	2.060800	27	1	1	5	
25.8343	3.445800	37	1	0	2		46.6377	1.945900	8	1	0	7	
26.7155	3.334100	3					47.2761	1.921100	47	2	0	0	
28.3131	3.149500	17	0	0	5		48.0703	1.891200	41	1	1	6	
28.8128	3.096000	100	1	0	3		51.9949	1.757300	22	1	0	8	
29.8188	2.993800	7					52.6392	1.737300	8	1	1	7	
32.5204	2.751000	88	1	0	4		54.5666	1.680400	7	2	1	2	
32.9926	2.712700	68	1	1	0		56.2027	1.635300	26	2	1	3	
33.4827	2.674100	21	1	1	1		57.6161	1.598500	25	1	0	9	
34.0598	2.630100	64	0	0	6		58.4486	1.577700	27	2	1	4	
36.8345	2.438100	48	1	0	5		59.4581	1.553300	17	2	0	6	
37.5544	2.393000	6	1	1	3		61.2986	1.511000	12	2	1	5	
38.8504	2.316100	4					62.8965	1.476400	5	1	1	9	
39.9362	2.255600	16	0	0	7		63.5007	1.463800	14	2	0	7	

اوجد قيم الثوابت كما ياتي:

١. استخدم الكارت الستاندر (يفضل سحبه على ورق).

٢. افتح نتائج (X-ray) للعينة الاولى، مثلا: a)

٣. كون جدولاً كما ياتي:

ت	d	fwhm	h k l
15	25.8795	3.43997	1 0 2
	25.8343	3.44580	قيم h,k,l من الكارت
19	28.7650	3.10112	103
	28.8128	3.09600	قيم h,k,l من الكارت
	46.6066	1.94718	107
53	43.8764	2.06180	115
	43.8975	2.060800	قيم h,k,l من الكارت
62	47.2911	1.92058	200
	47.2761	1.921100	قيم h,k,l من الكارت

٤. طبق القانون الآتي:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

اولا على حالة $hkl=200$ وهي الاخيرة اعلاه وذلك لوجود قيمة h فقط بينما $H=k=0$ كالاتي:

$$\frac{1}{(1.92058)^2} = \frac{2^2}{a^2} + \frac{0^2}{b^2} + \frac{0^2}{c^2}$$

$$a^2 = 4 \times (1.92058)^2$$

$$a = 3.84116 \text{ \AA}$$

وهذه القيمة قريبة جدا من القيمة (a) المعطاة في الكارت (standard) والتي تساوي ()

٥. خذ (2θ) الاخرى (٤٦,٦٠٦٦) من الجدول حيث ($hkl=107$) ونطبق

عليها نفس القانون كالاتي:

$$\frac{1}{(1.94718)^2} = \frac{1^2}{(3.84116)^2} + \frac{0^2}{b^2} + \frac{7^2}{c^2}$$

$$A \cdot c = 15.8125$$

وهي قيمة مقارنة للمقدار القياسي لها ()

٦. خذ (2θ) الاخرى (٤٣,٨٧٦٤) من الجدول حيث ($hkl=110$) ونطبق

عليها نفس القانون كالاتي:

$$b = 3.846$$

الاجهزة وطرق استعمالها في المختبر:مراحل تصنيع العينات:

الرجاج المغناطيسي (magnetic stirrer)

طرارز SH



مدخل (INTRODUCTION)

يستعمل هذا الجهاز لتسخين السائل ولرجه في مجالات الصناعة والزراعة والطب والبحث العلمي ومختبرات الجامعات... الخ.

المواصفات (CHARACTERISTICS):

١. الرج المغناطيسي والحراري يمكن ان يعمل بشكل متناظر (SIMULTANEOUS) ويمكن تنظيم سرعته (steeples).
 ٢. سهل الاستخدام، النتائج ذات نوعية جيدة ورخيص الثمن وفعال في اغلب التطبيقات المخبرية.
 ٣. له اقطاب غير قابلة للصدأ (rust).
- هذا وان للطرارز SH-٤C الرقمي الخصائص الاتية:
- أ. يمكن التحكم باتجاه الرج، باتجاه عقارب الساعة او عكس عقارب الساعة.
 - ب. وبواسطة متحسين يمكن رؤية عدد من التنظيمات المتنوعة.

- ج. يمكن ملاحظة درجة حرارة التنظيم (setting) ودرجة حرارة سطح الصفيحة الساخنة، وكذلك سرعة التنظيم في نفس الوقت.
- د. يمكن ملاحظة درجة حرارة التنظيم، ودرجة حرارة السائل قيد الاختبار، وسرعة التنظيم، والسرعة الفعلية في نفس الوقت.

ظروف العمل (work operation):

- درجة الحرارة الكلية من ٥ الى ٤٠ C.
- الرطوبة الكلية (humidity) اقل او تساوي ٩٠%.
- فرق الجهد H_z ٥٠، ٢٢٠ ± ٢٢٠

التركيب والتشغيل (operation):

١. ضع الجهاز على طاولة بمستوى افقي، ثم ضع الحاوية ذات السائل داخل وعاء التسخين.
 ٢. شغل مفتاح القدرة (اي اىصال الكهرباء الى الجهاز)، سيتوهج مصباح مؤشر وصول القدرة الى الجهاز، ثم شغل قدرة التنظيم (regulation).
 ٣. سيتوهج مصباح مؤشر العمل:
- في عملية التنظيم سيتغير مقدار توهج الضوء وفق اختلاف موضع التنظيم. وعندئذ سترتفع درجة الحرارة، والعكس بالعكس.

تنبيهات السلامة (safety caution)

وصل الجهاز الى مجهز قدرة مؤرض، وذلك لتأمين السلامة عند العمل، ثم وصل القدرة حسب حاجة الجهاز.

لا يسمح في استعمال لهب النار والمواد المتفجرة (explosive) والمواد السامة، والمواد التي تسبب التآكل (corrosive).

يجب التأكد من الوضع الافقي للجهاز.

لا يسمح لغير المحترف في تفكيك او تنصيب الجهاز.

يجب الانتباه الى درجة الحرارة عند التعامل مع المواد القابلة للاشتعال (inflammable).

تأكد من الحاوية الراتنجية (resin container)، فعندما تكون درجة الحرارة موضوعة على درجة عالية جدا بشكل عرضي فان الحاوية قد تذوب وتسقط على المسخن فتسبب حريقا.

الاستعمال:

١. نظم السرعة ببطء، يرحى تنظيم السرعة في حال الظروف الاتية:
 - أ. السرعة العالية جدا تجعل الرج يخسر السرعة.
 - ب. الجهاز يتحرك على لوح التسخين.
٢. يجب ان تتوافق القدرة مع الجهاز.
٣. يجب التأكد من ان سلك الكهرباء يبعد مسافة امنة عن لوح التسخين.
٤. وعند حصول اي خطأ في الجهاز يجب قطع مصدر الطاقة.



جهاز الثرموميتر الرقمي MT-4011 K

Digital Thermometer

التشغيل (operation)

١. ائصال القدرة ON/OFF: اضغظ زر

القدرة لائصال الكهرياء (turn on) او

قطعها (turn off). ان الجهاز ينطفئ تلقائيا بعد ٢٠ دقيقة ان لم

يكن في حالة استخدام او غير موصل بالحاسوب.

Press the power button to turn the power on or power off.

The meter will auto power off after 20 minutes if the meter

no operation or no PC communication.

٢. اضغظ C/F مرة واحدة وسيتم التحول من C الى F، او من F الى

C.

Press "C/°F once, Unit will be converting from °C to °F or

°F to °C.

٣. اضغظ زر (Hold) الى صيغة (Hold) وعندئذ سيتم ظهور علامة

(H) في الشاشة، اضغظ (Hold) مرة اخرى للخروج من هذه

الصيغة.

Press "HOLD" to enter the Hold mode "H" will display on

the LCD Press "HOLD" again to exit the Hold mode.

اضغط (Hold) لمدة ثانيتين ثم اضغطها مرة اخرى للخروج.
ان صيغة الاطفاء التلقائي (auto power off) وعندئذ سيتم عرض حرف
(A) على الشاشة.

اضغط (Hold) لثانيتين ثم اضغطها مرة اخرى للدخول الى صيغة الاطفاء
التلقائي وثم عرض (A) على الشاشة.

Press "HOLD" for two seconds then press "HOLD" again
for enters auto power off mode. "A" will display on LCD.

الميزان الحساس (Balance):

المواصفات (Characteristics)

لهذا الميزان حساسية الى حد اربعة مراتب
بعد الفارزة.

طريقة الاستخدام (Operation):

١. نظف قاعدة الوزن (القرص)

بالاسيتون والكلينكس (او ورق

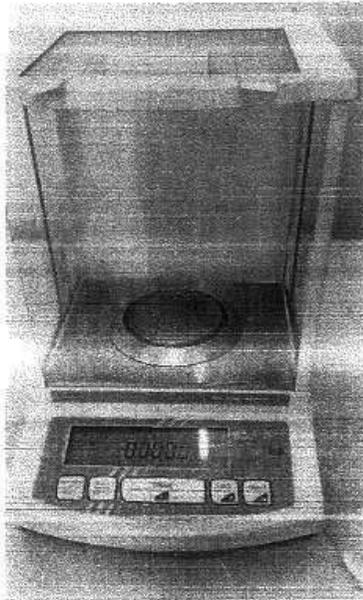
الساندويج) بعد نزعها من موضعها.

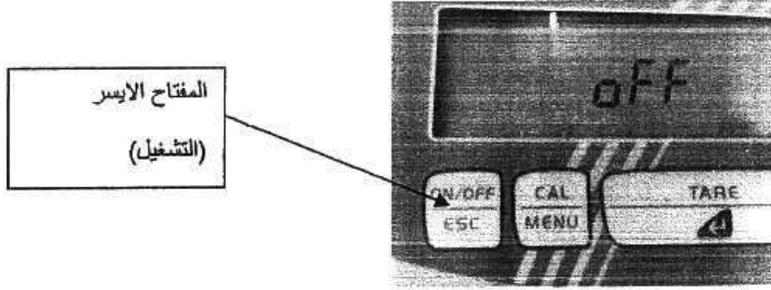
٢. شغل مفتاح القدرة (الكهرباء)

الرئيسي (البلك).

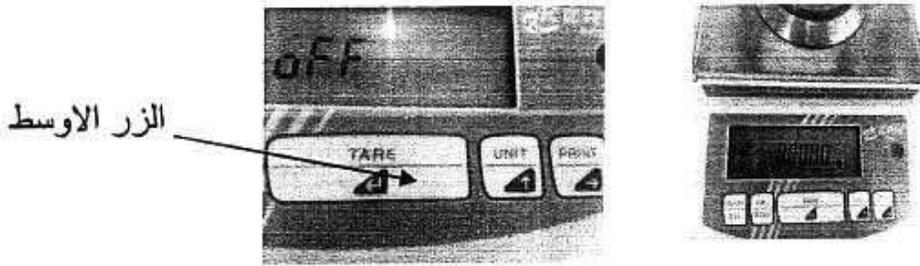
٣. اضغط بالمفتاح الايسر الاول الموجود في لوحة التحكم الامامية من

الميزان (ON/OFF) وانتظر حتى تظهر الاصفار.





٤. ضع ورقة (الزبدة): وهي ورقة رقيقة لا يلتصق فيها غبار المادة المراد وزنها) على قرص الميزان. ستظهر ارقام تمثل وزن الورقة، عندئذ اضغط الزر الاوسط من لوحة التحكم (TARE) لتظهر الازهار ثابتة حيث تم اخذ وزن الورقة بنظر الاعتبار.



٥. الان يمكن وضع المادة المطلوب وزنها على الورقة، وسيظهر وزنها بعد ذلك.

المكبس الهيدروليكي (Hydrolic Press):



في هذا الجهاز الميكانيكي يتم كبس المسحوق الموضوع في قالب معدني (mold) كما في الشكل ليصبح بهيئه قرص صلب.

طريقة الاستخدام (Usage):

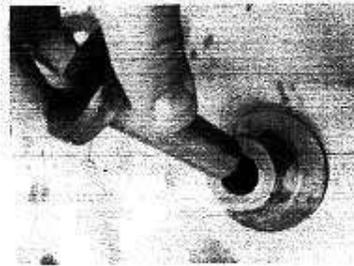
١. ضع المسحوق (Powder) في فتحة

القالب كما في الشكل باستخدام الورق المشمع (ورق الزبدة).

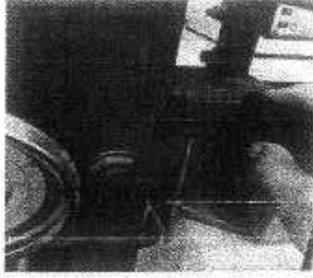


٢. اعد القطب الضاغط العلوي الى موضعه في الفتحة بهدوء كم في

الشكل.



٣. ضع القالب (Mold) في المكبس ثم دور المقبض الجانبي باتجاه عقارب الساعة بواسطة اليد (Clockwise)



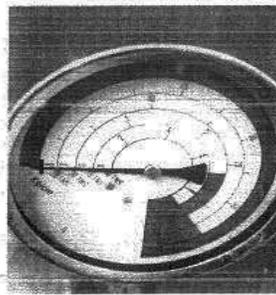
المقبض الجانبي

٤. ارفع الذراع الايمن (Lever) واخفضه عدة مرات.



الذراع الايمن

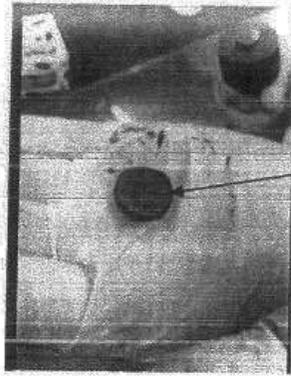
٥. ومع رفع وخفض الذراع يجب النظر الى مقياس الكبس (cage) الموجود في واجهة المكبس وتكرر العملية حتى نصل الى قيمة الكبس المطلوب مثلا ٤ طن.



٦. يجب الانتظار لمدة دقيقة ليتم الكبس بشكل جيد.

ملاحظة: يجب مسك الذراع بواسطة اليد خلال تلك الدقيقة لتبقى قيمة الكبس ثابتة.

٧. بعدها نحرر الذراع ونحصل على النموذج المكبوس.



النموذج المكبوس

٨. اعد المقبض الجانبي الى حالته الطبيعية وذلك بادارته عكس عقارب الساعة (clockwise Counter).



المقبض الجانبي

الفصل السادس

Electrical Properties الخواص الكهربائية

٦-١ المقدمة Introduction:

تتميز المواد فائقة التوصيل عند درجة حرارة معينة (منخفضة نسبياً) تكون مقاومتها الكهربائية مساوية إلى الصفر تقريباً، وقابليتها على التوصيل الكهربائي فائقة جداً. عند مرور تيار كهربائي في حلقة فائقة التوصيل، يستمر بالسرطان داخلها دون وجود مصدر جهد كهربائي. إن ظاهرة الموصلية الفائقة مدهشة من جميع جوانبها سواء ما يتعلق بدراستها أو تطبيقاتها (السلوك الكهربائي) و(السلوك المغناطيسي) وعدم مقاومتها للتيار الكهربائي، حيث تتعدم مقاومتها لسريان التيار وعدم خسارتها للطاقة. إن البحوث مستمرة في هذا المجال لإنتاج مواد فائقة التوصيل بدرجات الحرارة الاعتيادية وبكلف قليلة.

٦-٢ المقاومة النوعية للفلزات الاعتيادية Normal Metal Resistivity:

إن التوصيل الكهربائي في الموصلات الفائقة يتم نتيجة حركة الإلكترونات الحرة ذات الطاقة الكافية للتحرك بحرية خلال الفلز مولدة تياراً كهربائياً. إن مصدر المقاومة الكهربائية في المعادن ناتجة بسبب التصادم بين الإلكترونات مع بعضها أو مع الشبكة أو مع الشوائب، وبالتالي يؤدي إلى فقدان طاقتها وتقليل سرعتها وتوليد حرارة أو اهتزاز، ولإدامة مرور التيار في الفلز يتطلب قوة كهربائية دافعة تعزى هذه إلى فرق الجهد بين نهايتي المصدر. ومن أهم العوامل التي تسبب المقاومة هي:

١. تصادم الالكترونات فيما بينها.
٢. تصادم الالكترونات مع الشوائب في العيوب البلورية مما يسبب تغير اتجاه حركة الالكترونات الحرة وعرقلة سيرها في الموصل.
٣. زيادة درجة حرارة المعدن، إن زيادة الحرارة يؤدي إلى زيادة المقاومة وفق المعادلة الآتية:

$$\rho_t = \rho_0 + \alpha(t_2 - t_1) \dots\dots\dots(1.6)$$

حيث إن:

ρ_t = المقاومة النوعية عند درجة حرارة t

ρ_0 = المقاومة النوعية عند درجة حرارة الصفر

t_2, t_1 = درجة الحرارة الابتدائية والنهائية

α = معامل تمدد المعدن

٤. زيادة مساحة المقطع حيث تقل المقاومة كلما زادت مساحة المقطع وحسب العلاقة الآتية:

$$R = \frac{\rho L}{A} \dots\dots\dots(2.6)$$

حيث R = المقاومة

L = طول الموصل

A = مساحة المقطع

٥. زيادة طول الموصل يؤدي إلى زيادة المقاومة وحسب المعادلة أعلاه.

$$\rho = \frac{RA}{L} \dots\dots\dots(3.6)$$

٦. وجود الشوائب: إن وجود الشوائب يؤدي إلى انخفاض المقاومة ولكن

إلى عدد معين من الشوائب. وحسب المعادلة الآتية:

$$\rho_0 = C_i(C_1 - C_2) \dots \dots \dots (4.6)$$

حيث ρ = المقاومة النوعية

C_i = عدد الشوائب

٧. التشوهات المرنة (Deformation): عندما يحدث في الصفائح

المعدنية تشوهات مرنة مما تؤدي إلى زيادة المقاومة، إن معظم المعادن

جيدة التوصيل الكهربائي. إن موصلية المعادن أو السبائك عالية بسبب

العدد الكبير من الإلكترونات الحرة والتي تتجه إلى حزمة التوصيل

الواقعة فوق حزمة المنبع وفق المعادلة الآتية:

$$\sigma = Ne \mu e \dots \dots \dots (5.6)$$

حيث إن N = عدد الإلكترونات الحرة

e = شحنة الإلكترون

μe = حركة الإلكترون

إن العيوب البلورية تصبح مراكز تشتت للإلكترون (scattering). إن

التوصيل في المعادن يحدث نتيجة زيادة عدد الإلكترونات مما يسبب قلة

المقاومة. إن تركيز هذه العيوب (impaitlation) تؤثر على درجة حرارة

التركيب. إن المقاومة النوعية للمعدن تساوي مجموعة المقاومات النوعية

الناجمة بسبب الحرارة، الشوائب التشوهات المرنة حسب قاعدة (Methiencs

:Xwell)

$$\rho_t = \rho_{th} + \rho_i + \rho_d$$

حيث إن $\rho_t =$ مجموع المقاومات النوعية

$\rho_{th} =$ المقاومة النوعية بسبب الحرارة

$\rho_i =$ المقاومة النوعية بسبب الشوائب

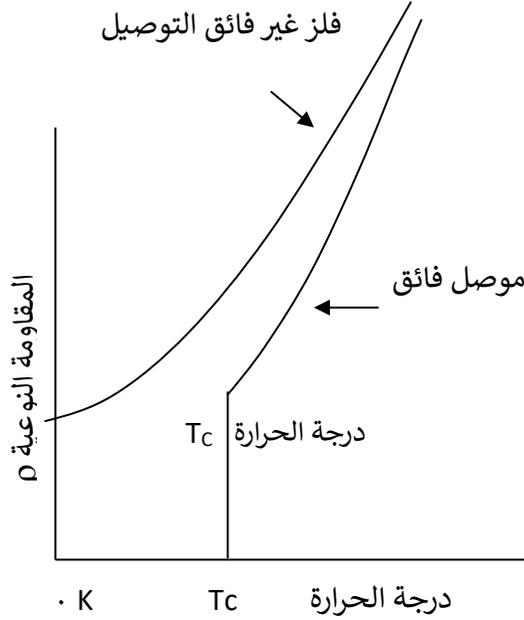
$\rho_d =$ المقاومة النوعية بسبب التشوهات

- حيود البلورات عن سلوك الشبكة البلورية للمواد مما تسبب تشتت الإلكترونات خلال مرور الإلكترونات في الفلز، مسببة فقدان طاقة الإلكترونات وتوليد حرارة.

٣-٦ المقاومة النوعية للموصلات الفائقة Superconductors

:Resistivity

إن المقاومة النوعية للموصلات الفائقة تتلاشى عند تبريدها إلى الصفر المطلق 0K ، أو نتيجة تسليط ضغط عليها. هناك دراسات وبحوث مستمرة في هذا المجال على عناصر وسبائك المعادن. إن تبريد المعدن إلى درجة 0K المطلق ذات كلفة عالية، وتقنية دقيقة، وتروم البحوث إلى التوصل إلى الموصل الفائق في درجات حرارة الغرفة لكي يعم استخدامها، وتقل كلف سريان التيار الكهربائي، وقللة الخسارة. إن الموصلية النوعية للمعادن العادية تبدأ في درجات حرارة الغرفة وتزداد عند زيادة درجة الحرارة. ولكن المقاومة النوعية للموصلات تبدأ عند 0K المطلق وتقل بانخفاض درجات الحرارة ولكنها ذات كلفة عالية وتقنية دقيقة ويبين الشكل (٦-١) تلك العلاقة.



الشكل (٦-١) العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة النوعية للفلزات الاعتيادية والموصلات الفائقة

ان المقاومة الكهربائية للمواد فائقة التوصيل تهبط وبصورة مفاجئة الى الصفر عندما تهبط درجة الحرارة الى قيمة اقل من درجة حرارة الانتقال الحرجة، وفوق هذه الدرجة فان المقاومة النوعية او المقاومة تمتلك الصيغة الاعتيادية لها حيث ان:

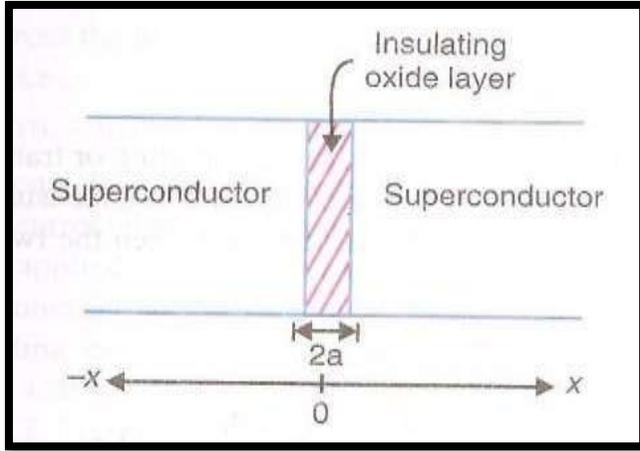
$$\rho(T) = \rho_0 + BT^\circ \dots \dots \dots (٦ - ٦)$$

وهي ناتجة من جزأين على التوالي الاول وهو الناتج من استطرارة الشوائب، والثاني وهو الناتج من استطرارة الفونونات. ان المواد فائقة

التوصيل تحت درجة حرارة اقل من الدرجة الحرجة فان هذه الآليات لن تكون قادرة على خفض قيمة التيار , والتيارات ممكن ان تتناسب في الموصل الفائق بشكل غير محدد من دون تشتت في الطاقة.

٦-٤ تأثير جوزيفسون (Effect Josephson)

هذا التأثير هو عبارة عن وصف لآلية تدفق التيار بين قطعتين من المادة فائقة التوصيل موصولتين بطبقة رقيقة من اوكسيد عازل سمكه (٢a) كما موضح في الشكل (٦-٢)، ان سمك هذه الطبقة العازلة يساوي تقريبا (٢nm) حيث ان ازواج كوبر ممكن لها ان تتدفق عبر الطبقة الرقيقة العازلة من الموصل الفائق الاول الى الموصل الفائق الثاني طبقا لآلية حفر الانفاق, Tunneling و ان هذا التيار النفقي خلال الطبقة العازلة اكتشف تجريبيا بواسطة جيافير (Giaever.I.) وان سلوك التيار خلال الطبقة السندويشية العازلة بين موصلين فائقين حلل نظريا لأول مرة من قبل جوزيفسون, Josephson.D,B حيث تنبأ بان التيار الفائق يشتمل على ازواج مرتبطة من الالكترونات يمكنها التدفق عبر فجوة عازلة بين موصلين فائقين اذا كانت صغيرة بما فيه الكفاية، و مثل هذه الطبقات العازلة او المفارق تسمى بالروابط الضعيفة Link Weak و قد تم تصنيع مثل هذا المفارق او الملتقى عمليا.



الشكل (٦-٢) تأثير جوزيفسون

٦-٥ ظاهرة جوزيف (Joseph Phenomenon):

جوزيف طن تلميذ إنكليزي كلف بإنجاز مشروع في مرحلة الدراسات العليا. توصل إلى ظاهرة عرفت بإسمه، حيث تنبأ عند وضع موصلين فائقين كل منهما بجانب الآخر، وتوصل بينهما شريحة رقيقة جداً من مادة عازلة. فإن بعض الأزواج الالكترونية استطاعت التملص (Tunneling) من خلال تلك الشريحة وتم التحقق من ذلك تجريبياً. يمكن الاستفادة من هذه الظاهرة في عمل كثير من الدوائر الالكترونية السريعة جداً كما في الحاسبات وفي صنع كواشف المجالات المغناطيسية المتناهية في الصغر.

الفصل السابع

Magnetic Properties الخواص المغناطيسية

١-٧ المقدمة Introduction:

من أهم مميزات الموصلات الفائقة قدرتها على طرد خطوط الفيض المغناطيسي، عند تعرضها إلى مجال مغناطيسي خارجي والذي يحاول المرور داخلها. الموصلات الفائقة تحاول التخلص من المجالات المغناطيسية الخارجية باستحداث تيارات كهربائية تلتف حول سطوحها تسمى بالتيارات الدوامة أو السطحية (eddy current). إن مرور التيار الكهربائي داخل الموصل يسبب حصول مجال مغناطيسي داخلي. وفي حالة الموصل الفائق يكون اتجاه المجال الداخلي عكس اتجاه المجال المغناطيسي الخارجي. إن المواد عالية النقاوة تبرد إلى درجة حرارة 0K ، حيث تقل مقاومتها النوعية تدريجياً حتى تصل إلى قيمة قليلة تقترب من الصفر. إن المواد التي تسلك هذا السلوك تسمى الموصلات الفائقة.

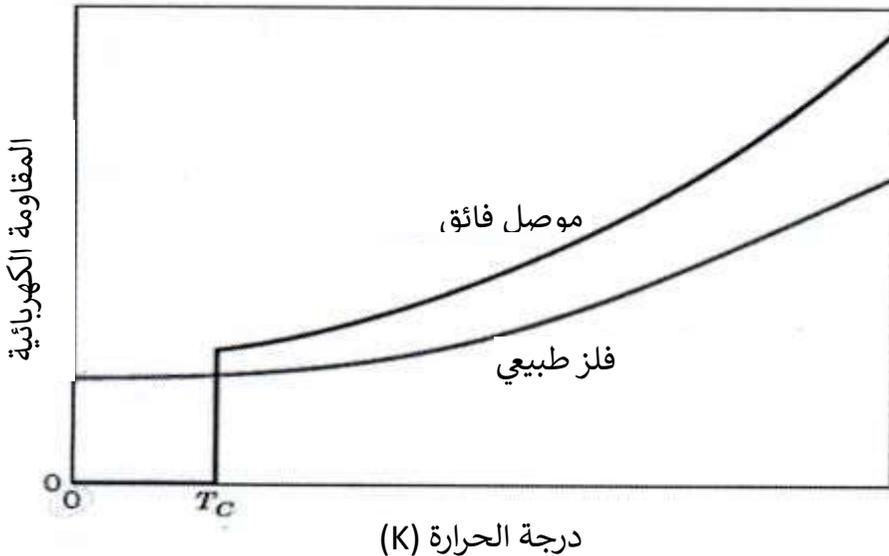
٢-٧ العلاقة بين درجة الحرارة الحرجة (T_c) وكثافة التيار الحرج (J_c)

وشدة المغناطيس الحرج (H_c):

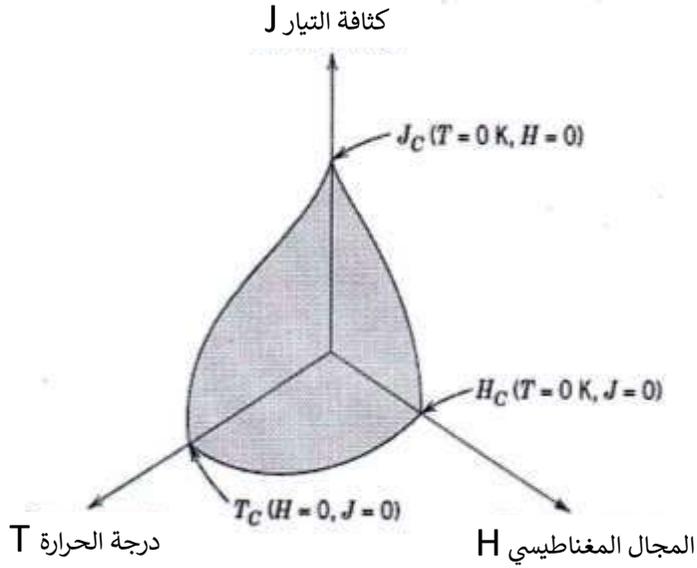
تسمى المواد عندما تصل درجة حرارتها الحرجة (T_c) بالمواد فائقة التوصيل. إن سلوك - المقاومة النوعية- درجة الحرارة للموصلات الفائقة والموصلات الاعتيادية موضح في الشكل (٧-١). إن درجة الحرارة الحرجة T_c تتغير من موصل إلى آخر ولكن تبقى ضمن الحدود $(1-20)\text{K}$. ولكن لبعض أكاسيد المعادن الخزفية تصل درجة حرارتها الحرجة T_c إلى 100K . عند درجة حرارة

أقل من الدرجة الحرجة T_c تتوقف حالة الموصل الفائق على استخدام مجالات مغناطيسية عالية وتسمى المجالات الحرجة H_c ومعتمدة على درجات الحرارة وتقل عند زيادة درجة الحرارة الحرجة T_c وكذلك يقال نفس المعنى إلى كثافة التيار عند استخدام كثافة تيار حرج J_c عندما يكون المعدن موصل فائق كما موضح في الشكل (٧-٢).

الشكل (٧-٢) يوضح العلاقة بين شدة المجال الحرج H_c وكثافة التيار الحرج J_c ودرجة الحرارة الحرجة T_c . إن ظاهرة فائق التوصيل تم شرحها بعدة نظريات، إن حالة الموصلية الفائقة نتيجة التفاعلات التجاذبية بين أزواج من الإلكترونات المتجاورة، مثل التشتت نتيجة الاهتزاز الحراري أو ذرات الشوائب. وبهذا تتناسب المقاومة النوعية مع سقوط الإلكترونات المتشتتة الصفري.



الشكل (٧-١) اعتماد درجة الحرارة للمقاومة الكهربائية للمواد الموصلة الاعتيادية والفائقة التوصيل بالقرب من درجة الحرارة K .



الشكل (٧-٢) درجة الحرارة الحرجة، كثافة التيار، وحدود المجال المغناطيسي الذي يفصل حالات التوصيل الفائق والتوصيل العادي (تخطيطي)

الشكل (٧-٥) يمثل ظاهرة ميسنر حيث إن (أ) عندما تكون حالة فوق الموصلية حيث يطرد أو يبعد خطوط المجال المغناطيسي الخارجي خارج الموصل (ب) خطوط المجال المغناطيسي الخارجي تنفذ خلال الجسم في ظروف اعتيادية.

وعند زيادة H تبقى المادة دايامغناطيسية إلى ان يحدث المجال المغناطيسي الحرج (Critical Magnetic Field) ويرمز له H_c . وعند هذا المجال يدمر الموصلية الفائقة، وتنفذ خطوط الفيض المغناطيسي إلى قلب الموصل ولا يعود إلى الحالة الموصلية عند تسخينه فوق درجة تحوله

وتبريده ثانياً. بعض عناصر المواد مشمولة مثل الالمنيوم (Al)، الرصاص (Pb)، القصدير (tin)، والزنبق Mg تخص النوع-١.

٣-٧ ظاهرة الطفو (التعليق) (Floating Phenomenon):

نتيجة رفض الموصلات الفائقة خطوط الفيض المغناطيسي من المرور من خلالها. وتمغنطها المعاكس يسبب ظاهرة الطفو والتعليق على الترتيب. إن ظاهرة الطفو تحصل عند وضع قطعة مغناطيس في أعلى موصل فائق أو بالعكس. سوف يظل الجسم العلوي معلقاً في الهواء (طافي) سواء كان المغناطيس أو الموصل نفسه كما موضح في الشكل (٣-٧). إن ظاهرة التعليق تختلف في المبدأ الذي تعتمد عليه حيث يتم تقريب مغناطيس دائم من قطبه الجنوبي إلى الموصل أولاً إرغام الأخير على عدم الحركة يؤدي ذلك إلى مغنطته سالباً، ثم يتم إبعاد المغناطيس الدائم بسرعة معينة، مما يؤدي إلى انعكاس مغناطيسية الموصل الفائق ويتمغنط موجباً (شماليه) وتجذب لقطب المغناطيس الجنوبي. إنهما ميزتان للموصلات الفائقة.



الشكل (٣-٧) يمثل ظاهرة الطفو في المواد فائقة التوصيل

٧-٤ ظاهرة التكميم المغناطيسي (Magnetic Quantum

:Phenomenon)

إن فكرة ظاهرة التكميم المغناطيسي عند صنع موصل فائق على صورة حلقة صغيرة جداً، فإن مقدار المجال المغناطيسي الذي يمر خلال تلك الحلقة يكون مساوياً لعدد صحيح من الكمات المغناطيسية، تسمى بالفلاتود ومعنى التكميم لو تعرض الموصل إلى مجال مغناطيسي يزيد قليلاً عن عدد صحيح من الكمات بزيادة أقل من نصف كمة فإن الزيادة ترفض ولا تمر من خلاله، في حين عند تعرض المجال المغناطيسي إلى أقل من عدد صحيح من الكمات بمقدار قليل أقل من نصف كمة، فإنه يكمل النقص من أجل أن يحافظ على العدد الصحيح من الكمات، فمثلاً لو مر مجال مغناطيسي يساوي إلى مائة كمة مضافاً إليها ربع كمة فإن ذلك الربع يرفض ولا يمر من خلاله. في حين إذا كان نصف أو أكثر ولكن أقل من واحد صحيح فإن الموصل يكمله مع المجال المغناطيسي الخارجي عرف هذا المبدأ بالسكود (Superconducting Quantum Interference Device) (SQUID) وهو جهاز حساس جداً للمجالات المغناطيسية وبإمكانه أن يميز التغير في المجال المغناطيسي، حيث يمكنه قياس شدة مجال تساوي واحد من مليون من وحدة التكميم.

٧-٥ عمق الاختراق Depth Penetration:

ان المجال المغناطيسي داخل الموصل الفائق المثالي ينخفض اسياً من قيمته الخارجية الى الصفر طبقاً الى العلاقة الاتية

$$B(x) = B_0 e^{-x/\lambda} \dots \dots \dots (1-7)$$

حيث B_0 : هي قيمة المجال المغناطيسي عند السطح :

x : هي المسافة من السطح الى نقطة معينة داخل المادة .

λ : هي عامل يسمى عمق الاختراق وقيمته المثالية تتراوح بين (10 - 100nm) ان عمق الاختراق يتغير مع درجة الحرارة طبقا للعلاقة التجريبية:

$$\lambda(T) = \lambda_0 [1 - (T/T_c)^\xi]^{-1/2} \dots \dots \dots (2-7)$$

حيث: λ_0 هو عمق الاختراق عند ($T = 0$) من هذا نحن نرى ان ($\lambda \rightarrow \infty$) عندما ($T = T_c$) فضلاً عن ذلك فانه عندما ($T \rightarrow T_c$) فان النموذج هو في الحالة فائقة التوصيل، والمجال المغناطيسي يخترق بصورة اعمق الى داخل العينة، وفي النهاية فان المجال المغناطيسي يخترق كامل العينة ($\lambda \rightarrow \infty$) والعينة تصبح في الحالة الطبيعية. ويمكن استعمال المعادلة الاتية لتحديد نوع

الموصل الفائق هل هو من النوع الاول ام من النوع الثاني :

$$K = \lambda / \xi \dots \dots \dots (3-7)$$

حيث K : هو عامل كينزينبرك-لانندو و اذا كان ($K < 1/\sqrt{2}$) فان المادة

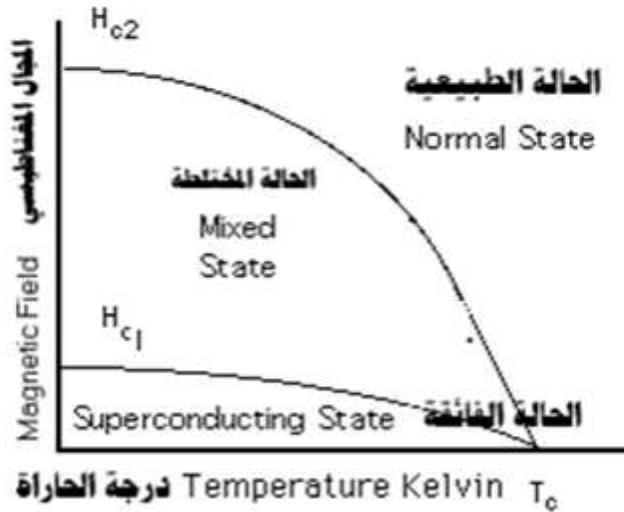
هي موصل فائق من النوع الاول (I-Type.) واذا كان ($K > 1/\sqrt{2}$)

فان المادة هي موصل فائق من النوع الثاني. (II-Type) والشكل رقم (2-

6) يوضح كل من طول التشاكة وعمق الاختراق.

٦-٧ المجال المغناطيسي الحرج (H_c) Critical magnetic field

عندما تنخفض درجة حرارة المادة فائقة التوصيل تحت درجة حرارة الانتقال الحرجة (T_c) والمجال المغناطيسي يزداد حوله فان المجال المغناطيسي يبقى محيطا من الخارج بالمادة الفائقة التوصيل، وان الزيادة في المجال المغناطيسي تعطينا اشارة الى ان المادة فائقة التوصيل سوف تذهب الى الحالة الطبيعية للمقاومية، وان القيمة القصوى للمجال المغناطيسي عند درجة الحرارة المعطاة له يسمى بالمجال المغناطيسي الحرج والذي يرمز له بالرمز (H_c) . ولكل المواد فائقة التوصيل توجد منطقة من درجة الحرارة والمجال المغناطيسي ضمن المادة التي تجعلها فائقة التوصيل وخارج هذه المنطقة فان المادة تكون في الحالة الطبيعية. والشكل (٧-٤) يوضح العلاقة بين درجة الحرارة والمجال المغناطيسي.



الشكل (٧-٤) العلاقة بين المجال المغناطيسي ودرجة الحرارة.

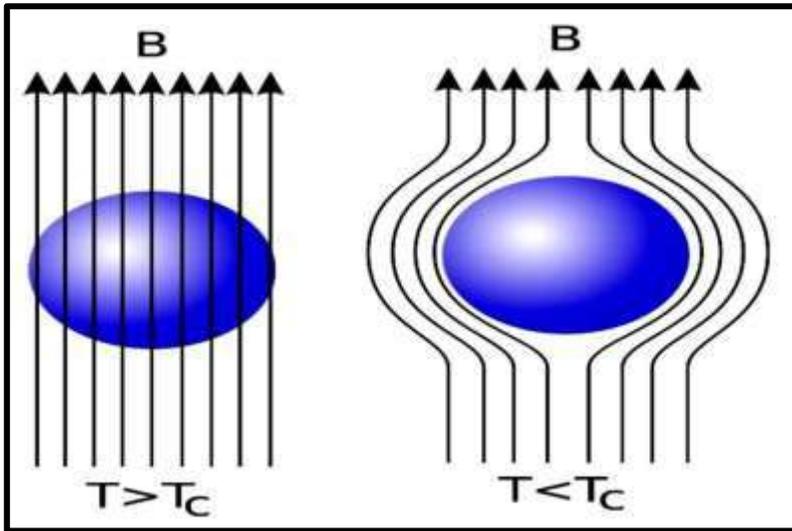
وقد اظهرت التجارب اعتماد المجال المغناطيسي الحرج على درجة الحرارة التي يمكن وصفها بالصيغة الرياضية الاتية:

$$H_c(T) = H_c(0) \left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right) \dots \dots \dots (٤ - ٧)$$

حيث ان $H_c(0)$ هو المجال المغناطيسي عندما تكون $(T=0K)$.

٧-٧ تأثير مازنر Meissner Effect

يعرف تأثير مازنر على انه طرد لاي تدفق مغناطيسي داخل الموصل الفائق. وقد اكتشف هذا التأثير في العام ١٩٣٣ العالمان والتر مازنر, وروبرت اوخسيفيلد (Walter Meissner & Robert Ochsenfeld), والشكل (٥-٧) يبين سلوك خطوط المجال المغناطيسي في الحالة الطبيعية والحالة فائقة التوصيل للمادة.



الشكل (٥-٧) سلوك خطوط المجال المغناطيسي في الحالة الطبيعية والحالة فائقة التوصيل للمادة.

وعندما يحصل انتقال في المادة من الحالة الطبيعية الى الحالة فائقة التوصيل فانها تقوم وبشكل نشط وفعال على ابعاد المجال المغناطيسي وطرده من داخلها.ومن خلال معرفتنا يتضح بان:

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi)H \dots \dots \dots (5)$$

$$M = -H \dots \dots \dots (6 - 7)$$

$$= -\chi H \dots \dots \dots (7 - 7)$$

حيث: H هو شدة المجال المغناطيسي الخارجي, M هي تمغنت الوسط, χ هي التأثيرية المغناطيسية, μ_0 هو نفاذية الف ارفع, وحيث ان (B=0) في الحالة فائقة التوصيل فانه ينتج منه:

ان هذا القيد الذي حصل للموصل الفائق وان (X) الذي جعل المجال المغناطيسي داخله يساوي صفرًا هو صفة مميزة للمواد الدايمغناطيسية التامة والتي تنشأ عندما تكون مقاومتها الكهربائية تساوي صفر , ان القيمة الصفرية للمقاومية الكهربائية تشير ضمنا الى انه لو حاولنا مغنطة المادة فائقة التوصيل فانه سوف تتولد حلقات من التيار فيها تعمل على طرد المجال المغناطيسي المسلط عليها تماما(قانون لنز), ولكن اذا كانت المادة تمتلك مسبقا مجالا مغناطيسيا ثابتا بداخلها وانخفضت درجة حرارة هذه المادة وتحولت الى مادة فائقة التوصيل فمن المتوقع بقاء المجال المغناطيسي بداخلها. واذا لم يكن هناك تغير في المجال المغناطيسي المسلط فلن يؤدي هذا الى تولد فولتية لسريان التيارات تقانون فاراداي حتى في الموصل التام. لهذا فان فاعلية طرد وابعاد المجال المغناطيسي من داخل المادة يجب ان

يؤخذ بنظر الاعتبار على انه تأثير مميز فقط عندما تكون المقاومة الكهربائية تساوي صفراً . احد التوضيحات النظرية لتأثير مازنر كانت من خلال معادلة لندن, حيث بين ان المجال المغناطيسي يتلاشى اسيا داخل الموصل الفائق على مسافة (20-40nm), وهذا يصف المعنى للعامل الذي يسمى عمق الاختراق للندن (London Penetration Depth). ان تأثير مازنر يعد واحدا من المميزات الحاسمة للتوصيلية الفائقة. وان اكتشافه قد قدم خدمة لتأسيس بداية اولية في التوصيلية الفائقة وهو ما يسمى بانتقال الطور .

الفصل الثامن

الخواص الفيزيائية و(الحرارية) والثرموديناميكية

Heating and Physical Properties

١-٨ المقدمة Introduction:

ان الخواص الفيزيائية والثرموديناميكية للموصلات الفائقة لا تختلف اختلافاً كبيراً عن الموصلات المعدنية. ان المواد فائقة التوصيل عند تبريدها الى درجة حرارة اقل من درجة حرارتها الحرجة فان الغاز الالكتروني الحر يتحول من الحالة الطبيعية الى حالة المائع الكمي من الازواج الالكترونية المتشاكهة في الفضاء المقلوب، وكل زوج الكتروني منفرد يتشكل عندما يصاحب احد الالكترونات الكترون اخر معاكس له في الزخم والبرم اي انه يعطي زخماً صافياً مساوياً للصفر، ولذلك فان حاملات الشحنة هذه تسمى ازواج كوبر (Copper Pairs).

٢-٨ انتقال الحرارة Transport Heat:

تنتقل الحرارة في المعادن الطبيعية بالدرجة الاولى بواسطة الالكترونات، وان الموصلات الجيدة للكهربائية مثل الذهب و الفضة والنحاس هي ايضاً موصلات جيدة للحرارة بينما تعد العوازل الكهربائية عموماً رديئة كموصلات حرارية. وفي الموصلات الفائقة فان كل الالكترونات تكون في الحالة الكمية نفسها، ولذا فان قيمة الانتروبي تساوي صفراً. وهذا يعني ان ازواج كوبر لايمكن ان تسهم في عملية انتقال الحرارة، وهذا ممكن استخدامه

في بناء المفاتيح الحرارية، حيث ان المجال المغناطيسي المسلط سوف يرجع الموصل الفائق الى حالته الطبيعية.

٣-٨ طول التشاكه (ξ) Length Coherence :

وهو البعد او المسافة الصغرى والذي عليه تعتمد امكانية تكون التوصيلية الفائقة او تحطمها، او هو المسافة التي تبقى فيها ازواج كوبر سوياً. وهو عامل مهم في تقرير صنف المواد فائقة التوصيل سواء كانت من النوع الاول او النوع الثاني (II-Type or I-Type). ان بيبارد (Pippard) هو اول من طرح فكرة التشاكه في عام ١٩٥٣. وبين بيبارد بان الكثافة للمواد فائقة التوصيل ممكن ان تتغير بشكل محسوس مع طول التشاكه (ξ) Coherence، وان معظم المعادن فائقة التوصيل يكون طول التشاكه لها بحدود (10^{-4} cm) وكذلك فان طول التشاكه هو مقياس للمسافة بين الكتروني التوصيل الفائق والذي ممكن ان يعطى بالمعادلة الاتية:

$$\xi = \hbar V_F / 2\Delta \dots \dots \dots (1 - 8)$$

وعندما يحصل انتقال في المادة من الحالة الطبيعية إلى الحالة فائقة التوصيل فانها تقوم وبشكل نشط وفعال على ابعاد المجال المغناطيسي وطرده من داخلها . ومن خلال معرفتنا يتضح بان :

$$B = \mu_o(H + M) = \mu_o(1 + \chi)H \dots \dots \dots (2 - 8)$$

حيث: H هو شدة المجال المغناطيسي الخارجي، M هي تمغنط الوسط، χ هي التاثيرية المغناطيسية، μ_0 هو نفاذية الفراغ، وحيث أن ($B=0$) في الحالة فائقة التوصيل ينتج منه المعادلة الآتية:

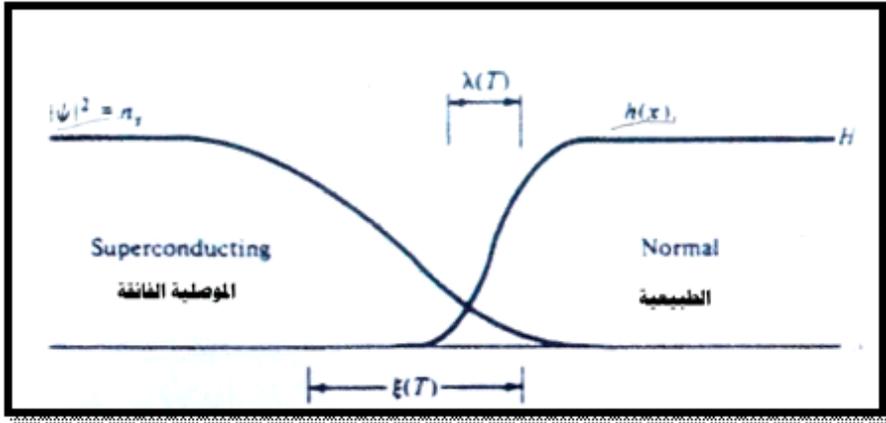
$$M = -H \dots\dots\dots (٣ - ٨)$$

$$\chi = -١ \dots\dots\dots (٤ - ٨)$$

ان هذا القيد الذي حصل للموصل الفائق والذي جعل المجال المغناطيسي داخله يساوي صفرا هو صفة مميزة للمواد الدايا مغناطيسية التامة والتي تنشأ عندما تكون مقاوميتها الكهربائية تساوي صفرا، ان القيمة الصفرية للمقاومية الكهربائية تشير ضمنا الى انه لو حاولنا مغنطة المادة فائقة التوصيل فانه سوف تتولد حلقات من التيار فيها تعمل على طرد المجال المغناطيسي المسلط عليها تماما (قانون لنز)، ولكن اذا كانت المادة تمتلك مسبقا مجالا مغناطيسيا ثابتا بداخلها وانخفضت درجة حرارة هذه المادة وتحولت الى مادة فائقة التوصيل فمن المتوقع بقاء المجال المغناطيسي بداخلها . واذا لم يكن هناك تغير في المجال المغناطيسي المسلط فلن يؤدي هذا إلى تولد فولتية السريان التيارات (قانون فاراداي) حتى في الموصل التام. لهذا فان فاعلية طرد وابعاد المجال المغناطيسي من داخل المادة يجب أن يؤخذ بنظر الاعتبار على انه تأثير مميز فقط عندما تكون المقاومة الكهربائية تساوي صفرا . كما موضح في الشكل (٨-١) احد التوضيحات النظرية لتأثير مازنر كانت من خلال معادلة لندن، التي تبين أن المجال المغناطيسي يتلاشى اسيا داخل الموصل الفائق على مسافة (٤٠-٢٠ nm)، وهذا

يصف المعنى للعامل الذي يسمى عمق الاختراق للنندن (London Penetration Depth). ان تأثير مازنر يعد واحداً من المميزات الحاسمة للتوصيلية الفائقة. وان اكتشافه قد قدم خدمة لتأسيس بداية اولية في التوصيلية الفائقة وهو ما يسمى بانتقال الطور.

حيث ان V_F هي سرعة الالكتران عند مستوى فيرمي، Δ هو فجوة الطاقة .



الشكل (٨-١) التداخل بين المجالات الطبيعية والمجالات فائقة التوصيل في الحالات المتوسطة

٨-٤ تأثير الضغط (Effect Pressure):

عند تسليط ضغط عالي جدعلى المادة فمن المحتمل ان تصل درجة حرارة الانتقال الحرجة (T_c) للمادة الى الحالة فائقة التوصيل الى درجة حرارة قريبة من درجة حرارة الغرفة، وهذا يعني ان زيادة الضغط على المادة فائقة التوصيل فانها تؤدي الى زيادة في درجة حرارة الانتقال الحرجة (T_c) وهذا يعني (T_c) تعتمد على الضغط (للقيم العالية).

٨-٥ تأثير النظير (Effect Isotopic):

ان الدراسة التجريبية للمواد فائقة التوصيل بينت ان درجة حرارة الانتقال الحرجة تتغير مع معدل كتلة النظير (M) ، وان السبب الرئيس لاعتماد درجة الحرارة الحرجة على معدل كتلة النظير هو اعتماد ترددات الفونون على كتلة النظير وفقاً الى :

$T_c \propto M^{-\frac{1}{2}} \rightarrow T_c M^{-\frac{1}{2}} = \text{constant} \dots \dots \dots (٥ - ٨)$
وكمثال، فلقد وجد في الزئبق ان (T_c) تتغير من (٤,١٨٥ K) الى (٤,١٤٦ K) مع تغير معدل كتلة نظيره من (١٩٩,٥) الى (٢٠٣,٤) وحدة كتلة ذرية، ومن التجارب الحديثة وضعت معادلة عامة التي تختلف عن المعادلة اعلاه وبالصيغة العامة وهي:

$$T_c \propto M^{-\alpha} \dots \dots \dots (٦ - ٨)$$

حيث α تسمى معامل تأثير النظير يعطى بالعلاقة الاتية

$$\alpha = \partial \ln T_c / \partial \ln M \dots \dots \dots (٧ - ٨)$$

ومن جهة اخرى وطبقا للنظريات الحديثة فان α تعطى بالعلاقة الاتية:

$$\alpha = ٠.٥ [١ - ٠.٠١ (N(٠)V)^{-٢}] \dots \dots \dots (٨ - ٨)$$

حيث ($N(٠)$) هي كثافة الحالة للجسيم المنفرد ذي برم عند مستوى فيرمي، V هو الجهد بين الالكترونات. ان كتلة النظير هي خاصية للشبيكة البلورية ويمكن ان تؤثر في خواصها، مثل تردد اهتزازات الشبيكة والذي له عالقة بكتلة الايون، وان التوصيلية الفائقة التي هي خاصية للنظام الالكتروني هي ايضا لها عالقة بحالة الشبيكة البلورية طبقا الى تأثير النظير.

٨-٦ فجوة الطاقة (Gap Energy)

ان فجوة الطاقة للموصلات الفائقة تختلف في الاصل والطبيعة عن فجوة الطاقة للموصلات والعوازل حيث انها في الموصلات والعوازل تنشأ نتيجة تفاعل الالكترونات مع الشبكة ويربطهما سوياً اما في الموصلات الفائقة تحدث فجوة الطاقة بسبب تفاعل الالكترونات-الالكترونات مما تجعل الالكترون في فراغ يعود الى فجوة فيرمي للالكترونات. ان وجود التجاذب الفعال بين الالكترونات في الموصلات الفائقة يؤدي الى ظهور فجوة في طيف الطاقة والتي تسمى بفجوة الطاقة، وعندما يكون التردد كبيراً بصورة كافية فان عملية امتصاص سوف تحدث وتؤدي الى تهيج الالكترونات عبر فجوة الطاقة، وهنا فان عملية ازدواج الالكترونات لم تعد ذات فائدة، وان كل اثار التوصيلية الفائقة سوف تختفي، هذا الراي هو صحيح ومتوافق مع التنبؤات التي جاءت بها نظرية (BCS) ان عرض فجوة الطاقة ممكن حسابها من قياسات الحرارة النوعية، الامتصاص الكهرومغناطيسي او عملية الانفاق. ان القيمة المثالية لفجوة الطاقة هي اقل من (1meV)، ومن الجدير بالذكر ان فجوة الطاقة لاتظهر بصورة مفاجئة حيث ان قيمتها عند درجة الحرارة الحرجة تساوي صفراً وتزداد الى قيمة (3,5KT_c) عند درجة حرارة الصفر المطلق. ان التغير في فجوة الطاقة مع درجة الحرارة مبني على نظرية (BCS)، و الشكل (٨-٢) يوضح ذلك حيث $\Delta(0)$ هي تمثل قيمة فجوة الطاقة عندما (T = 0)، و $\Delta(T)$ هي قيمة فجوة الطاقة عند القيمة الاعتبائية لدرجة الحرارة. يمكن تعريف فجوة الطاقة في المواد فائقة التوصيل

على انها تمثل فرق الطاقة بين الحالة الارضية للمادة فائقة التوصيل وطاقة مستوى الاثارة الاوطاً لشبه الجسيم(الفونون،الاكسيوتون). حيث كانت هناك تلميحات مبكرة ان مثل هذه الفجوة موجودة والدليل التجريبي الاول للفجوة جاء من اعتماد درجة حرارة الحرارة النوعية الاقل من درجة (T_c)، حيث وجد ان الحرارة النوعية الالكترونية تعطى بالعلاقة الاتية:

$$C_e = \gamma T_c e^{-1.0 T_c/T} \dots \dots \dots (٩ - ٨)$$

حيث ان γ تمثل معامل الحرارة النوعية الالكترونية في الحالة الطبيعية، T_c درجة الحرارة الانتقال للحالة فائقة التوصيل، وان اول قياسات طيفية للفجوة فائقة التوصيل كانت بوساطة موجات المايكروويف على الالمنيوم وكذلك تقنيات الاشعة تحت الحمراء البعيدة على الرصاص. وفي الوقت نفسه فان النظرية المجهرية (BCS) المعلنة من قبل كل من باردين، كوبر، شريفر تنبأت بان النسبة بين فجوة الطاقة للمواد فائقة التوصيل الى درجة حرارة الانتقال بحدود(١,٧٦) والتي تتفق تماما مع القياسات الطيفية. وهذه كانت واحدة من الانتصارات المبكرة للنظرية، ومن الجدير بالملاحظة ان هذه القيمة للفجوة هي من الازدواج الضعيف والذي يطبق على المواد فائقة التوصيل ذات درجات الحرارة الواطئة مثل الالمنيوم. وللمواد فائقة التوصيل

الاعتيادية(النوع الاول) فان طيف الانفاذ (الانفاق) (Tunnelling)

(Spectroscopy) يعد الاداة الكثير شيوعاً لقياس فجوة الطاقة، اما للمواد فائقة التوصيل ذات درجات الحرارة العالية (النوع الثاني)(HTSC) والتي تمتاز بفجوة طاقة اكبر فان طيف الاشعة تحت الحمراء وطيف الانبعاث الضوئي يؤدي دورا مهما ومنتزداً في قياسها. ان فجوة الطاقة للمواد فائقة

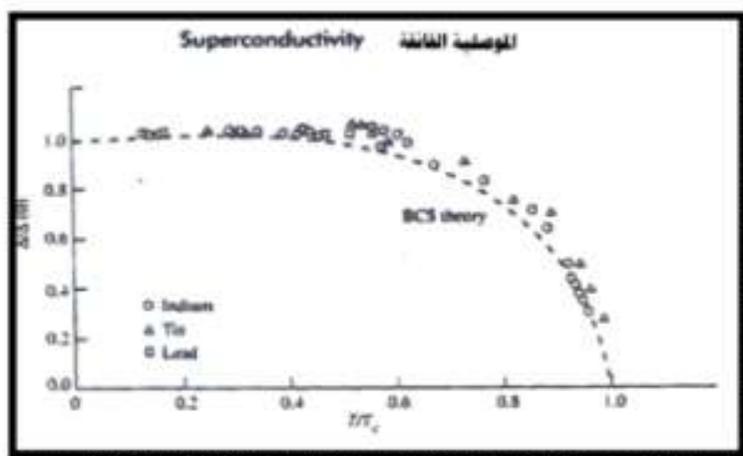
التوصيل لها تأثير عميق على استجابة المادة فائقة التوصيل للمجال الكهرومغناطيسي المتناوب والفوتون الاتي ممكن ان يمتص فقط اذا كانت طاقته وزمنه تمكنه من الانتقال الى الحالة فائقة التوصيل، وان قانون حفظ الطاقة يتطلب ان تكون طاقة الفوتون ($h\nu \gg 2\Delta$) اي ضعف فجوة الطاقة وان العامل (2) يأتي من تحطيم وكسر زوج كوبر لاننتاج زوج من شبه الجسيمات(فونونات)، والمتطلب الثاني هو حفظ الزخم وبوساطة خلق اثاره بوزونات وهي عادة الفونون، او تقلبات البرم او الاستطارة المرنة مع العيوب الثابتة، فان واحد من شبه الجسيمات يمكنه الاستطارة بعيدا عن سطح فيرمي وينتقل زخمه من الحالة فائقة التوصيل المكثفة الى درجات اخرى من درجات الحرية. وبسبب هيمنة الاستطارة المرنة فان معدل الاستطارة يجب ان يكون عاليا بما فيه الكفاية لبلوغ الحد المشوب ويعرف بالصيغة ($1/\tau \gg 2\Delta$) حيث ان (τ) هو عمر شبه الجسيم (الفونون)، وانه في الحد المشوب هناك بداية حادة من الامتصاص للترددات الاكبر من (2Δ) وان الطريقة البصرية تكون جيدة لتحديد فجوة الطاقة. ومن جهة اخرى اذا كان الحد النقي هو المنطبق وخصوصاً في الحالة التي يكون فيها ($1/\tau \gg 2\Delta$) لبوزون اينشتاين المنفرد عند $\hbar\Omega E$.

وفي المستوي او الحد المشوب فان فجوة الطاقة للمواد فائقة التوصيل لها القيم نفسها لكل النقاط عند سطح فيرمي وهذا يعني انها موحدة الخواص (Isotropic)، في حين ان عرض الفجوة في المواد النقية ممكن ان تظهر عدم تماثل في الخواص بصورة كبيرة (Anisotropic) في فضاء

الزخم خلال قياسات الاطيف تحت الحمراء. ان الفجوة عند مستوى فيرمي هي خاصية مميزة للمواد فائقة التوصيل التقليدية، اما المواد فائقة التوصيل (HTSC) فانها تتفق معها ولكن تتم باضافة عند مستويات التطعيم الواطئة هناك فجوة في الحالة الطبيعية تسمى بالفجوة الكاذبة (Pseudogap) ، وسواء كانت هذه الفجوة ناتجة من الحالة البدائية للتوصيلية الفائقة او هي طور منفصل تماما تتنافس مع التوصيلية الفائقة، لهذا فانها تعد سؤالاً مفتوحاً. ومع اكتشاف التوصيلية الفائقة ذات درجة الحرارة العالية (HTSC) فان السؤال الاول الذي يتبادر الى الذهن هو طبيعة فجوة الطاقة في التوصيلية الفائقة، و بعد مدة من الذهول وجد انها ذات صفات واعدة، ولقد كانت هناك العديد من النظريات لتحديد طبيعة فجوة الطاقة لهذه المواد، و لكن طيف الاشعة تحت الحمراء اظهر وبوقت مبكر ان معدل نسبة الاستطارة واطى جدا والذي وضع المواد في المستوى النقي وهذا قد جعل من تحديد عرض فجوة الطاقة صعبا جدا، ولكن قياسات طيف المايكروويف لتغيرات عمق الخترق مع درجة الحرارة بين وبشكل حاسم ان هذه الفجوة متباينة الخواص (Anisotropic) بصورة عالية في فضاء الزخم وتذهب الى الصفر للاكترونات المنتقلة في اتجاهات محددة وان مقدار الفجوة يتغير بالصورة $(K_x^y - K_y^y)$ حول مستوى فيرمي، وهذا مطابق الى الحالة فائقة التوصيل (d-wave) بالمقارنة بالفجوة موحدة الخواص (s-wave) للمواد فائقة التوصيل التقليدية. وقد اظهرت الحسابات انه لا يوجد بداية امتصاص عند $(\Delta/2)$ في المواد فائقة التوصيل (d-wave) كما هي الحال في (s-wave)

المشوبة، وبالنتيجة النهائية نلاحظ وبشكل بارز ان هناك بداية ملحوظة لامتصاص التردد في هذه الخاصية وهي تجمع الطاقة من الفجوة ونمط البوزون والذي يعمل كهلام رابط للحاملات فائقة التوصيل. ان اللغز الاخر الذي أحاط بطبيعة فجوة الطاقة للمواد فائقة التوصيل (HTSC) جاءت من عدة تلميحات التي ابقت الفجوة في الحالة الطبيعية عند درجة حرارة اعلى من درجة حرارة الانتقال الحرجة للحالة فائقة التوصيل. الدليل الاول جاء من تجارب (NMR) التي وجدت ان انخفاض شبه الفجوة لكثافة الحالات عند سطح فيرمي هو تحت درجة حرارة (T^*) و التي كانت اكبر من (T_c) عند مستويات التطعيم الاقل ولكن تقترب (T_c) بالقرب من التطعيم الامثل وسميت هذه الفجوة بداية بفجوة البرم (Gap Spin) اظهرت التجارب اللاحقة على التوصيلية الضوئية ان الفجوة تتطوي على درجات حرية لدرجة الشحنة وتم تغيير اسمها للفجوة الكاذبة (Pseudogap)، بعد ذلك العديد من التجارب والتي تضمنت الحرارة النوعية اكدت نتائجها الاولى ومن بينها الانبعاث الضوئي المحلل اظهر الذي (ARPS) (Angle Resolved Photoemission Spectroscopy) للزاوية ان الفجوة الكاذبة لها نفس تماثل (d-wave) ان طبيعة الفجوة الكاذبة مازالت مثار جدال ونقاش حاد ولكن من ابرز هذه النقاشات هو الاقتراحان الاتيان: الاول: هو ان الفجوة الكاذبة هي تمهيد بسيط للفجوة فائقة التوصيل حيث ان الازواج من الالكترونات تتشكل ولكنها غير قادرة على تشكيل التشاكة فائق التوصيل وهذا

يعزى الى التقلبات الحرارية، الثاني: هو ان الفجوة الكاذبة هي طور كمي جديد تماما ومميز والذي يتنافس مع الخاصية فانقة التوصيل. وعند هذه النقطة فانه ليس من الواضح اي الاقتراحان هو الصحيح واي من التجارب سوف تنتج توقعات لمرحلة جديدة.



الشكل (٨-٢) تغير فجوة الطاقة مع درجة الحرارة للنسبة

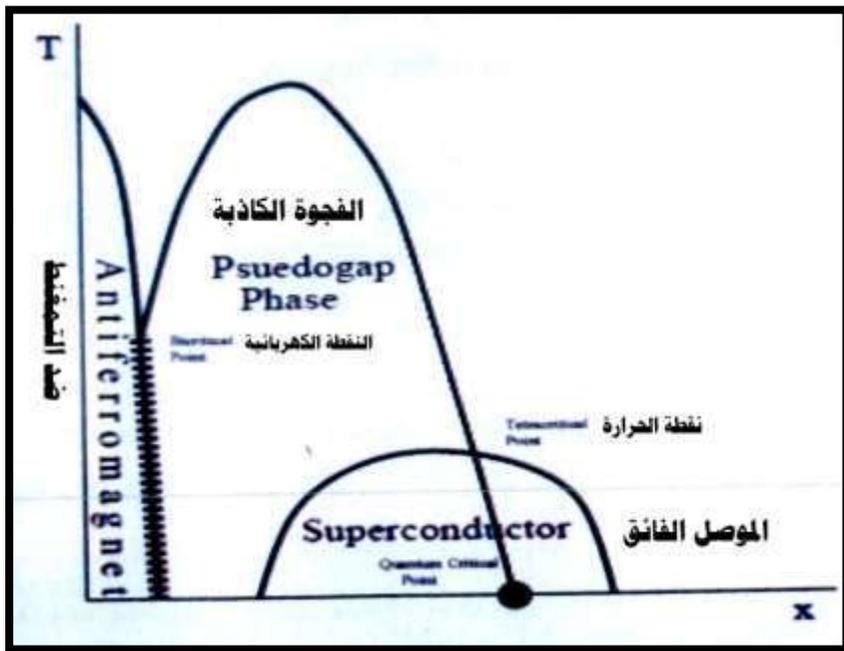
٧-٨ الفجوة الكاذبة (Pseudogap)

تعرف الفجوة الكاذبة (Pseudogap) على انها ميزة الفجوة المجهولة الاصل في الاثارة وهي تعد واحدة من الكثير من (T_c) الالكترونية الاعلى من درجة الحرارة الحرجة (الميزات الغريبة التي ظهرت ما بعد نظرية (BCS) وقد لوحظت في دالة الالكترون الطيفية بالقرب من النقاط التقابلية هما $(\pi, 0)$, $(0, \pi)$ عند درجة الحرارة، و بمعنى آخر درجة الحرارة الكاذبة $(T^* \gg T)$ في نظرية (BCS) للموصلات الفائقة التقليدية، اذ تحدث عملية الفصل هذه بشكل آني مع التوصيلية الفائقة عند درجة حرارة الانتقال

الحرجة (T_c)، وهي ملحوظة في الموصلات الفائقة (Cuprates) بواسطة عدد من التقنيات التجريبية التي نوقشت حول العلاقة بين الفجوة الكاذبة والتوصيلية الفائقة في (Cuprates) ان تجارب الرنين النووي المغناطيسي (NMR) كانت اول اكتشاف للحالة الطبيعية للفجوة الكاذبة في النظام المطعم (YBCO) بواسطة قياس نسبة استرخاء برم الشبكة) (Relaxation Lattice-Spin Rate) و انتقال نايت Shift) Knight)، ونسبة الى تاثيرية البرم، فان هذين المتغيرين وجدا انهما يميلان للنقصان مع درجة الحرارة تحت درجة حرارة مميزة وهذه الملاحظة (T_c)، وكذلك اقترحت ان هناك بعض المجاميع من البروم تبقى مزدوجة في حالة اعلى من سهولة اختزال التاثيرية المغناطيسية من تقلبات البرم. ان فجوة البرم اقترحت مستندة على هذا الاكتشاف، وتشكيلها يكون اكثر شباها للانتقال الواسع منه انتقال

الطور الحقيقي. لقد اكدت الفجوة الكاذبة الحقا بواسطة تقنيات اخرى والتي استعملت كشف مسار الشحنة، مثل التوصيلية البصرية والحرارة النوعية الالكترونية. وضمن مسار الشحنة فان الفجوة الكاذبة توصف بواسطة استنزاف كثافة الحالات حول مستوى طاقة فيرمي. ان ميزة الفجوة في الحالة الطبيعية ايضا لوحظت في اطياف القياس بواسطة (ARPS) وكذلك (STM) ولقد تبين هاتان التقنيتان بسرعة لدراسة الموصلات الفائقة (Cuprates)، واللذان تزودنا بتفاصيل ومعلومات اكثر عن الفجوة الكاذبة. هناك العديد من الافكار التي تهتم بدراسة معنى الفجوة الكاذبة، التي عرفتها

بدقة كظاهرة، والمبينة في الشكل (٨-٣) و هي المنطقة التي يحدث فيها اختزال عام في كثافة الاثارات للطاقة المنخفضة. ولهذا فهي محددة بخط متقل غامق. وهي ممكن ايضا ان تعكس الى حد ما وجود كسر التماثل، وفي هذه الحالة يجب ان تكون محدودة بوساطة حد طوري دقيق، وكما هو موضح في الشكل (٨-٣) هناك العديد من الطرائق مثل طور الفجوة الكاذبة ممكن ان تتفاعل مع الاطوار اخرى والمتكونة بصورة جيدة ، ولاغراض الايضاح قمنا بتحديد النقطة الحرجة الرباعية والنقطة الحرجة الثنائية، حيث تجتمع الفجوة الكاذبة على التوالي



الشكل (٨-٣) الفجوة الكاذبة في الموصلات الفائقة.

٨-٨ التحريكيات الحرارية للانتقائات فائقة التوصيل (طاقة جيس)

Thermodynamics of Superconducting Transitions

الطاقة الحرة لجيس الحرة (Gibbs Free Energy) لوحدة الحجم في مجال مغناطيسي تعطى بالعلاقة الآتية:

$$G = U - TS - HM \dots \dots \dots (٨ - ١٠)$$

حيث M هي التمغنط، و S هو الانتروبي، و PV (تمثل الحجم والضغط) هنا مهمة. أيضا ومن القانون الثاني في الثرموداينميك، فان الطاقة الداخلية تعطى بالعلاقة الآتية

$$dU = TdS + HdM \dots \dots \dots (٨ - ١١)$$

وعند مقارنة هذه العلاقة مع العلاقة القياسية للطاقة الداخلية للغاز التي هي

$$dU = TdS + PdV \dots \dots \dots (٨ - ١٢)$$

نجد ان H تؤدي دور P مهمما في M , P للحجم (V) وباشتقاق العلاقة

$$dG = dU - TdS - SdT - MdH \dots \dots \dots (٨ - ١٣)$$

الاولى نحصل على ما ياتي - $MdH - HdM = -SdT - MdH$ ومنه وعند

درجة الحرارة الثابتة فان المعادلة السابقة تختزل الى

$$dG(H) = -MdH \dots \dots \dots (٨ - ١٤)$$

وبتكامل المعادلة السابقة للحالة فائقة التوصيل نحصل على ماياتي

$$\int_0^H dG = - \int_0^H MdH \dots \dots \dots (٨ - ١٥)$$

$$G_s(H) - G_s(0) = - \int_0^M MdH \dots \dots \dots (٨ - ١٦)$$

من جهة اخرى، اذا العينة كانت في الحالة الطبيعية، هي بارامغناطيسية، فانه
 $(X \rightarrow \bullet) (M \rightarrow \bullet)$ فمن المعادلة الاخيرة يمكن كتابتها على النحو الاتي:

$$G_N(H) - G_N(\bullet) = \bullet \text{ or } G_N(H) \\ = G_N(\bullet) \dots \dots (17 - 8)$$

واشارة الى انه في الحالة الطبيعية فان دالة جيبس تبقى ثابتة تحت تأثير
 المجال المغناطيسي المسلط. والان وطبقا الى الشكل (2-4) نجد ان الحالة
 الطبيعية والحالة فائقة التوصيل هما في حالة اتزان، ولذلك فان الطاقات الحرة
 لكلا الحالتين عند الحدود يجب ان تكون متساوية وهذا يعطي ما ياتي

$$G_N(T, H_c) = G_S(T, H_c) \dots \dots \dots (18 - 8)$$

ومن المعادلتين (8-16), (8-17), (8-18) نحصل على ما
 ياتي:

$$G_N(T, H_c) = G_S(T, H_c) = G_S(\bullet) - \int_{\bullet}^M M dH \dots (19 - 8)$$

ومن المعادلتين الاخيرتين و (8-17) نحصل على النحو الاتي:

$$G_N(\bullet) = G_S(\bullet) - \int_{\bullet}^M M dH \text{ or } G_N(\bullet) - G_S(\bullet) \\ = - \int_{\bullet}^M M dH \text{ or} \\ \Delta G = - \int_{\bullet}^M M dH \dots \dots \dots (20 - 8)$$

والان من تأثير مازنر نحن نعلم ان $(M = -H (B = \bullet))$ لذلك فان المعادلة:

$$\Delta G = G_N(\cdot) - G_S(\cdot) = - \int_1^M MdH = \int_1^{H_c} HdH$$

$$= \frac{H_c^2}{2} \dots (21 - 8)$$

٩-٨ اختلاف الانتروبي والحرارة النوعية

Entropy Difference and Specific Heat

ان الانتقال بين الحالة الطبيعية والحالة فائقة التوصيل ثرموداينميكيا قابل للانعكاس، وان اختلاف الانتروبي بين الحالتين يعطى بالعلاقة الاتية:

$$S_N - S_s = -H_c \frac{dH_c}{dT} \dots \dots \dots (22 - 8)$$

ان الحرارة الكامنة للنظام تتعلق باختلاف الانتروبي كما ياتي:

$$Q = T(S_N - S_s) = -TH_c \frac{dH_c}{dT} \dots \dots \dots (23 - 8)$$

ان الاختلاف في الحرارة النوعية للحالتين يعطى بالعلاقة الاتية

$$C_N - C_s = -T_c \left(\frac{dH_c}{dT} \right)^2 \dots \dots \dots (24 - 8)$$

ان الحرارة النوعية الالكترونية للموصل الفائق تعطى بالعلاقة الاتية:

$$(C_{el})_s = a e^{-\Delta/KT} \dots \dots \dots (25 - 8)$$

حيث a هو ثابت و Δ هوفجوة الطاقة حيث ($\Delta = 3,03K$)

٨-١٠ انتقال تحول الطور Transition Phase

ان التغير في تركيب المادة ممكن ان يحدث بسبب تأثيرات درجة الحرارة او المجال الكهربائي او الاشعاع او الضغط الميكانيكيألخ، من الاجهادات التي ممكن ان تتعرض لها المادة و يسمى هذا بانتقال او تحول الطور (Transition Phase).

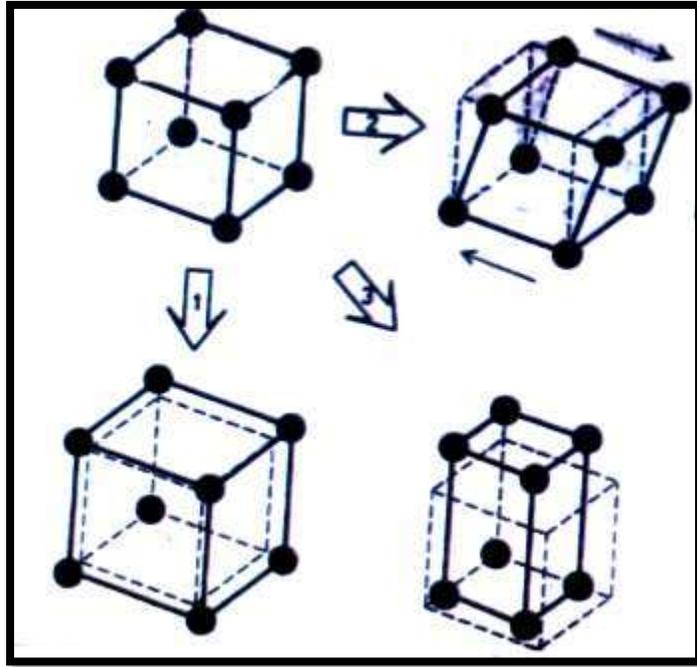
ان الانتقال او التحول الطوري يحدث عندما تكون حالة المادة الابتدائية غير مستقرة نسبة الى الحالة النهائية للمادة، ان القوة الدافعة الكيميائية تحتل مكانة مهمة ورئيسة في الديناميكا الحرارية الكالسيكية وتعد هي مفتاح الحل، حيث انه في التحول الطوري من المرتبة الاولى (transformation order First) الاقل انتشاراً فان التركيب الكيميائي لايتغير خلال عملية التحول الطوري ويكون للمادة الام والمادة الناتجة التركيب الكيميائي المتجانس نفسه ولذلك يعد كنظام مركب واحد، وتوصف تغيراتها التركيبية في هذه التحولات الطورية بسهولة بوساطة بارامترات الازاحة.

ان طاقة جيبس (Gibbs energy) (G) تعرف بالمعاملات: الانتالبي (H) والانتروبي (S) ودرجة الحرارة (T).

$$G = H - TS \dots \dots \dots (٢٦ - ٨)$$

ان النظام ثابت درجة الحرارة والضغط سوف يعطي حالة من الاتزان التي تقلل من قيمة طاقة جيبس (G).

ان التحولات الطورية تصنف عادة الى مجموعتين هما
الاولى هي التحولات المزاحة (Transformation Displacive)
والثانية هي التحولات المارتينسايت (Transformation
Martensitic)، اذ يحدث الاول من خلال انحرافات منسقة لذرات منفردة
اومجاميع من الذرات بطرائق منظمة بالنسبة للذرات المجاورة، ان تشوه الشبكة
التحطمي هو انفعال متجانس والذي يحول الشبكة من نوع الى آخر كما مبين
بالشكل (٨-٤) اما تحولات المارتينسايت فتحدث من خلال التغير الكامل في
التركيب البلوري، لان حجم التغير وطاقة الانفعال تشترك في عملية التحول،
ان تحول المارتينسايت يتطلب تنوي غير متجانس ويمر خلال خليط من
الطورين هما المادة الام والمادة الناتجة وهو تحول طوري من المرتبة الاولى
الاقل انتشاراً، وبالنتيجة فان التحولات الامامية والعكوسة تكون مصحوبة
بتأثير حراري باعث للحرارة وماص للحرارة على التوالي، وان مسارات التحولات
الامامية والعكوسة تكون مفصولة بوساطة الهسترة (التخلف المغناطيسي).



الشكل (٨-٤) امثلة التشوهات المحطمة للشبكية المكعبة

١. توسع في الاتجاهات الاساسية الثالثة تحول الشبكية الى مكعب اخر مع معاملات شبكية أكبر.

٢. القص على طول المستوي (٠٠١) تؤدي الى شبكية أحادية

الميل (monoclinic)

٣. التمدد على طول المحور (٠٠١) يصاحبه تقلص على طول المحور (١٠٠)

و (٠١٠) ينتج عنه شبكية معينة قائمة (orthorhombic)

ان تأثير درجة الحرارة على معدلات التفاعل تعطى بواسطة معادلة أرهينس

$$K = K_0 e^{-E_a/K_B T} \dots \dots \dots (٢٧ - ٨)$$

حيث E_a هي طاقة التنشيط، K_B هو ثابت بولتزمان، T هي درجة الحرارة مقاسة بالكلفن، K هو معدل التفاعل.

K تزداد بزيادة درجة الحرارة والتي ممكن ايجادها من معادلة افرامي (Avrami equation) هي:

$$1 - \alpha = e^{-Kt^n} \dots \dots \dots (28 - 8)$$

حيث α هي الكسر الحجمي للتحويل، t هو زمن التفاعل، n هي تحركية التفاعلات (n, k) يمكن الحصول عليها من خلال المعادلة الآتية:

$$\begin{aligned} \text{LogLn} \left[\frac{1}{1-\alpha} \right] \\ = n \text{Log } t + \text{Log } k \dots \dots \dots (29 \\ - 8) \end{aligned}$$

Formation of (Bi-2223) phase تشكيل الطور ١١-٨

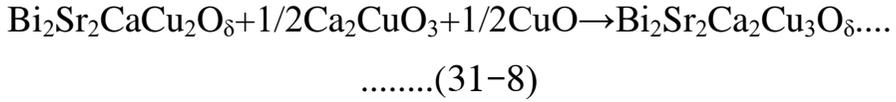
ان درجة الحرارة الحرجة العالية للموصل الفائق (Cuprate) تعتمد على التركيب البلوري المشابه لتركيب البيروفسكايت. حيث ان الاوكسيد الفائق التوصيل المستند على البزموت (base-Bi) معروف بامتلاكه مركب مختلط من الطور (Bi-2212) ذي درجة الحرارة الحرجة الواطئة، والطور (Bi-2223) ذو درجة الحرارة الحرجة العالية، وهذه الاطوار التي تتضمن عدة طبقات عازلة لطبقة اوكسيد النحاس.

لقد درس (Mizuno et al) ، تكون الطور (Bi-2223) ووجدوا ان الطور ذو درجة الحرارة الواطئة (Bi-2212) غير مستقر عند درجات الحرارة العالية ويسبب عدم تكافؤ التفاعل:

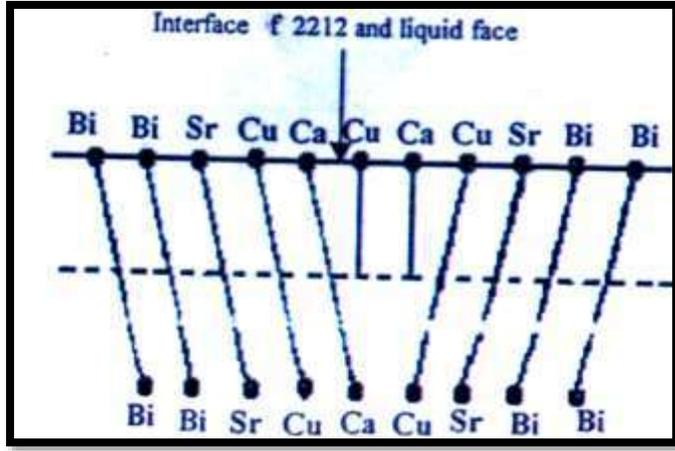


0-8)

ومن هذه المعادلة فان الطور العالي والطور الواطئ ممكن ان ينتجا بواسطة
تفاعل الحالة الصلبة للطور (Bi₂Sr₂CuO_x) مع (CaCuO₃) و (Cu)
لتشكيل الطور (Bi₂Sr₂Ca₂Cu₂O₈)، بعد ذلك سوف يتشكل طورا واطئ
الحرارة (Bi-٢٢١٢)، والذي سوف يخضع لاحقا الى تفاعل غير متكافئ،
ونتيجة لهذا سوف ينمو الطور ذو درجة الحرارة العالية (Bi-٢٢٢٣)
قام (Feng et al) باقتراح، ان الطور (Bi-٢٢٢٣) يتشكل من الطور (Bi-
٢٢١٢) ان قام بوساطة عملية مشابهة للانتقال الطوري كما في المعادلة
الآتية:

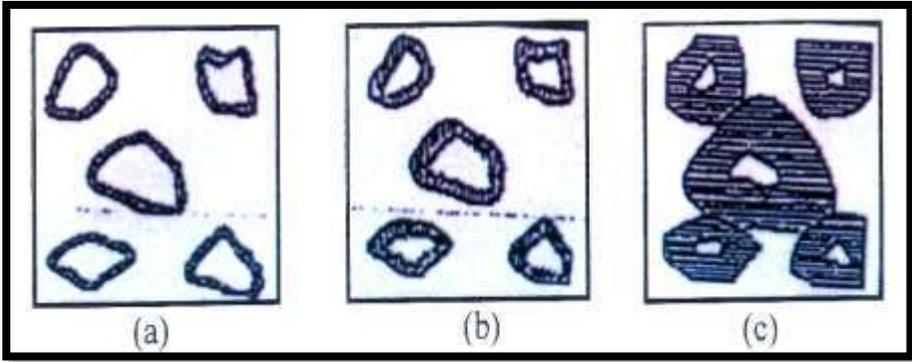


ان تنوي الطور (Bi-٢٢٢٣) ممكن ان يتشكل اذا ادخلت اي طبقات اضافية
من (Cu- Ca- O) داخل الطور الاساس (Bi-٢٢١٢) كما هو مبين في
الشكل (٥-٨) ان الموضع الاكثر احتمالية للتنوي هو السطح البيني بين
الطور (Bi-٢٢١٢) والمركب (Ca₂Cu₂O+CuO)
ان النتيجة في مثل هذا الادخال هو تكوين انخلاع حافي. وبعد ذلك
ينمو الطور (Bi-٢٢٢٣) من خلال تسلق هذا الانخلاع الحافي بوساطة
انتشار ذرات متنوعة من (Ca،Sr،Cu،O) موازية للب الانخلاع



الشكل (٥-٨) تشكيل النواة بواسطة ادخال تركيب مكعب مشابه لتركيب البيروفسكايت (Ca-Cu-O) داخل الطور الاساس (Bi-٢٢١٢) عند السطح البيني للطور (Bi-٢٢١٢) والطور السائل.

اما (Wang et al)، فقد لاحظوا آلية اخرى لتشكيل الطور العالي (Bi-٢٢٢٣) ووجدوا ان عملية التفاعل ابدت ثلاث مراحل هي: مرحلة التحفيز (Inducing period)، ومرحلة التسريع (Accelerating period)، ومرحلة التشكيل المتقدمة (Front forming period) في المرحلة الاولى يتناقص الطور (Bi-٢٢١٢) بسرعة، وفي المرحلة الثانية تبدو ان سرعة التناقص للطور (Bi-٢٢١٢) لاتصبح مسرعة ولكن تتباطئ بعض الشيء، لذلك فان الطور العالي (Bi-٢٢٢٣) لايمكن ان يتشكل بواسطة الترسيب المباشر للطور (Bi-٢٢١٢)، ولكن بواسطة ذوبانية الطور (Bi-٢٢١٢)، وهذه العملية موضحة في الشكل (٥-٨)



الشكل (٨-٦) مراحل تشكيل الطور (Bi-٢٢٢٣) حيث تمثل:

المرحلة الاولى وهي مرحلة ترطب الطور (Bi-٢٢١٢) والمرحلة الثانية وهي مرحلة الذوبانية الجزئية (تكون الطور السائل) والمرحلة الثالثة وهي مرحلة نمو الطور (Bi-2223)

ان الطور الواطئ المتكون يرطب بوساطة الطور السائل الغني بذرات (Ca, Cu) والذي يحتوي كذلك على ذرات عناصر اخرى مضافة مثل (Pb)، واما الطور السائل فيتشكل عند سطح الطور الواطئ (Bi-٢٢١٢) والذي ينشأ من ذوبان او تآكل جزئي، ومن جهة اخرى فان الطور السائل المحتوي على (Pb, Cu, Ca) بغزارة يستطيع ان ينتشر تلقائيا الى سطح الطور (Bi-٢٢١٢) المتبقي وخلال تفاعل بيني تتكون انوية الطور (Bi-٢٢٢٣) على السطح البيني للطور (Bi-٢٢١٢) وبعد تكوين انوية (Bi-٢٢٢٣) يدخل التفاعل مرحلة النمو البلوري.

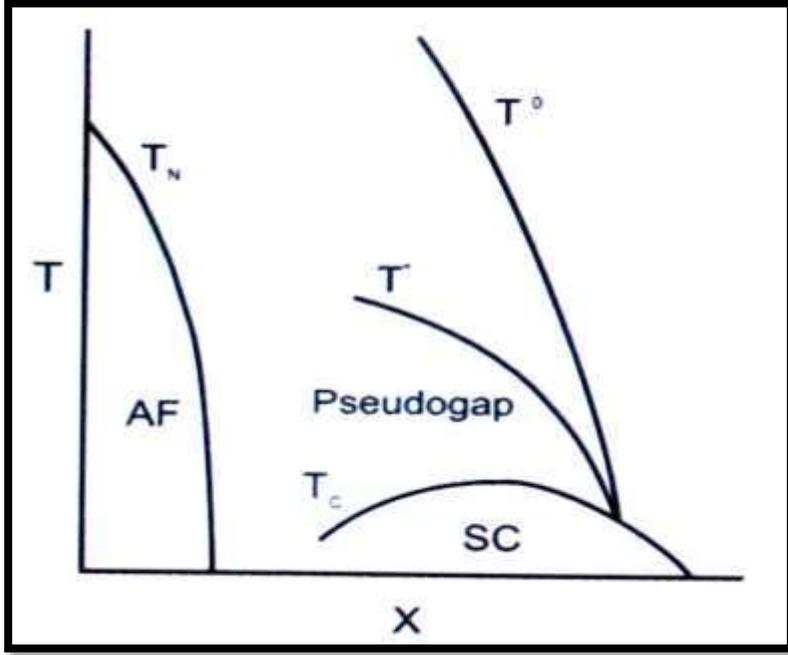
٨-١٢ المخطط الطوري للموصلات الفائقة المعتمدة على اوكسيد النحاس

(Phase Diagram Of Cuprate Superconductors)

ان خواص الالكترن في الموصلات الفائقة عالية درجة الحرارة الحرجة تعتمد بشدة على التطعيم. ان الموصلات الفائقة عالية درجة الحرارة الحرجة T_c من دون تطعيم هي عوازل كهربائية ومواد مضادة فيرومغناطيسية، فاذا ازداد تركيز مادة التطعيم (X) فان هذه المواد تصبح معادن. تنشأ التوصيلية الفائقة عندما يكون تركيز المادة المطعمة (X) كبيراً، و هي التي تقع خلف حدود الطور المرتب مغناطيسياً. اظهرت التجارب ان نواقل الشحنة لها مواصفات الفجوات في كل اصناف الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية. لقد اصبح واضح حديثاً ان التوصيلية الفائقة عالية الحرارة لها علاقة بخواص سلوك تلك المركبات في الطور الطبيعي. كما هو موضح في المخطط الطوري الشكل (٨-٧) حيث تنشأ حالات التوصيلية الفائقة بالقرب من الطور المضاد للفيرومغناطيسية. وفي الانظمة الحاوية على اليتريوم مثال، تكون المناطق المضادة للفيرومغناطيسي والتوصيلية الفائقة مجاورة بعضها للبعض الاخر. اذ تشير التجارب التي اجريت على استطارة مغناطيسية غي مرنة للنيوترونات لوجود تقلبات مغناطيسية قوية في المنطقة المطعمة، وحتى خارج حدود الطور المضاد - للفيرومغناطيسية. وهذا يشير الى الدور المهم للتقلبات الضديدة فيرومغناطيسية في المركبات ذات التوصيلية الفائقة وذات درجات الحرارة العالية. وفي الموصلات الفائقة ذات الحرارة العالية توجد الفجوة بغياب تماسك الطور، وهذا يعني أنه في العينات

غير الفائقة التوصيل هذه الفجوة تسمى بالفجوة الكادية والتي نراها في الشكل (٨-٣) حيث تظهر الفجوات الكاذبة في درجات حرارة اقل من بعض درجات الحرارة المميزة (T^*) والتي تعتمد على التطعيم. فيما عدا ذلك فان طبيعة الفجوة الكاذبة لم توضح بصورة تامة. إن دراسة الفجوات الكاذبة في طيف الالكترون للموصلات الفائقة ذات الحرارة العالية حدثت في العديد من البحوث. حيث ان (١٣) معدنا أصبحت فيها موصلات فائقة، اذا اتحدت الكترونات الحرة في ازواج كوبر. فضلا عن ذلك تتشكل الازواج بطريقة مناسبة حيث يكون لدالة موجتها الطور نفسه. ان تماسك الطور مسؤول عن تغير المقاومة في ظروف التبريد تحت (T_c). ان وجود الأزواج في الموصل الفائق يسبب ظهور الفجوة في طيف الاثارات. وفي الموصلات الفائقة القياسية، وان تماسك الطور للازواج يظهر أنيا مع ظهور الأزواج المقترنة. ومن احدى وجهات النظر، فان الفجوة الكاذبة تتعلق بظهور الأزواج المقترنة، والتي لاتتعلق بتماسك او ترابط الطور. ومن وجهة نظر اخرى: أن الفجوة الكاذبة تنشأ في الموصلات الفائقة (HTSC) في الاتصال مع تشكيل الحالات المغناطيسية والتي تشترك مع حالات التوصيل الفائق. ان الجهود التجريبية تهدف إلى حل هذه المعضلة المعقدة بوساطة التباين الشديد في خواص فجوة الفائق. بعض الفيزيائيين يظن بأن الحالة الاكثر احتمالاً هي تلك التي تتعلق بخلق حالات فائقة التوصيل مع ازدواج الألكترونات عند تطعيم معين والتي تتواجد مع الضديدة فيرومغناطيسية. وهذا محتمل فقط في

حالة جديدة من المادة التي نوقشت بصورة واسعة في السنوات الاخيرة بالارتباط مع (HTSC).



الشكل (٧-٨) المخطط الطوري للموصلات الفائقة (Cuprates) كدالة بين درجة الحرارة (T) ونسبة التطعيم (X) و T_N هي درجة حرارة نيل (Neel Temperature)، و (T) هي درجة حرارة الحرجة للانتقال فائق التوصيل، و T^* هي درجة الحرارة المميزة للفجوة الكاذبة، T_c هي أعلى درجة حرارة انتقال.

٨-١٣ السعة الحرارية: Heat capacity

هي معدل تغير الطاقة الداخلية للمادة بتغير درجة الحرارة او معدل تغير انتروبي (المحتوى الحراري او السخان) المادة بتغير درجة الحرارة ووحدة قياس السعة الحرارية هي الجول لكل كلفن، وتحسب السعة الحرارية عند ثبوت الحجم بالعلاقة الاتية

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right) V \dots \dots (٣٠ - ٨)$$

وعند ثبوت الضغط فتحسب بالمعادلة الاتية:

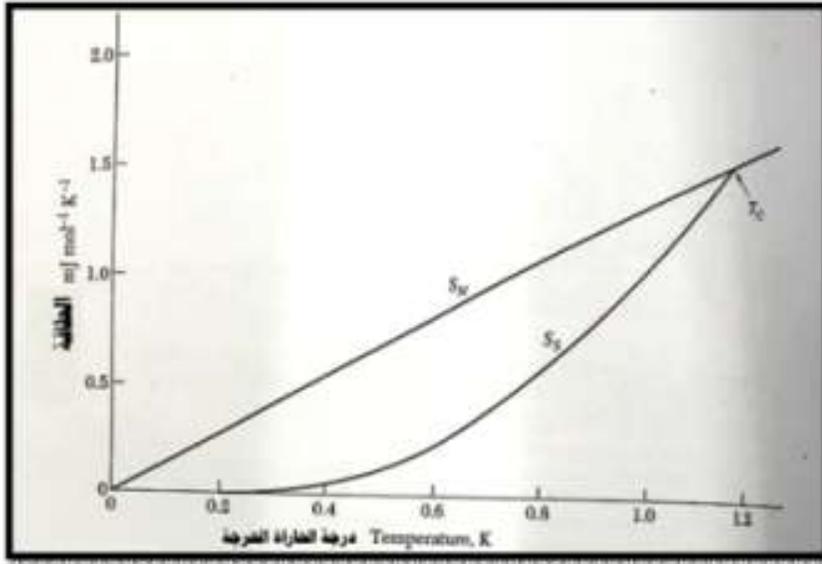
$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right) P \dots \dots (٣١ - ٨)$$

حيث ان:

$$U = \text{الطاقة الداخلية للمادة}$$

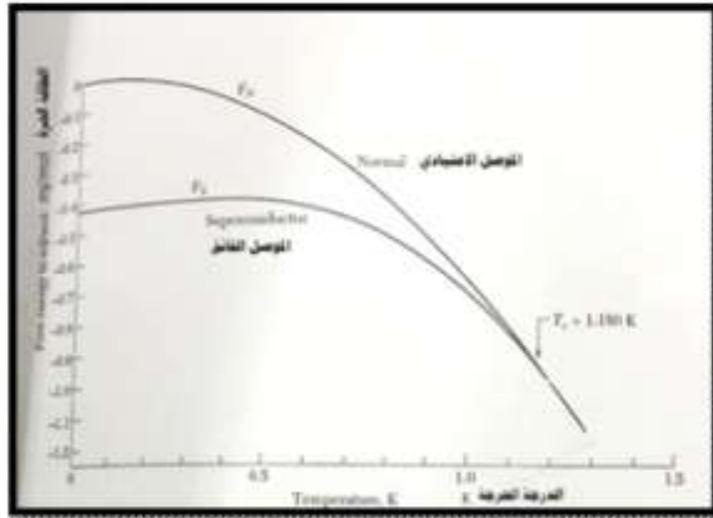
$$H = \text{الانتالبي للمادة (طاقة ١ غرام من الطاقة الداخلية للمادة)}$$

يقال الاونتروبي (الانتروبي) بصورة مفاجئة في جميع الموصلات الفائقة عند تبريدها بدرجة حرارة اقل من درجة الحرارة الحرجة (T_c). الشكل (٨-٨) يبين رسم قياسات الانتروبي للامنيوم كدالة لدرجة الحرارة الحرجة (T_c). ومن هذا الشكل يتضح ان الانتروبي للحالة فائقة التوصيل اقل من الحالة الاعتيادية كون الكترونات الحالة الفائقة التوصيل تترتب (تنتظم) اكثر من الحالة الاعتيادية. وعند درجة حرارة اقل من درجة الحرارة الحرجة يكون النموذج في الحالة الاعتيادية عند استخدام مجال مغناطيسي خارجي اقوى من المجال المغناطيسي الحرج .



شكل (٨-٨) يوضح رسم الانتروبي للحالة الاعتيادية والحالة فانقة التوصيل كدالة لدرجة الحرارة

ان النقصان اللانتروبي (S) في حالة الموصلية الفائقة يدل على ان الكتروناتا اكثر تنظيماً (ترتيب) من الحالة الاعتيادية. تبينان بأن الحالة الموصلية الفائقة اكثر نظاماً من الحالة الاعتيادية اكثر نظاماً order من الحالة الاعتيادية. بعض او كل الالكترونات الحرارية تنهيج في حاله الاعتيادية وهي بترتيب في الحالة الموصلية الفائقة. ان مقدار تغيير الانتروبي في الالمنيوم بمقدار $10^{-4} k_B$ لكل ذرة. ان هذا التغيير الصغير يعني بأن جزء صغير بمقدار $10^{-4} k_B$ من الالكترونات تساهم بالانتقال الى حالة الموصلية الفائقة المنتظمة. عند رسم الطاقة الحرة كدالة لدرجة الحرارة كما في الشكل (٨-٩) والذي يبين الفرق بين الطاقات الحرة لكل الحالتين الاعتيادية وحالة الموصلية الفائقة.

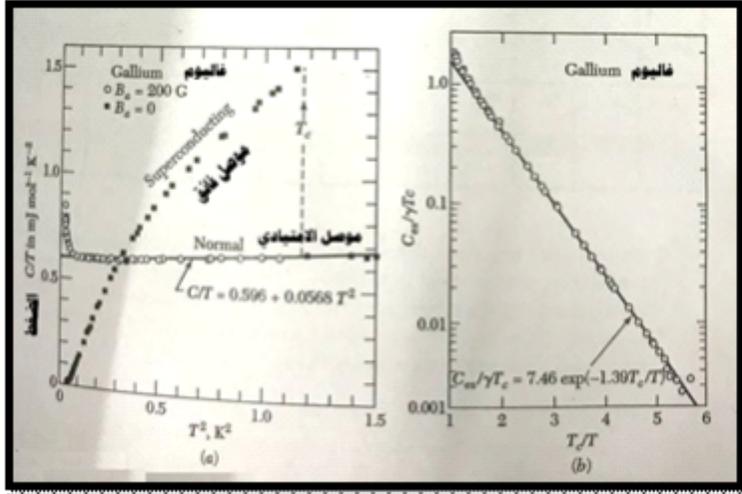


الشكل (٨-٩) يمثل رسم القيم التجريبية للطاقة الحرة للالمنيوم كدالة لدرجة الحرارة للحالة الاعتيادية وحالة الموصلية الفائقة

ومن الشكل اعلاه نلاحظ ان الطاقات الحرة للحالة الاعتيادية وحالة الموصلية الفائقة يندمجان (يلتقيان) عند درجة حرارة التحول والتي تساوي ١.٠٨K ويتم الانتقال الى نظام الطور الثنائي.

ان السعة الحرارية للكالسيوم تم رسمها في الشكل (٨-١٠) حيث ان (a) يمثل مقارنة بين الحالة الاعتيادية وحالة الموصلية الفائقة.

(b) يمثل مشاركة الالكترونات في السعة الحرارية في الحالات الصلبة الفائقة بشكل اسي ويتناسب مع $\frac{-1}{T_C}$ بافتراض تهيد الالكترونات خلال فجوة الطاقة



الشكل (٨-١٠) يمثل السعة الحرارية للغاليوم في الحالات الاعتيادية والفائقة التوصيل

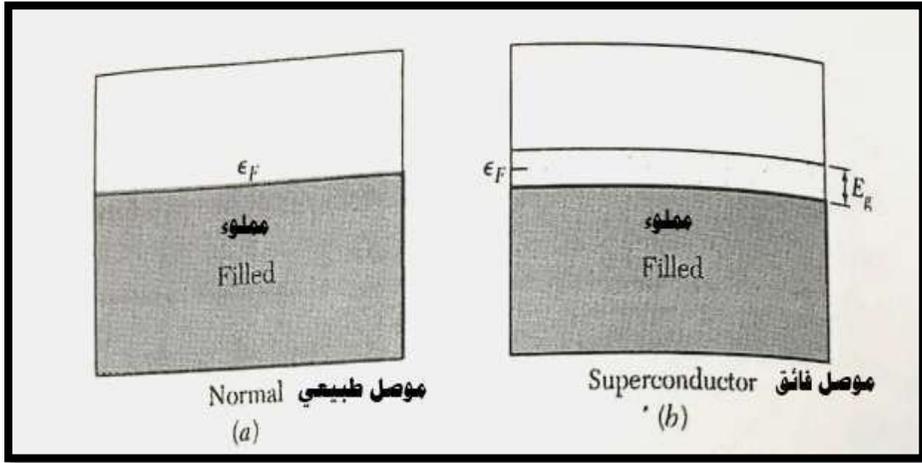
ان خصائص طاقة الفجوة تم رسمها في الشكل (٨-١٠) حيث ان (a) يبين السعة الحرارية للكاديوم في الحالة الاعتيادية وللحالة الموصلية الفائقة. ان الحالة الاعتيادية تحدد الخزن تحت مجال مقداره ٢٠٠G وان الالكترونات والشبيكة تحت درجة حرارة واطئة تشارك وتكون اقواب متساوية.

(b) اما في b فان جزء الالكترونات C_p لافضل سعة للحالة الاعتيادية رسمت مقابل $1/T$ وان التناسب يعتمد على $1/T$ ان الانتروبي يكون اقل في الحالة الفائقة بسبب قلة الالكترونات بمقدار اقل من الحالة الاعتيادية ويقل كلما قلت الدرجة الحرجة (T_c)

ان خصائص فجوة الطاقة موضحة في الشكل (٨-١١) حيث لا توجد سمات عامة للحالة فائقة التوصيل والتي تفسر بواسطة نظري (BSC) وان الشكل (٨-١١) يبين في

(a) حزمة الموصلية للحالة الاعتيادية

(b) يمثل فجوة الطاقة في مستوى فيرمي للحالة الموصلية الفائقة وان الالكترونات تتهيج فوق الفجوة.



الشكل (٨-١١) يبين السعة الحرارية للحالة الاعتيادية والحالة فائق التوصيل

الفصل التاسع

نظريات التوصيلية الكهربائية الفائقة

٩-١ نظريات الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة الواطئة

(Theories of Superconductor at Low Temperature)

٩-١-١ المقدمة (Introduction)

توجد عدة نظريات لتفسير التوصيلية الفائقة كل منهما يفسر حالة معينة وفق ظروف تتعلق بتلك الحالة ولكن تلك التغيرات تعتقد الى تفسير عام موحد يفسر تلك الظاهرة الكهربائية المغناطيسية. ان البحوث والدراسات مستمرة في تفسير هذه الظاهرة وسيأتي اليوم الذي تظهر فيه نظرية عامة تربط تلك التفسيرات بفلسفة واحدة علمية دقيقة. فمن هذه النظريات نظريات تفسر التوصيلية الفائقة بدرجات الحرارة العالية (high) ومنها: اليات الازواج، الالياف ثنائية القطب، تفاعلات الشبكة-الالكترونون، نظريات التيارات الدوامة، نظرية نموذج الازواج، الطبقات البينية، ونظريات اخرى تفسر الموصلات الفائقة بدرجة حرارة واطئة (low) منها نموذج المائعين، معادلة لندن، نظرية كنزبترك-لاندار خلال النصف الاول من القرن العشرين وبعد اكتشاف ظاهرة التوصيلية الفائقة فان مشكلة التقلبات المشوشة للانتقال الى التوصيلية الفائقة لم تاخذ بنظر الاعتبار في العينات فائقة التوصيل المحضرة بشكل كتل (Bulk)، حيث ان درجة الحرارة الحرجة تفصل بين الطور الفائق التوصيل والطور الطبيعي للمادة بصورة حاسمة. ومن الجدير بالذكر ان مثل هذا السلوك في الخصائص الفيزيائية للموصلات الفائقة يتفق تماما مع النظرية التي جاء

بها كل من (Ginzburg–Landau) في العام ١٩٥٠ والنظرية المجهرية التي جاء بها (BCS) في العام ١٩٥٧ اللتين توضحان ظاهرة التوصيلية الفائقة.

٢-١-٩ نموذج المائعين (The Two Fluids Model)

وضع انموذج المائعين من قبل العالمان كورتر وكاسيمير (Gorter&Casimir) في العام ١٩٣٤ للتعبير عن الخواص الثرموديناميكية للمواد الفائقة التوصيل. وطبقا لهذا الانموذج فان الألكترونات الموصلة في الموصلات الفائقة تصنف الى صنفين هما: الاول الألكترونات الفائقة والأخرى الألكترونات الطبيعية والتي تتصرف كجسيمات مشحونة تتدفق وتتحرك في وسط مائع، ولكن الألكترونات الفائقة تمتلك العديد من الخواص منها، انها لاتستطار، والانتروبي لها يساوي صفر، وان طول التشاكة بحدود (A^{10^4}) .

لقد وجد كل من كورتر وكاسيمير (Gorter&Casimir) المعادلة التجريبية لتركيز الألكترونات الفائقة والألكترونات الطبيعية التي تتغير مع درجة الحرارة والتي يعبر عنها في المعادلة الآتية:

$$n_s = n \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right] \dots \dots \dots (1 - 9)$$

حيث ان

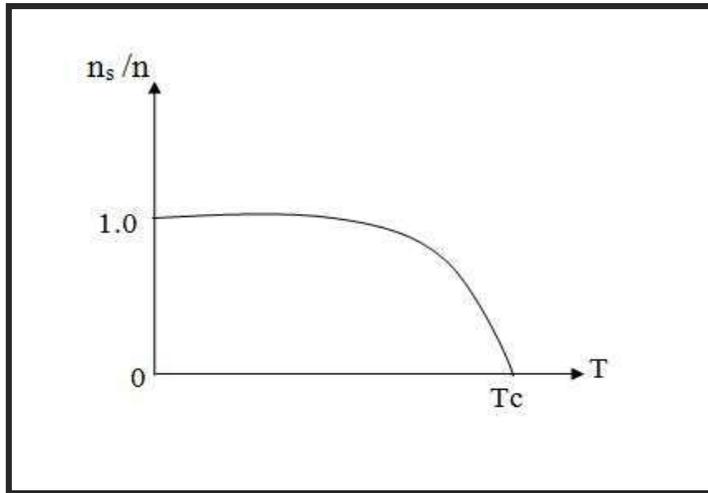
$$n_s = \text{عدد الالكترونيات في حالة الحرق}$$

$$n = \text{في حالة الصف}$$

$T =$ درجة حرارة الاولية

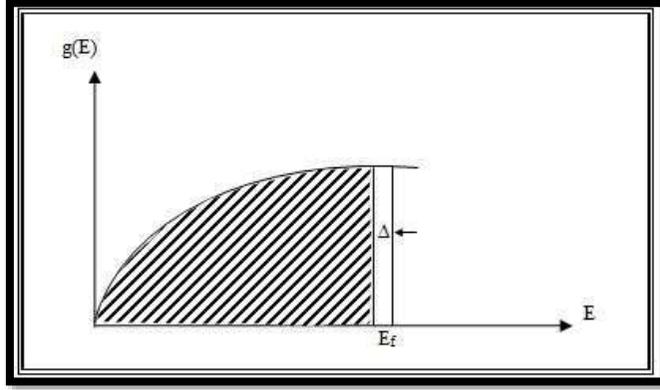
$T_c =$ درجة الحرارة الحرجة النهائية

والموضحة في الشكل (٩-١) حيث انه عند $(T=0K)$ كل الألكترونات هي الكترونات فائقة التوصيل، وان اي زيادة في درجة الحرارة فان الألكترونات الفائقة تنقص، وفي حالة ان $(T=T_c)$ فان كل الألكترونات تصبح في الحالة الطبيعية، وان هذا الانموذج ممكن ان يخضع بسهولة لمفهوم فجوة الطاقة.



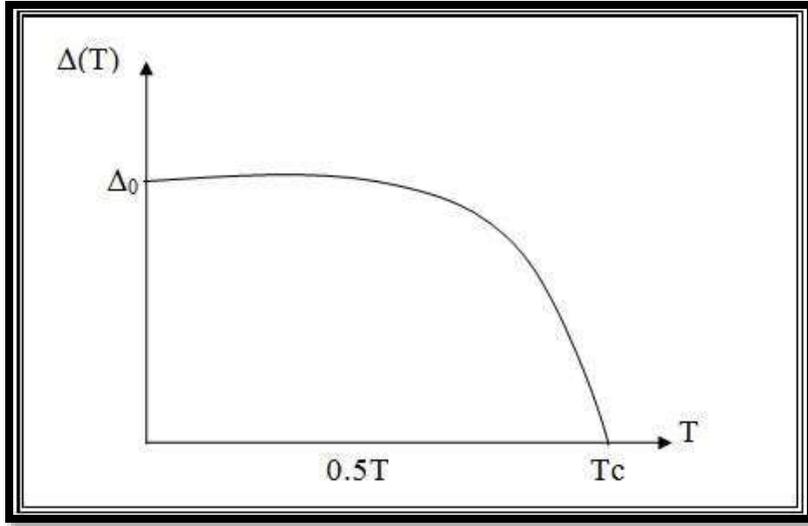
الشكل (٩-١) نسبة الألكترونات الفائقة (n_s/n) كدالة لدرجة الحرارة (T) .

حيث ان كل الألكترونات تحت الفجوة هي في الاساس مقيدة الحركة بوساطة وجود الفجوة والموضحة في الشكل (٢-٩).



الشكل (٢-٩) كثافة الحالة $g(E)$ كدالة لطاقة الفجوة الفائقة التوصيل عند مستوى طاقة فيرمي.

لهذا فان هذه الألكترونات الفائقة التي هي فوق الفجوة تمثل الألكترونات الطبيعية. ان فجوة الطاقة هذه تتناقص مع زيادة درجة الحرارة وتختفي كليا عندما تكون $(T=T_c)$ والموضحة في الشكل (٣-٩)، ولهذا عندما تصبح $(T \rightarrow T_c)$ فان الفجوة تختفي وكل الألكترونات تصبح في الحالة الطبيعية.



الشكل (٣-٩) نقصان فجوة الطاقة في التوصيل الفائق ($\Delta(T)$) مع درجة الحرارة (T).

٣-١-٩ نظرية (معادلة) لندن (London Equation):

ان الكترونات التوصيل في الحالة الطبيعية المعدن تخضع الى قانون اوم

(Ohm's Law) والذي يعبر عنه بصيغته الرياضية ($j = \sigma E$).

حيث ان $j =$ كثافة التيار

$$\sigma = \text{الموصلية}$$

$$E = \frac{v}{m} \text{ شدة المجال}$$

ووفقاً لهذا الوصف وتأثير مازنر Messener في الحالة فائقة التوصيل.

فانه يفترض في هذه الحالة ان كثافة التيار تتناسب طرديا مع متجه الجهد

(A) للمجال المغناطيسي الموقعي. حيث ان:

$$B = \nabla \times A \dots \dots \dots (٢ - ٩)$$

وان ثابت التناسب هو $(-1/\mu_0\lambda_L)$.

$$j = \left(-\frac{1}{\mu_0\lambda_L}\right)A \dots \dots \dots (3-9)$$

حيث λ_L هي ثابت الابعاد من الطول. وهذه هي معادلة لندن. وبأخذ (curl) لكلا الطرفين فاننا نحصل على ماياتي:

$$\nabla \times j = \left(-\frac{1}{\mu_0\lambda_L^2}\right)B \dots \dots \dots (4-9)$$

والان نستخدم معادلة ماكسويل وهي:

$$\nabla \times B = \mu_0 j \dots \dots \dots (5-9)$$

$$\nabla \times \nabla \times B = \mu_0 \nabla \times j \dots \dots \dots (6-9)$$

والان فان:

$$\nabla \times \nabla \times B = \text{grad div } B - \nabla^2 B \dots \dots \dots (7-9)$$

$$\nabla \times \nabla \times B = -\nabla^2 (\text{div } B = 0) \dots \dots \dots (8-9)$$

$$-\nabla^2 B = \mu_0 \nabla \times j \dots \dots \dots (9-9)$$

$$-\nabla^2 B = -\left[\frac{n_s e^2 \mu_0}{m^*}\right] B = -\frac{B}{\lambda^2} \dots \dots \dots (10-9)$$

$$\lambda^2 = \left(\frac{m^*}{n_s e^2 \mu_0}\right) \dots \dots \dots (11-9)$$

حيث ان (λ): هي عمق الاختراق للندن) وهذا المصطلح يرتبط مع مقدار العمق الذي سوف يخترقه المجال المغناطيسي لسطح الموصل الفائق)، ان جمع هذا التعريف مع صيغة كورنر وكاسيمير (GC) لكثافة الألكترونات الفائقة التوصيل له نتائج في اعتماد درجة الحرارة على عمق الاختراق.

$$\nabla \times j = \left(-\frac{1}{\mu_0 \lambda_L^2} \right) B \dots \dots \dots (12- 9)$$

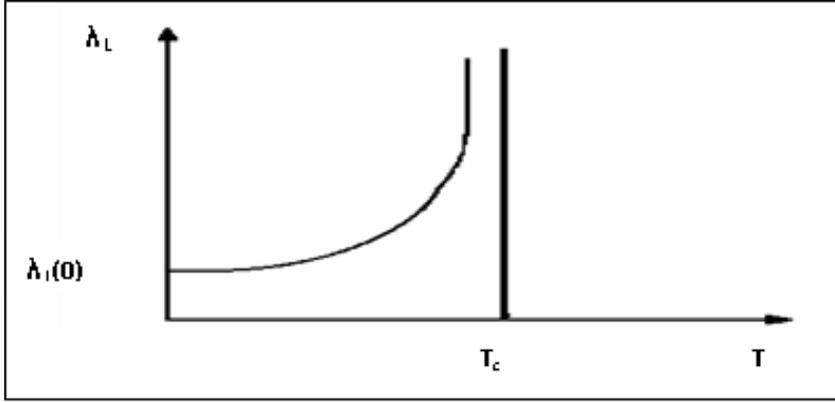
وبالرغم من ان المعادلة الاخيرة لا تمتلك تقسي ار او تبرير مجهري عند درجات الحرارة الواطئة فهي تأخذ الصيغة الاتية:

$$\lambda(T) \approx \lambda(0) \left[\left(1 + \frac{t^4}{2} \right) + 0(t^8) \right] \dots \dots \dots (13- 9)$$

والتي هي من المتعذر تميزها من السلوك الاسي (المتوقع من قبل نظرية) [٩٨].(BCS)

$$\lambda(T) = \lambda(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (14- 9)$$

حيث ($\lambda(0)$ هي عمق الاختراق عند درجة حرارة ($T=0K$)، والشكل (٣-٩) يبين تغير عمق الاختراق مع درجة الحرارة.



الشكل (٩-٤) يبين تغير عمق الاختراق (λ) مع درجة الحرارة (T).

٩-١-٤ نظرية كينزينبرك-لانداو (Ginzburg-Landau)

:(theory

لقد استعمل كل من كينزينبرك ولانداو النظرية الظاهرية لوصف الانتقال من الحالة الطبيعية الى الحالة فائقة التوصيل وعلى الاساس الترموديناميكي في التحول الطوري ذي المرتبة الثانية (Second order) phase transition. لقد قدمت هذه النظرية العامل (ψ) للالكترونات فائقة التوصيل (n_s) ككثافة موضعية للالكترونات فائقة التوصيل والمعطاة بالعلاقة ($n_s = |\psi|^2$) وطبقا للنظرية فان تغير الطاقة الحرة (F) ممكن ان يتوسع الى قوى المتسلسلة (ψ) ومن هذه النظرية فان عمق الاختراق المغناطيسي (λ) وطول التشاكة الفائق التوصيل (ξ) وهو المسافة العظمى بين الالكترونات ازواج كوبر ممكن ان يحسب من خلال العلاقات الاتية:

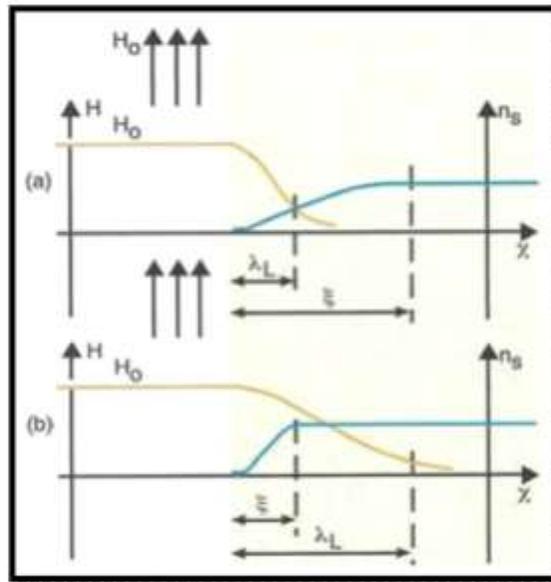
$$\xi^2(T) = \hbar^2 / \epsilon |\alpha| \dots \dots \dots (٩ - ١٥)$$

$$\lambda^2(T) = mc^2 / \epsilon n_s e^2 \dots \dots \dots (٩ - ١٦)$$

حيث $|\alpha|$ هي عامل متغير في التجربة يعتمد على التقلبات الترموديناميكية للطور فائق التوصيل، وكلا العاملين (λ ، ξ) يتباعدان نفسه بالقرب من $(T=T_c)$ ، وعندما تكون $(T \rightarrow T_c)$ فان النسبة بينهما تعطي عاملا ذا قيمة محددة يسمى بعامل كينزينبرك-لانداو (K) وهو الخاصية التي تميز بين انواع المواد فائقة التوصيل سواء كانت من النوع الاول او من النوع الثاني ويعطى بالعلاقة الاتية:

$$K = \lambda/\xi \dots \dots \dots (9 - 17)$$

والشكل (9-5) يبين ما سبق: العلاقة بين شدة المجال المغناطيسي كدالة لعدد الالكترونيات.



الشكل (9-5) شدة المجال المغناطيسي كدالة لعدد الألكترونات الفائقة التوصيل وكدالة

ايضا للمسافة عبر الحدود الفاصلة بين الحالة الطبيعية والحالة فائقة التوصيل.

(a) الموصل الفائق من النوع الاول.

(b) الموصل الفائق من النوع الثاني.

٩-٢ نظريات الموصلات الفائقة ذات درجة الحرارة العالية

Theory of High Temperature Superconductor (HTSC)

٩-٢-١ المقدمة Introduction

ان آلية الموصلات الفائقة ذات درجة الحرارة العالية (HTSC) هي من اكثر المشاكل صعوبة والعالقة في الفيزياء المعاصرة، حيث ان الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية والمعتمدة بصورة قوية جدا على وجود اوكسيد النحاس (Cuprates) اصبحت واحدة من اهم المواد دراسة في فيزياء الحالة الصلبة.

هناك نوعان من وجهات النظر حول آلية (HTSC) في بحوث الفيزياء الاكثر قبولا للمواد فائقة التوصيل (Cuprates)، احداها تعتقد عموما بان الاثار المغناطيسية تؤدي دوراً اساسيا في آلية الازدواج المجهرية، وذلك بسبب نمط الرنين المغناطيسي، بينما وجهة النظر الاخرى تقترض بان اهتزازات الشبكة تؤدي دور مهم في آلية الازدواج المجهرية، وذلك بسبب تأثير النظير في المواد فائقة التوصيل (Cuprates) وكذلك الملاحظات التجريبية على المستوى الذري.

ان الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية هي مركبات كيميائية تشتمل على انماط متكررة من الذرات لعناصر مختلفة، التي تسمى بوحدة الخلية (Unit cell) وعمليا فان استعمال الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية كان محدودا الى حد كبير في الكثير من التقنيات في تشكيل

الموصلات الفائقة ذات الخصائص الملائمة المستعملة في المنتجات الكهربائية والتطبيقات الإلكترونية. علما ان الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية تمتلك درجة حرارة حرجة اعلى من نقطة غليان النيتروجين السائل (77K)، وهي تتضمن تركيباً معقداً من العناصر تترتب بشكل منسق يسمى بالشبيكة البلورية. ان كل انواع الموصلات ذات درجة الحرارة العالية هي هشة (Brittle) وان الموصل الفائق ذو درجة الحرارة العالية ذو الصيغة التركيبية $(\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_7\text{Cu}_3\text{O}_{1+\delta})$ والذي يمتاز بدرجة الحرارة الحرجة العالية اصبح الهدف الاكبر منذ اكتشاف الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية، حيث انه في العام 1980 وجد موصل فائق جديد اتى بصورة جديدة تحتوي على المستوى (CuO_2) والتي كونت اصل التوصيلية الفائقة.

قام كل من (J.G.Bednorz & K.A.Muller) في العام 1986، باكتشاف التوصيلية الفائقة في المركب $(\text{La}_x\text{Ba}_{1-x}\text{CuO}_y)$ (LBCO) عند درجة حرارة حرجة تقريبا بعد ذلك بمدة قصيرة فان الكثير من الموصلات الفائقة ذات الاساس الاوكسيدي اكتشفت واصبحت اكثر اهمية من حيث درجة حرارتها الحرجة (T_c) وكثافة التيار الحرج (J_c) التي هي اكثر بكثير من السبائك مثل $(\text{NbTi} \& \text{Nb}_3\text{Sn})$. ان هذا المجال فتح عصراً جديداً في حقل الموصلات الفائقة عالية درجة الحرارة (HTSC) والتي كسرت حاجز درجة الحرارة الحرجة (30K) والمفترض بوساطة نظرية (BCS). (LBCO) والذي يعد العازل الوحيد في (HTSC) هو اول مركب ذو اساس اوكسيدي في المواد (HTSC) يمتلك $(T_c=30\text{K})$. ان البحث الآخر في (HTSC) توصل الى

ان المركب $(YBa_2Cu_3O_{7+\delta})$ له $(T_c=90K)$ ، وان للمركب $Tl_mBa_2Ca_n-$ والمركب $(Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta})$ $(T_c=110K)$ ، والمركب $(HgBa_2Ca_n-)$ وكذلك المركب (Cu_nO_{2n+m+2}) يمتلك $(T_c=120K)$ ، وكذلك المركب (Cu_nO_{2n+2+x}) له $(T_c=130K)$ في الضغط الطبيعي و $(160K)$ عند الضغط العالي.

كل اكاسيد (HTSC) تمتلك خواص رئيسة من الموصلات الفائقة التقليدية تتضمن ان المقاومة الكهربائية تساوي صفار وكذلك تأثير مازنر وتأثير جوزيفسون... الخ، اضافة الى ماسبق فان المواد (HTSC) تمتاز بالخصائص التالية:

١. كل الاكاسيد (HTSC) تمتلك تركيبا بلوريا طبقيًا يحتوي على شبكة ثنائية الابعاد من اوكسيد النحاس (Cu-O).
٢. ان تنسيق النحاس في المستويات (Cu-O) هو مستوي مربع.
٣. ان اواصر (Cu-O) هي عالية التساهمية وذات مسافة اصرة تقريبا $(1.9A^\circ)$
٤. التركيب الطبقي تكون متباينة الخواص بصورة كبيرة (Anisotropic).
٥. ان الخواص الانتقالية في الحالة الطبيعية تختلف بصورة ملحوظة عن تلك التي في المعادن الطبيعية، فضلا عن مقاومة نوعية متباينة الخواص بصورة كبيرة، ومقاومة مغناطيسية مختلفة، وفجوة طاقة كاذبة... الخ، ولهذا تسمى (HTSC) الموصلات الفائقة غير التقليدية.

٦. ربما السمة الأكثر اشارة في الحالة الطبيعية هي الفجوة الكاذبة (Pseudogap) في اطياف الاثارة للبرم والشحنة للمركبات ذات الاساس اوكسيد النحاس (Curates) المطعمة.

٧. ان التباين في الخواص يصبح كبيراً وواضحاً في الاختلاف في طول التشاكة على طول المحور بالاتجاه محور (c-axis) والاتجاهات العمودية عليه. ان تباين الخواص الكبرى لوحظ في الموصل الفائق (Bi-base) حيث ان طول التشاكة بحدود ($2A \approx$) على طول المحور (c-axis)، و ($4.0A \approx$) في الاتجاه المستعرض وقد وجد للمركب ($YBa_2Cu_3O_7$) انه يمتلك $\xi_c \approx 1.5A$, $\xi_{ab} \approx 4.0A$.

٨. في الموصلات التقليدية طول التشاكة بحدود ($10^{-4} \text{ cm} \approx \xi$). بينما في الموصلات الفائقة (HTSC) نرى انه اصغر الاف الم ارت ويساوي تقريبا ($10^{-4} A^\circ$)، وبالمقارنة مع حجم وحدة الخلية، نلاحظ ان طول المحور (c) مساو تقريبا الى المسافة بين الطبقات واقصر من طول وحدة الخلية المطابق.

٩. ان اعتماد درجة الحرارة الحرجة على تركيز حاملات الشحنة له خاصية غير مستقرة، حيث ان القيمة العظمى لدرجة الحرارة الحرجة التي تم الحصول عليها كانت عند كثافة حاملات شحنة صغيرة نسبياً تساوي تقريبا ($10^{21} \text{ cm}^{-3} \approx$).

١٠ . ان مقاييس فجوة الطاقة في طيف الجسيمة الواحدة للموصلات الفائقة الجديدة ممكن ان تقاس بوساطة الية الانفاق او الية امتصاص الاشعة تحت درجة الحرارة والطرائق الانعكاس تعطي قيم مختلفة. وفجوة الطاقة المقاسة بطريقة الانفاق هي الكبرى.

١١ . ان مقدار تأثير النظير في (HTSC) يكون اصغر بكثير من المتوقع بوساطة نظرية (BCS) المعتمدة على تفاعل الكترون- فونون.

١٢ . ان الحرارة النوعية لمركبات (HTSC) ممكن ان يعبر عنها بالعلاقة الاتية:

$$C = AT^{-2} + \gamma T + \beta T^3 \dots \dots \dots (١٧-٩)$$

١٣ . ان المسافة بين ازواج كوبر (طول التشاكة) في هذه الموصلات الفائقة ممكن ان تكون قصيرة بحدود مسافة ذرية واحدة اومسافتين ذريتين بين ($2.0 \text{ \AA} - 3$) والتي مقدارها اصغر عدة مرات من الموصلات التقليدية. ومن الجدير بالذكر ان قوة التنافر الكولومية (F) بين مثل هذه الشحنات تتناسب عكسيا مع مربع البعد ($F \propto 1/r^2$)، وكننتيجة فان قوة التنافر الكولومية سوف تهيمن عموما عند هذه المسافة مسببة تنافر الألكترونات بدلا من ازدواجها، ولهذا السبب فانه من المقبول على نحو واسع ان ازواج كوبر في هذه المواد ليس سببها هو اضطرابات الشبكة، ولكنها ترتبط مع نوع المغناطيسية (المعروف بالمضادة للفيرومغناطيسية) (Antiferromagnetism) الموجودة في طبقات اوكسيد النحاس.

١٤ . ولهذا فان (HTSC) لا يمكن توضيحها بوساطة نظرية (BCS)، لانها اساسا تتعامل مع اضطرابات الشبكة التي تعمل على الازدواج الألكتروني، وان البحوث ما زالت مستمرة لمعرفة الالية الفعلية المسؤولة عن التوصيلية الفائقة في هذه المواد.

١٥ . الميزة التركيبية الشائعة في المواد (HTSC) هي وجود على الاقل نوعين مختلفين من طبقات الشحنة، وهذا الشيء موجود في الموصلات الفائقة التي تعتمد في تركيبها على اوكسيد النحاس (Cuprates)، حيث ان الحالة فائقة التوصيل تتكون بوساطة استبدال ايون ذي تكافؤ مختلف في طبقات مختلفة، وكمثال هو استبدال الايون (Sr^{+2}) بدلا من (La^{+3}) في المركب (La_{2-x}) استبدال الايون ($Sr_xCuO_{4-\delta}$)، واستبدال (Ca^{+2}) بدلا من (Y^{+3}) في المركب ($Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$)، ومثال آخر للمركب ($(Pb_{.5}Cu_{.5})Sr_2(Y_{.7}Ca_{.3})Cu_2O_{7-\delta}$)

١ . آليات الازدواج في (HTSC). Mechanisms Of Pairing For (HTSC)

(HTSC)

لأيضاح مفهوم التوصيلية الفائقة، فان العديد من هذه النماذج والاليات قد اقترحت ان طبيعة آليات الازدواج لحاملات الشحنة هي مفتاح الاجابة للسؤال، وهناك العديد من النماذج المختلفة التي تناولت مفهوم التوصيلية الفائقة، ومن بينها: نموذج الاكسيتون (Exciton model)، انموذج الماكنون (Magnon Model)، انموذج اواصر التكافؤ

الرنينية (bonds Model of resonant valance)، وانموذج ثنائي الموجات المنفردة (Bisoliton Model)، وانموذج ثنائي القطب (Bipolaronic Model)، والانموذج اللاتوافقي (Anharmonic Model of local pairs)، وانموذج البلازمون (Plasmon Model)، وان تصنيف آليات الازدواج للموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية (HTSC) يوضح النمط الفيزيائي المتنوع للموصلات الفائقة (HTSC).

٢. الآليات النوعية للازدواج في التوصيلية الفائقة (Specific

(Mechanisms of Pairing in Superconductivity)

هنالك الكثير من النماذج والانماط المتعددة في الوقت الحاضر والتي تتفق مع الالية الاعتيادية لآلية (BCS) والمستندة على تفاعل (الكترن- فونون) والتي سوف تكون فيها وجهتنا بالاتجاه المغناطيسي والمتمثلة بالنماذج مثل: الاكسيتون، والبلازمون، وانموذج ثنائي القطب. وكل هذه النماذج والانماط طبقت مفهوم الازدواج مع التشكيل المتبوع (بتكاثف- بوز) (Bose-Condensate) التي تحدث عند درجات حرارة حرجة معينة وبغض النظر عن اسباب الجاذبية.

ان نظرية (BCS) قدمت صيغة رياضية لقيمة درجة الحرارة

الحرجة (T_c) في حالة تفاعل (الكترن- فونون) الضعيف وهي:

$$T_c = 1.14 \pi e^{-\left(\frac{1}{N^0 V}\right)} \dots \dots \dots (18 - 9)$$

حيث ان $(\Theta = \hbar\Omega_D/k_B)$ ، وان $(\hbar\Omega_D)$ هي طاقة ديبياي، و N_0 هي كثافة الحالات لمستوى فيرمي، و V هو جهد الازدواج التجاذبي الذي يعمل بين الألكترونات. ان القيمة القصوى لدرجة الحرارة الحرجة التي تعطى بواسطة نظرية (BCS) هي $(4.0K)$. لذلك نشأ السؤال حول آليات اخرى للازدواج حيث ان التفاعل بين الألكترونات هو تنافر تام، وبمعنى اخر نحن نحتاج الى احد انظمة النقل (Transfer System) في المعادن التي تكون متميزة من نظام الفونون. ان المخطط العام لتفاعل الالكترون يتم بواسطة نظام الانتقال (X) والذي نستطيع تقديمه بالشكل الاتي:



حيث ان e_1 هو اي الكترون زخمه X_1 ، p هو الحالة الارضية، و X^* هو الحالة المثارة لنظام الانتقال، وان الناتج من هذا التفاعل هو ان النظام يعود الى الحالة الابتدائية وان الألكترونات تعمل تبادلا في الزخم.

ان من الملاحظ انه في مثل هكذا تفاعل فانه يؤدي الى حالة من التجاذب وان درجة الحرارة الحرجة ممكن ان تعطى بالصيغة الاتية:

$$T_c \cong \Delta E e^{-\frac{1}{\lambda}} \dots \dots \dots (21-9)$$

حيث ان ΔE هي فرق الطاقات بين الحالات X ، X^* ، و λ تعتمد على تفاعل الألكترونات مع النظام X .

٣. آلية الازدواج المغناطيسية Magnetic Mechanism of

Pairing

ان آليات الازدواج المغناطيسية في الموصلات الفائقة عالية درجة الحرارة (HTSC) قد درست من قبل العديد من الباحثين، وان هذه الدراسات استعملت الفرضية التي فحواها ان عملية الازدواج تعزى الى حالة التبادل التي تحصل بوساطة الاكسيتونات والماكونونات (Excitations&Magnons)، وبمعنى آخر ان نظام النقل هنا هو المبدأ، فان آليات التوصيلية الفائقة ممكن ان تتجه نحو تفاعل الألكترونات المقيدة مع الكترونات التوصيل. ان انموذج الاكسيتون الاول هو الازدواج الذي يعزى الى اثاره الالكترون، والذي اقترح من قبل لتل (Little) للموصلات فائقة التوصيل العضوية ومن قبل كينزبيرك وكيرزهايتز (Ginzburg&Kirzhnitz) للنظام الطبقي. ان في بناء هذا الانموذج كان من الضروري فيه افتراض وجود مجموعتين من الألكترونات، واحدة منها تتعلق بحزمة التوصيل، حيث ان الازدواج فائق التوصيل يحدث بسبب التبادل بوساطة الاكسيتونات التي تثار في المجموعة الثانية والتي هي غالبا ما تكون الكترونات موقعية. ونظرا للعديد من مميزات الحزمة لطيف الالكترون والتركيب الطبقي وخصائص اخرى للالكترون الفرعي في الموصلات الفائقة (HTSC) فان مثل هذا التوزيع لحالات الالكترون محتملة جدا. وهذا يشكل اساسا في تطوير اليات الاكسيتون. ان البحوث في التوصيلية الفائقة في المواد العضوية حفزت لدرجة مميزة بوساطة فكرة بسيطة حول امكانية حدوث التوصيلية الفائقة في (HTSC) ويعزى الى آلية الاثارة

لازدواج كوبر للألكترونات على طول سلاسل التوصيل الطويلة للبوليمر والتي تحتوي على فروع جزيئية جانبية مستقطبة. حيث ان الكتلة (M) لمثل اثارات الاكسيتون هذه تكون صغيرة، والتي سيتوقع ملاحظتها في القيم العليا لدرجات الحرارة الحرجة ($T_c \sim M^{-1/2}$).

ولكن هذا النموذج لم يحقق عمليا، حيث ان اثار الاكسيتونات بين الجزيئات ذات الطاقة العالية لا تستطيع ضمان ارتباط الألكترونات كازواج، وفي الوقت الحاضر حضرت العديد من الموصلات الفائقة العضوية ذات البعد شبه الاحادي مع موصلات معدنية. والذين عبروا حالة فائقة التوصيل عند ($T=10\text{K}$)، وانها تشمل بلورات تشبه الموصلات الفائقة العضوية، وكقاعدة، فان حزم من الجزيئات المستوية تتجمع بشكل شبه متعرج لتشكيل السلاسل، ان التداخل الجيد لدوال موجة الالكترن للجزيئات المجاورة كتجمعات متكسدة يضمن التوصيل المعدني على طول السلسلة، علما ان تداخل دوال موجة الالكترن للسلاسل المجاورة يعد امرا صغير، وهذا يؤدي الى ميزة مجموعة او نظام من البروم المغناطيسية التي تحدث في المعدن. ان الماكنون وهو شبه جسيم (Quasi-Particle) والذي ي ارفد كميا موجة البرم للحالة المثارة في نظام مرتب مغناطيسيا. وباعتبار ان التفاعل بين الكترونات التوصيل سببه هو التبادل بين الفونونات الصوتية والتفاعل الاضافي المتعلق بالتبادل بوساطة موجات البرم (الماكنون)، فلقد لوحظ ان التوصيلية الفائقة والفيرومغناطيسية ممكن ان تتواجدا في المنطقة المكانية نفسها. وفي الت اركيز المنخفضة بما فيه الكفاية من المكونات

الفيرومغناطيسية فان اي زيادة في تركيزها يؤدي الى زيادة درجة الحرارة الحرجة في حالة الازدواج. وضمن آلية الفونون فان الازدواج يحصل في الحالة المفردة، ثم بعد ذلك اي زيادة تطأ في تركيز المكونات الفيرومغناطيسية ينتج عنه نقصان في درجة الحرارة الحرجة. ان نموذج اندرسن (Anderson Model) المستند على مفهوم الانتظام المغناطيسي والذي يسمى بانموذج اواصر التكافؤ الرنينية ((Resonance Valance Bond (RVB) يتضمن ارتباط الحاملات كازواج بالبرم المعوض والمسمى (بالبرومات) (Spinons). وفي عمليات التطعيم في مركبات (HTSC) فانه من الممكن ان تنشأ الفجوات التي يمكن ان تشكل تعقيدات في برمها. ان التوصيلية الفائقة موضحة بوساطة ازدواج الفجوات وبمعنى اخر تتم بوساطة خلق بوزونات عديمة البرم ذات شحنة مضاعفة، ذلك ان ازدواج الحاملات في نموذج (RVB) يعزى الى التبادل بوساطة الماكونات عند درجات الحرارة المنخفضة، لذلك فان صيغ ازدواج الهولونات (الفجوات) الفائقة التوصيل تكون محكومة.

ان موديل (RVB) يؤدي دوار ايجابيا، بوساطة جذب انتباه الباحثين لدراسة المواد ضد الفيرومغناطيسية (Antiferromagnetism) في الموصلات الفائقة (HTSC) مع العلم ان (Spinons) و (holons) لم تميزا بصورة تجريبية.

٤. آلية الاكسيتون للازدواج (Exciton Mechanisms of Pairing)

طبقا للمبدأ العام المتعلق بنظام النقل (Transfer System) في الموصلات الفائقة، فاننا يجب ان ندرك بان لا نتقيد بتفاعل الكترون- فونون، لان هناك بعض التفاعلات الاخرى التي تضمن عملية الازدواج للالكترونات ممكن ان تكون مناسبة. ومن حيث شبه احادية البعد لطيف الالكترون وتباين قوي في الخواص الألكترونية للبلورة، ولحد الان لا توجد براهين تجريبية لتوضيح آلية الاكسيتون وان مثل هذه الأنظمة ممكنة.

٥. آلية البلازمون للازدواج (Plasmon Mechanism Of Pairing)

تحاول هذه الآلية توضيح التوصيلية الفائقة (HTSC) المستندة على اساس ان فكرة الازدواج هي نتيجة للتبادل بوساطة كمات موجات البلازما الطولية (البلازمون (Plasmon))، ان موجات البلازما الطولية تتشكل في المواد الصلبة في منطقة الترددات عندما تكون النفاذية العزلية الكهربائية للوسط تساوي صفرا. ان خاصية التردد لموجات البلازما في البلورة ثلاثية الابعاد تعرف بوساطة الصيغة الآتية:

$$\tilde{\omega}_p = \frac{\epsilon \pi e^2 N}{m} \dots \dots \dots (٢٢ - ٩)$$

حيث N هي تركيز الألكترونات، و e هي شحنة الالكترون، و m هي كتلة الالكترون. وانه عند كثافة الكترون ($N \approx (1 - 3) \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$)، وتردد البلازما ($\tilde{\omega} \approx 10.16 - 51.01$) يفترض بان التبادل بوساطة البلازمونات بدلا من الفونونات سيؤدي الى زيادة في العامل قبل الاسي في الصيغة المستنتجة من نظرية (BCS) وهي:

$$T_c = \Theta e^{\left(\frac{1}{\lambda - \mu^*}\right)} \dots \dots \dots (23- 9)$$

حيث $(\Theta = \hbar \tilde{\omega}_p / K_B)$ ، على أي حال أن مثل هذه الزيادة لا تسبب أي نمو في (T_c) ، لأن البلازمونات عند التردد $(\tilde{\omega}_p)$ والذي هو قريب من التردد للإلكترونات (E_F / \hbar) ، لا تستطيع أن تسبب الأزواج فائق التوصيل وأدوارها تعد مهمة فقط للخواص العزلية للبلورة.

٦. آلية ثنائي القطب في التوصيلية الفائقة

(Bipolaronic Mechanism Of Supercovductivity)

تعد آلية ثنائي القطب واحدة من المحاولات لتوضيح ظاهرة التوصيلية الفائقة للموصلات ذات درجات الحرارة العالية (HTSC) التي تسمى نظرية ثنائي القطب (Bipolaronic Theory). ثنائيات القطب هذه هي عبارة عن جسيمات بوز والتيتشبه أزواج كوبر الاعتيادية، في نظرية ثنائيات القطب، التوصيلية الفائقة ناتجة عنالسيولة الفائقة لتكاثف البوزونات في ثنائي القطب، أن الأفكار للأقطاب المنفردة وثنائيات الأقطاب التي استعملت من قبل (Aleksandrov & Ranninger) لتوضيح التوصيلية الفائقة في المواد عالية درجات الحرارة (HTSC) هي أن فكرة القطبية مستندة على الفرضية أن آلية التموضع للألكترون في البلورة الأيونية سببه هو تفاعله مع الاهزازات البصرية الطولية تحت الاستقطاب الموضعي والذي سببه الألكترون بنفسه.. وهنا يكون الألكترون محصور في الاستقطاب الموضعي المحتث من قبل جدار الجهد والذي يحفظه في مجاله المحدد، أن الفكرة في آلية تموضع

الألكترونات في البلورات الأيونية طورت بشكل دقيق من قبل (Pekar). حيث ان كفاءة التفاعل لاي الكترون هو ذو الكتلة (m) والشحنة (e) مع موجات الاهت از ازت الطولية وبتردد (w) في وسط ما هو مميز بوساطة عامل عديم الابعاد من دون وحدات هو:

$$g = \frac{e^2}{\epsilon} \sqrt{\frac{m}{2w\hbar^2}} \dots \dots \dots (24- 9)$$

حيث ϵ هو ثابت العزل الكهربائي او نفاذية الوسط العازل، ويكون التفاعل صغيراً اذا كانت ($g < 1$)، ويكون سببه هو التردد (w) الكبير و تشوه المجال السريع للنظام، لذلك فانه يمتلك الوقت الكافي لتتبع حركة الالكترتون. ويرافق هذا الحقل حركة من الألكترونات في حيز يشكل غيمة ضعيفة من الفونونات. ان طاقة تفاعل المجال والالكترتون تتناسب مع الدرجة الاولى من (g). وفي نظرية (BCS) فان ازدواج الكترونات التوصيل يحدث بسبب التفاعل مع الفونونات الصوتية وهي مميزة بثابت التفاعل عديم الابعاد (من دون وحدات):

$$\lambda = (E_F) \dots \dots \dots (25 - 9)$$

حيث $N(E_F)$ هي كثافة حالات الطاقة للالكترتون على سطح فيرمي. والكمية (V) تتناسب عكسيا مع معامل المرونة للبلورة. وفي انموذج ثنائي القطب. نمتلك العامل كما في الصيغة الاتية:

$$\lambda^* = \frac{2\lambda^2 \hbar w z - V_c}{D} \dots \dots \dots (26- 9)$$

حيث ان λ معرفة من العلاقة السابقة، z عدد الجوار الاقرب، D هو عرض حزمة التوصيل للجسيمات شبه الحرة، ثنائي القطب يشبه زوج كوبر وهو يمتلك شحنة $(2e)$ ، وان الكتلة الفعالة تحدد بواسطة العلاقة التالية:

$$\hat{m} = m \frac{\Delta}{D} e^{(\lambda^2)} \dots \dots \dots (27 - 6)$$

ان الكتلة الفعالة \hat{m} ممكن ان تكون عالية جدا وممكن ان تتجاوز كتلة الجسيم شبه الحر في حزمة التوصيل بعدة مراتب، ولحساب درجة الحرارة الحرجة فائقة التوصيل طبقا الى تكثيف بوز، فان اغلب الباحثين يطبقون لغاز بوز المثالي الصيغة التالية:

$$K_B T_c = \frac{3.31 \hbar^2 N^{2/3}}{\hat{m}} \dots \dots \dots (28 - 9)$$

عند $(\hat{m}=1.00 \& N=1.021 \text{ cm}^{-3})$ ، ومن المعادلة الاخيرة نحصل على $T_c \sim 28 \text{ K}$.

٧. تفاعلات الشبكة- الكترون (Electron-Lattice Interactions)

يعتقد وبشكل واسع ان نظرية (BCS) الكلاسيكية في التوصيلية الفائقة لا تستطيع توضيح آليات (HTSC) ووصف تأثي ارتها، وللموصلات الفائقة التقليدية، فان طيف التنفق (Tunneling)، اسس بان عملية الازدواج هي عملية وسطية تحدث بواسطة انماط البوزونات (الفونونات)، حيث ان ذروة المشتقة الثانية لتيار التنفق (d^2I/d^2V) تقابل كل نمط فونون. وللموصلات الفائقة (HTSC) فانه لا يوجد بوزون مميز يتوسط الازدواج الكتروني، وهناك

تفسير واحد يستطيع تشكيل ازدواج الالكترن ويرتبط بتفاعل الكترن- بوزون هو عدم التجانس عند المدى الذري.

و في اغسطس عام(٢٠٠١)، قام فريق من الفيزيائيين باستعمال مطيافية الانبعاث الضوئي المحلل للزاوية (Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy) لتحسس تحركية الالكترن، والسرعة ومدى الاستطارة لثلاثة انظمة مختلفة من الموصلات الفائقة (Cuprates)، ولقد اروا انه في كل هذه المواد هناك تغير مفاجئ في طاقة الالكترن من (50 meV) الى (80 meV)، والتي لايمكن ان توضح بوساطة اي من المعالجات المعروفة ماعدا تلك التي تستند الى الازدواج مع الفونونات المرتبطة بحركة ذرات الاوكسجين، وهذا يوحي الى ان ازدواج الكترن- فونون له تأثير قوي على تحركية الالكترن في (HTSC) ولذلك يجب ان تتضمن في اي نظرية مجهرية للتوصيلية الفائقة.

٨. نظرية التيارات الدوارة (Circulating Currents Theory)

في عام(١٩٨٩) قام العالم (Varma) بالتسجيل مختبريا الفكرة الجذرية للتوصيلية الفائقة المرتبطة بحامض الكربوليك- مينا والتي تحدث في مواد معينة بسبب التقلبات الكمية في هذه المواد التي تزداد بنقصان درجة الحرارة.

وفي عام(١٩٩٦)، قام (Varma) بتوضيح اكثر لطبيعة هذه التقلبات في نظريته للمواد فائقة التوصيل (Cuprates)، ان التوصيلية الفائقة ترتبط مع تشكيل حالة جديدة من المادة والتي يدور بها التيار الكهربائي وبشكل حلقات أنيا، حيث يدور من ذرات النحاس الى ذرات الاوكسجين ثم يعود الى

ذرات النحاس. وقد استنتجت نظريته ان التقلبات الآلية الكمية هي اساسا تقلبات في حلقات التيار هذه. واقترح (Varam) ان هناك طورين من التيارات الدوارة المحتملة تحافظ على التماثل الانتقالي للشبيكة والذين يقابلون $2\text{ or }4$ من حلقات التيار لكل وحدة خلية والمشار لها بالطور الاول (10) والطور الثاني (20) على التوالي، وفي عام (2002) بينت قياسات مطياف الانبعاث الضوئي المحلل للزوايا طوار منفردا للنظام $(\text{Bi}_x\text{Sr}_y\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta})$ والمتوافق مع الطور (20).

٩. نظرية برم الإلكترون (Electron Spin Theory)

في عام (2005)، ظهر منهج جديد في التحري عن اصل العديد من تفاعلات الاجسام في الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية (HTSC) والمعتمدة على وجود اوكسيد النحاس في تركيبها (Cuprates) والذي اقترح: تأثير استبدال الشوائب على تحركات الطاقة الواطئة التي تقابل مغناطيسيا تأثير النظر المستعمل في الموصلات الفائقة الاعتيادية.

١٠. نموذج تقلبات النوم (Spin Fluctuations Model)

من الممكن في الوسط المغناطيسي ان يستطار النظام بوساطة الألكترونات الحرة، التي تبعث موجة برم. وعند درجات حرارية اوطأ من درجات حرارة الانتقال الحرجة، تكون الأنظمة مرتبة مغناطيسيا. وفي معدن كثيف الفيرميون من الممكن ان تنتج التوصيلية الفائقة من خلال تبادل تقلبات البرم الضديدة فيرومغناطيسية. ان الألكترونات المستطارة من هذه التقلبات سوف تؤدي الى تغيير الميل لتكوين الأزواج. وهذا التغيير يفترض ان يكون ضاراً، لان

الالكترون المبروم الى الاعلى سوف يجذب الكترونات اخرى ذات برم الى الاعلى مكونة منطقة فيرومغناطيسية موضعية ومقاومة برم الالكترون الى الاسفل والمطلوب لازدواج النحاس. ان التقلبات البرمية للضديدة فيرومغناطيسية تكون حالات اكثر تعقيدا، لانها غير واضحة سواء كان برم الالكترون للاعلى والذي سوف يخلق او يحطم الاستقطاب الموضعي الضديد فيرومغناطيسي، او سيجذب او يقاوم الكترونات اخرى ذات البرم المعاكس. افترض شريف و اخرون، فكرة ان الناقلات الحرة في المادة التي تتطلب ضديدة فيرومغناطيسية متعادلة سوف تضعف الميل للترتيب. ولهذا فان برم الالكترون الى الاعلى سيقاوم ترتيب البرم الموضعي. اما النواقل الحرة الأخرى التي تكون بأي اتجاه برم آخر فانها سوف تتجذب الى منطقة البرم المستنزفة مكونة تفاعل تجاذب كلي.

١١ . نموذج تماثل الازدواج (Pairing Symmetry)

ان نموذج ازواج كوبر في نظرية (BCS) من الممكن ان تشكل دالة موجة منفردة. ان حل هذه الدالة الموجية يعطي مجالا كرويا من الاحتمالية، مشيرة الى مخطط موقع الكترون ثاني، مع الاحتفاظ بالالكترون الاول في المركز، وعلى حد سواء ممكن ان يكون في اي موضع ضمن المجال الكروي المحيط بالالكترون الاول. وهذا يسمى بتماثل الموجة (S) كما في الشكل (٢٣-٢)، والذي تظهره نظرية (BCS) المتضمنة زوج كوبر. اما النوع الآخر من التماثل فهو الذي يدعى عادة بتماثل الموجة (d)، حيث قام العلماء بتحضير ثلاث عينات واحدة هي (Bi-٢٢١٢)(Bi_٧Sr_٧CaCu_٧O_{٨+δ})

نقية والاثنتان المتبقيتان تكون احدهما استبدل الزنك (Zn) والآخرى استبدل النيكل (Ni)، حيث يتوقع ان الاستبدال مثل هكذا نوع من الشوائب حتى ولو بكميات صغيرة سوف تقوم بعمل تأثير مميز على البيئة المغناطيسية للمستوى (CuO)، بينما لاينتج اي تغير في اهت ازز الشبيكة، وان حالات البرم المختلفة لوحظت وبشكل مميز في النحاس (Cu).

لقد كشفت نتائج (ARPS) ان التغي ارت الناجمة عن الشوائب في الطاقة الذاتية للالكترتون بينت تطابقا جيدا لتلك التي ظهرت في الاثار المغناطيسية، والتي تشير الى اهمية تقلبات البرم لازدواج الالكترتون في (HTSC).

١٢ . نموذج ازدواج الطبقات البينية (Interlayer Coupling)

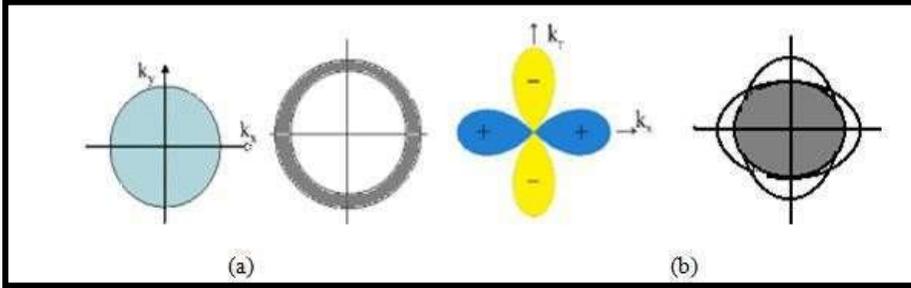
(Model)

ان الطبيعة المعدنية لطبقات (Bi-O) ممكن ان تكون مهمة جدا في تحقيق درجات حرارة الانتقال العالية، وتلك الطبقات في $(Bi_7Sr_2Ca_2Cu_2O_{1+\delta})$ ترتبط مباشرة بحساب الفجوات في طبقات (Cu-O)، حيث تكون كنتيجة لانتقال الشحنة من واحد الى الآخر، والاول يعزز ازدواج الطبقات البيني، بينما يمثل الاخير عاملا مهما لقوة ارتباط الالكترتون.

وللتاكيد على تأثيرات الازدواج بين الطبقات فان طول التشاكة (ζ) هو اقصر من المسافة بين مستويين من (Cu-O) $(d_{Cu-Cu} = 1.2, 1.4 \text{ \AA})$ ، وان (ζ) هو مشابه الى المسافة $(d_{Cu-M} = 1.4, 1.4 \text{ \AA})$ من المستوي (Bi-O)، لذا فانه من الممكن ان تتدفق تيارت فائقة بين طبقات (Cu-O) عن طريق

الاستفادة من الحالات المعدنية على الطبقات الفاصلة، و التي تتم اساسا من طبقة (Cu-O) الى طبقة (Cu-O) بواسطة حفر نفق (Tunneling) من خلال الطبقات البينية المعدنية.

والذي نص بالاساس على ان الالكترون ممكن ان يتحرك فقط بالاتجاه (45°) على طول اقطار المستوي. كما هو موضح بالشكل (٩-٦). وهذا سيسمح لالكتروني الزوج بالابتعاد عن بعضهما، الامر الذي يؤدي الى اضعاف التنافر بين الالكترونيين بسبب زيادة البعد الخطي فيما بينهما، مع السماح لهما بالبقاء كزوج واحد.



الشكل (٩-٦) يمثل فجوة الطاقة لتمائل الازدواج المحتملين (S-wave) والتمثلة بالشكل (a) و (d-wave) والتمثلة بالشكل (b)، ان تمائل (S-wave) له قيمة فجوة ذات صفات موحدة الاتجاه التي تساوي (Δ ٢)، بينما في تمائل (d-wave) تضمحل الفجوة وتغير عند ($k_x = \pm k_y$).

١٣ . انموذج غودارد (Goddard's Model)

في عام (١٩٨٨)، قام وليم غودارد واخرون، باقتراح انموذج جديد في التوصيلية الفائقة المعتمدة على حركة الالكترون خلال مكونات اوكسيد النحاس في المركبات الجديدة، وطبقا لهذا الانموذج، عندما تصبح المادة فائقة

التوصيل فان الكترونات قليلة سوف تزاح من ذرات الاوكسجين والتي تؤدي الى تمغنط الذرات. اذ تنسحب ذراتالنحاس المجاورة الى خط واحد بوساطة التمغنط وتخسر الكترونات الى رزم كمية او مولدة فجوات ناشئة من ذرات الاوكسجين الم ازحة، هذه العملية تخلق فجوات جديدة، وان الألكترونات سوف تستمر بالتدفق خلال المادة الى اجل غير مسمى طالما يتم المحافظة على درجة الحرارة الانتقالية.

ان هذا النموذج اثبت دقته، وتنبأ بدرجة حرارة انتقالية لمجموعة اوكسيد النحاس (Cuprates) للموصلات الفائقة بحدود. من الممكن تبريد المادة الى هذه الدرجة من الحرارة بوساطة الثلج الجاف (ثاني اوكسيد الكربون المجمد). وخاصة في المصانع الألكترونية حيث تستعمل الموصلات الفائقة بشكل واسع في الاجهزة الطبية والعلمية، وعلى اية حال ما لم يكن التوصيل الفائق للمادة في درجة حرارة الغرفة متوف ار فان استعمال الموصلات الفائقة في القطارات الطافية مغناطيسيا، فضلا عن خطوط الطاقة و مجالات خزن الطاقة سوف تكون مكلفة جدا.

١٤ . انموذج نقص الاوكسجين (Oxygen Defect Model)

يعتمد هذا الانموذج على حقيقة التحليل الهيكلية لتركيب وحدة الخلية والذي يظهر وجود فراغات (Vacancies) الاوكسجين في طبقات اوكسيد النحاس مقترحا تركيبا خاصا لنقص الاوكسجين سوف يترافق مع امتلاءات الكترونية لازواج كوبر وتشترك بشكل خاص في تعزيز تفاعل الازدواج وبشكل مميز وملحوظ في المواد (HTSC) ان الفراغات من المفترض ان يكون توزيعها

بشكل عشوائي في مستويات اوكسيد النحاس. كل الكترون سوف يجذب الألكترونات وبشكل نشيط جدا الى ازواج من ايونات النحاس التي تلي الفراغات. ان الألكترونات في هذه المواقع تمتلك احتمالا معزاز في ان توجد بين ايونين مع ارتباط برم منفرد. بالمثل فان هناك العديد من الظواهر التجريبية تتضمن سلوكا مشابها لبرم الزجاج (Spin glass) والذي يؤكد اعتماد الخواص فائقة التوصيل على محتوى الاوكسجين في الاوكسيد، وهذا يؤدي الى تقصير عمر البوزترون في الموصلات الفائقة.

١٥ . نموذج البعد الواحد (One Dimensional Model)

يقدم لنا هذا النموذج مفهوم، ان التوصيلية الفائقة من دون ان ناخذ بنظر الاعتبار تأثيرات الفونون ممكن ان تكون وسيلة للوصول الى درجة حرارة انتقال حرجة عالية (T_c -High). حيث اقترح العالم (Little) في هذا النموذج ان التوصيلية الفائقة ذات درجات الحرارة الحرجة العالية ممكن الحصول عليها بوساطة آلية جذب لا تعتمد في عملها على تأثيرات الفونون. فاذا رأينا ان الكترونات التوصيل تتحرك على طول المحور الاساسي لسلسلة بوليمرية التي تتفرع منها افرع جانبية تتحرك فيها الألكترونات بصورة تذبذبية، فان ميزة هذا النموذج هو وجود مجموعتين من الألكترونات احدهما هي الكترونات التوصيل (e_1) والتي سوف تكون خاضعة لقوة كولوم الاعتيادية وهي التي تحفز حركة الألكترونات في الافرع الجانبية وهذا بدوره يؤثر على حالة الكترونات التوصيل الأخرى (e_2)، ان هذه الصورة مشابهة تماما للحالة

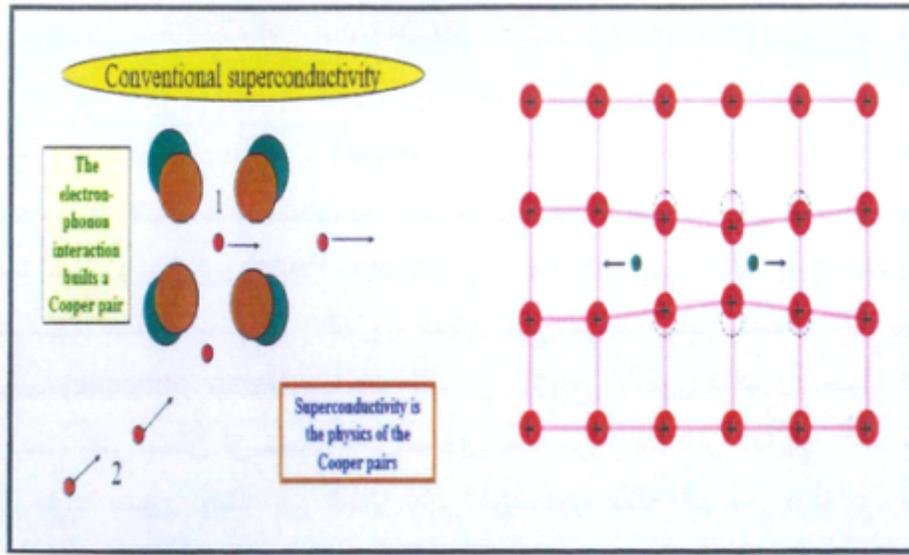
الملاحظة في الموصلات الفائقة المعتادة حيث ان الكترونات الجانب في هذه الحالة تؤدي دور مهما في التأثير بايونات الشبكة. والتي تشكل النظام المساعد الذي يؤدي الى نشوء الازدواج في الكترونات التوصيل وفي هذه الحالة فان حالة التوصيلية الفائقة تنشأ وتتطور في المحور الاساسي.

٩-٣ نظرية BCS Theory

خلال عام ١٩٥٧ تم وضع نظرية لتفسير ظاهرة التوصيلية الفائقة من قبل العلماء باردين (Barden) وكوبر (L.Cooper) وشيريفر (J.Chrieffer) والمسماة بنظرية (BCS) نسبة الى الحروق الاولى من اسماءهم

ان فهم ظاهرة التوصيلية الفائقة اصبحت واضحة من خلال النظرية التي تقدم بها كل من الفيزائيين الامريكيين والتي سميت بأسمهم نظرية (BCS) وضحت التوصيلية الفائقة في درجات حرارة قريبة من درجة حرارة الصفر المطلق، وكذلك اوضحت التوصيلية الفائقة التقليدية والتي هي قدرة معادن معينة على توصيل الكهرباء عند درجات حرارة واطئة من دون اي مقاومة كهربائية بافتراض ان الألكترونات التي لها زخم وبرم معاكس، ممكن ان تزوج مكونة ازواجا تسمى ازواج كوبر (Cooper Pairs) وتلك الازواج من الألكترونات سلوكا مختلفا تماما عن الألكترون المنفرد وهي فيرمونات تخضع لمبدأ باولي للاستبعاد Pauli exclusion (principle)، ان الازواج الألكترونية تعمل بصورة اكثر كبيوزونات وتتجمع

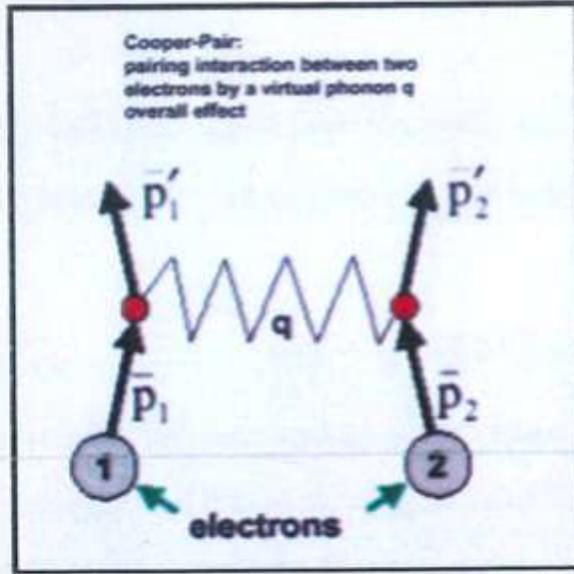
عند المستوى نفسه من الطاقة. ان الأزواج الألكترونية تمتلك تقريباً مستوى واطناً من الطاقة تاركه فجوة طاقة اقل من طاقة اي منهم وبحدود (1 meV) وتمنع تفاعلات التصادم التي تسبب المقاومة الكهربائية العادية عند درجات الحرارة التي تكون فيها الطاقة الحرارية اقل من فجوة النطاق فان المادة تظهر مقاومة كهربائية التي تساوي صفراً. لقد ادرك كوبر ان اهتزازات الشبكة هي المسؤولة بصورة مباشرة عن كامل التيار، وهي التي تجبر الألكترونات للازدواج كفريق يمكنه ان يتجاوز كل العقبات التي تسبب المقاومة في الموصل. التشكيلات من الألكترونات تسمى أزواج كوبر (Cooper Pairs). من جهة اخرى خمن كوبر وزملاءه بان الألكترونات في الحالة الطبيعية للمادة التي عادة ما يتنافر احدها مع الآخر فيظهر عليها تجاذب شديد. اما في حالة الموصلات الفائقة. ووجدوا ان حل هذه المشكلة يكمن في الفونونات، التي هي عبارة عن رزم من الموجات الصوتية تحدث بشكل اهتزازات في الشبكة البلورية، وعلى الرغم من ان هذه الاهتزازات الشبكية لا يمكن سماعها الى ان دورها كوسيط مهم جداً ولا يمكن الاستغناء عنه. وطبقاً لهذه النظرية فان حركة الألكترونات كشحنة سالبة في الشبكة تكون بوساطة الاليونات الموجبة في المواد فائقة التوصيل، وبالنتيجة فان الشبكة سوف تضرب وهذا الاضطراب يسبب انبعاثاً مستمراً للفونونات التي تشكل حوضاً من الشحنات الموجبة تحيط بالألكترونات، والشكل (9-7) يوضح موجة اضطراب الشبكة بسبب الانجذاب الى الالكترن المتحرك.



الشكل (٧-٩) تشكيل زوج كوبر واضطراب الشبكة عند حركته.

وقبل ان يمر الالكترون في الشبكة وكذلك قبل ان يعود الى موضعه الطبيعي فان الكترونا ثانيا سوف ينسحب الى داخل الحوض وخلال هذه العملية بين الالكترونين والتي يجب فيها ان يتنافر الالكترونان مع بعضهما، فانهما يرتبطان بوساطة القوى التي مارستها الفونونات للتغلب على قوى التنافر الطبيعية بين الالكترونات. وان هذه الازواج الالكترونية تكون متماسكة مع بعضها ويمرون خلال الموصل بصورة متناغمة. وان هذه الالكترونات محجوب كل واحد منها عن الآخر بوساطة الفونونات ومفصولة عن بعضها بمسافة معينة. وعندما يظهر احد الالكترونات والذي يشكل زوجا يعبر قريبا من الايون في الشبكة البلورية فان التجاذب بين الالكترون السالب والايون الموجب يسبب اهتزازا في الشبكة للعبور من ايون الى ايون اخر حتى يمكن للالكترون الآخر من الزوج امتصاص هذا الاهتزاز. ان صافي التأثير هو ان

احد الالكترونين يبعث فونونا والالكترون الآخر يمتص هذا الفونون. وهذا التبادل هو الذي يبقى على ازواج كوبر معا. وان ارتباط هذه الازواج من الالكترونات يكون بوساطة طاقة ربط محددة فاذا كانت طاقة الربط هذه اكبر من الطاقة الناتجة من الضربات او الصدمات الناتجة عن تذبذب الذرات في الموصل (والتي هي في الحقيقة عند درجات الحرارة الواطئة) فان هذه الازواج تبقى متواشجة معا وتقاوم كل الضربات، ولهذا فهي التعاني اي مقاومة، وعلى اي حال فان من المهم فهم كيفية كسر ازواج كوبر بشكل ثابت واعادتها لان الالكترونات جسيمات يصعب تمييزها، وهذا سهل من خلال اعتبارهم كازواج دائمة والشكل (٩-٨) يوضح كيف يصبح الالكترونان والمسميان بزواج كوبر مرتبطين بصورة محكمة. ان نظرية (BCS) نجحت في توضيح ان الالكترونات ممكن ان تتجاذب الواحد مع الآخر خلال تفاعلها مع الشبيكة البلورية. وهذا يحصل بالرغم من الحقيقة القائمة بان الالكترونات تمتلك الشحنة نفسها، حيث انه عند تذبذب الذرات في الشبيكة كمناطق موجبة وسالبة فان الزوج الالكتروني يتناوب في السحب والدفع معا من دون ان يتصادما. ان الازدواج الالكتروني يكون مفضلاً بسبب ان له تأثيراً واضحاً في وضع المادة في اوطاً حالات من الطاقة. وعند ارتباط الالكترونات معا كازواج فانها تتحرك خلال المادة الفائقة التوصيل في نسق منظم.



الشكل (٩-٨) انبعاث الفونون (q) وامتصاصه بين الكتروني زوج كوبر في الموصل الفائق.

ان نظرية (BCS) توقعت ان اعلى حد نظري لدرجة الحرارة الحرجة (T_c) هي بحدود ($٤٠K - ٣٠K$)، كما ان الطاقة الحرارية سوف تسبب تفاعلات (الكترون-فونون) ذات الطاقة العالية جدا والتي تسمح بتشكيل او اسناد ازواج كوبر. ان نظرية (BCS) استنتجت العديد من التوقعات او التنبؤات المهمة التي لا تعتمد على تفاصيل التفاعل وقد اثبتت هذه في العديد من التجارب يمكن ان نذكر منها:

١. ان التعبير البسيط لدرجة الحرارة الحرجة يتضمن كثافة الحالة عند مستوى فيرمي (EFN) ، (فاذا كان معدل تفاعل (الكترون- فونون)

(V)، (ودرجة حرارة ديبياي هي $(\theta_D = \hbar\omega_D/K_B)$ ومعدل طاقة التناثر لكولوم هو (μ) فان درجة الحرارة الحرجة تعطى بالعلاقة الآتية:

$$T_c = 1.14\theta_D e^{-\left(\frac{1}{N(E_F)V-\mu}\right)} \dots \dots \dots (28 - 9)$$

٢. ان الأزواج الألكترونية تمتلك طاقة هي اقل من الطاقة التي يمتلكها اي من الالكترونين في الحالة الطبيعية، وهذا يعني ان فجوة الطاقة بين المزدوج كحالات الكترونية تكون منفردة، و هذه الطاقة تساوي (2Δ) حيث ان (Δ) تعطى بوساطة العلاقة الآتية:

$$\Delta \cong 2\hbar\omega_D e^{-\left(\frac{1}{N(E_F)V}\right)} \dots \dots \dots (29 - 9)$$

حيث ω_D هو تردد ديبياي ويظهر في المعادلة بسبب تبادل الفونونات بين الكتروني زوج كوبر.

٣. ان فجوة الطاقة غير ثابتة، ولكن بزيادة درجة الحرارة فان فجوة الطاقة تتناقص برتابة وتصل الى الصفر عندما تكون $(T \rightarrow T_c)$ ، وعلى مقربة من درجة حرارة الانتقال فان النظرية تنتج منه:

$$\Delta(T) \cong 1.74\Delta(0) \left[1 - \frac{T}{T_c}\right]^{1/2} \dots \dots \dots (30 - 9)$$

٤. ان النسبة بين قيمة فجوة الطاقة عند درجة حرارة (0K) وقيمة (2Δ) في درجة حرارة الانتقال الحرجة (معبّر عنها بوحدات الطاقة) تاخذ القيمة العامة $(0,3)$ وهي لا تعتمد على المادة.

$$2\Delta = 3,0K_B T_c \dots \dots \dots$$

$$(31 - 9)$$

حيث K_B هي ثابت بولتزمان.

٥. بما انه تردد ديبياي (Debye frequency) (WD) يتناسب معهي

$(M^{-1/2})$ حيث M هي كتلة النظير وهذا يترتب عليه ان $(\Delta \approx \Delta_0)$

$(M^{-1/2})$ حيث (Δ_0) هي فجوة الطاقة عند $(0K)$ ، لهذا فان الفجوة

وكذلك درجة الحرارة الحرجة (T_c) تقل بزيادة (M) .

الفصل العاشر

التطبيقات الصناعية للمواد الفائقة التوصيل

Industrial Applications of Superconductors

١-١٠ المقدمة (Introduction):

التحسينات المستمرة في خواص الموصلية الفائقة تفتح المجال أمام التطبيقات الصناعية الحالية والمستقبلية للمواد فائقة التوصيل. إن الخواص الأساسية للموصلات الفائقة مثل المقاومة الكهربائية الصفرية، ظاهرة ميسنر، ظاهرة جوزفسون... الخ جعلتها ذات أهمية كبيرة في الاستعمالات. إن العوامل الأساسية الثلاث التي تحدد إمكانية التطبيق هي: * درجة الحرارة الحرجة (T_c). * كثافة التيار الحرج (J_c). * المجال المغناطيسي الحرج (H_{c2}). إن اكتساب القيم الكبيرة للعوامل أعلاه وجدت أنها أفضل التطبيقات العملية. إن اكتساب الموصلات الفائقة عالية درجة الحرارة أوجدت تحديات فريدة في صناعة الطاقة الكهربائية، وأحدثت تقنيات جديدة أصبحت اقتصادياً متوفرة في القياسات الكبيرة لتطبيقات الموصلية الفائقة في صناعة الطاقة معتمدة على الخواص الآتية:-

١. إمكانية نقل تيارات عالية مع خسارة قليلة أو عدم خسارة في نقل الطاقة الكهربائية.

٢. قدرتها على إنتاج مجالات مغناطيسية متوسطة أو عالية، تستخدم في توليد و تخزين الطاقة الكهربائية

ان معرفة الخواص البارزة للموصلات الفائقة تفسر تطبيقاتها التكنولوجية, ان الوصول الى المنطقة القريبة من الصفر المطلق للمقاومة الكهربائية ليس سهلا ومكلف جدا. وان التغلب على العديد من المعوقات في هذا الاتجاه مازال مستمرا. ان المعوقات الحقيقية والاكثر جدية تكمن في تعقيد الاجهزة, حيث ان بناء هذه الاجهزة وتركيبها وصيانتها يتطلب مهارات احترافية عالية جدا, وكذلك تتطلب تقنيات متقدمة. ان عملية تشغيل الاجهزة فائقة التوصيل تتطلب عزلها بصورة تامة وكاملة عن المحيط الخارجي. وكذلك فان عنصر الهليوم هو عنصر غالي الثمن ويعد من العناصر النادرة, لهذا يستعمل تبريد اضافي وخارجي بوساطة النتروجين السائل من اجل تقليل الكلفة والخسارة. فمثل هذه العملية والمتمثلة في التبريد المزوج يجعل الاجراءات اكثر تعقيدا. ان شدة المجالات المغناطيسية المتعلقة بهذه الاجهزة ليست كبيرة, بالاضافة الى ذلك ممكن ان تتغير مع الوقت تحت تأثيرات خارجية. ولهذا السبب ولعدة سنوات يتم الحصول على شدة المجالات المغناطيسية باستعمال المغناط الكهربائي, ان الاسلاك فائقة التوصيل الكهربائي تختلف اختلافا جذريا عن تلك المستخدمة في التطبيقات الكهربائية الاعتيادية. ويستعمل هنا الموصلات الفائقة من النوع الثاني لقدرتها على مقاومة وتحمل المجالات المغناطيسية العالية. ومن الجدير بالذكر ان تدفق التيار الكهربائي في سلك فائق التوصيل يتيح لنا امكانية اطفاء جهاز القدرة, لان الاسلاك ممكن ان تشكل حلقات والتيار يستمر بالتدفق الى اجل غير محدد طالما ان درجة الحرارة هي تحت درجة حرارة الانتقال الحرجة. وكذلك

فان تطبيقات الاغشية الرقيقة من الموصلات الفائقة (HTSC) عالية درجة الحرارة تتزايد بشكل كبير لاستعمالها في صناعة ادوات المايكرويف المتنوعة والمستعملة في الهواتف النقالة و الاتصالات بالاقمار الصناعية.

ان التطبيقات الحديثة للموصلات الفائقة سوف تزداد بازدياد درجة حرارة انتقالها الحرجة. ان الموصلات الفائقة المستندة على النتروجين السائل تعطي المصانع مرونة اكثر لاستخدام التوصيلية الفائقة مقارنة بالموصلات الفائقة المستندة على الهليوم السائل. ان الاكتشاف المحتمل للموصلات الفائقة في درجة حرارة الغرفة سوف تعطي املا كبيرا لجلب الوسائط الفائقة التوصيل والتي تلي حاجتنا من الطاقة. من الممكن صناعة مغناط حديثة فائقة التوصيل اصغر بكثير من المغناط المقاومة, لان الملفات تحمل تيارا اكبر من دون خسارة طاقة. حيث ان التدعيم بالموصلات الفائقة سوف يولد الكمية نفسها من التيار الكهربائي باستعمال اجهزة اصغر وطاقة اقل, وحالما تتولد الكهربائية فانها ستنتشر خلال الاسلاك فائقة التوصيل. والاكثر من هذا ان الطاقة ممكن ان تخزن في الملفات فائقة التوصيل لمدة زمنية اطول من دون فقدان ملحوظ. ان التطبيقات الحالية للموصلات الفائقة ذات درجة الحرارة العالية تشمل وسائط الحماية المغناطيسية, وانظمة التصوير الطبية, وسائط التداخل الكمي فائق التوصيل (Superconducting Quantum Interference Devices) (SQUID_s), المجسات تحت الحمراء, ووسائط معالجة الاشارات المتماثلة ووسائط المايكرويف, ان استعمال الاغشية الرقيقة

فائقة التوصيل الحديثة من الممكن ان يؤدي الى انتاج رقائق متراسة بشكل اكثر والتي تنقل المعلومات بصورة اسرع بعدة مرات.

بما انه لم توجد التوصيلية الفائقة بدرجة حرارة الغرفة لحد الان فان التطبيقات في التوصيلية الفائقة محددة بدرجة حرارة مقاربة لدرجة حرارة النتروجين السائل. بما ان انظمة التبريد قد تطورت حديثا بشكل كبير فان تلك التطبيقات سوف تسهم بصورة كبيرة في المجتمع. تستعمل الموصلات الفائقة لصناعة بعض المغناط الكهربية والتي تعد الاقوى من بين التي عرفها الانسان وتشمل الرنين المغناطيسي (MRI) وهي من اقوى المغناط المستخدمة والمساعدة في خلق المجالات الضرورية لمساعدة الاطباء لرؤية الجسم من دون تداخل جراحي ومن دون تعرض الانسان لخطر الاشعاع. وكذلك من الممكن استعمالها للعزل المغناطيسي حيث تنتزع المغناطيسية الضعيفة من خلفية ذات جسيمات اقل مغنطة او غير ممغنطة كما في مصانع الاصبغة.

وتعد احدى التطبيقات المثمرة جدا للموصلات الفائقة هي في نظام تنقية الماء باستعمال تأثير العزل المغناطيسي. وهذا النظام اكثر كفاءة بمائة مرة من انظمة التنقية بالعزل المغناطيسي المتوفرة حاليا.

وكذلك تم استعمال الموصلات الفائقة في صناعة الدوائر الرقمية ومرشحات المايكرويف لمحطات الهواتف النقالة.

تستعمل الموصلات الفائقة لبناء مفارق جوزيفسون والتي هي وحدات البناء في (SQUIDS), والذي هو من اكثر مقاييس التمغنط المعروفة حساسية.

اعتمادا على طريقة العمل الخاصة ,ومن الممكن استعمال ملتقيات جوزيفسون ككاشف فوتون او كخلاط.

ان تغيير المقاومة الكبير عند الانتقال من الحالة الطبيعية الى الحالة الفائقة التوصيل يستعمل لبناء المحارير وكاشفات الفوتون للمسعر الدقيق عالي التبريد. ولقد نشأت اسواق مبكرة عندما تغلبت فائدة الكفاءة, والنوعية, والحجم والوزن للوسائط المعتمدة على الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية على الكلفة الاضافية.

وكذلك تتضمن التطبيقات المستقبلية الواعدة محاولات عالية الاداء، مثل اجهزة خزن الطاقة، نقل طاقة كهربائية، والمحركات الكهربائية و اجهزة الطفو المغناطيسية. على اي حال فان التوصيلية الفائقة حساسة لتحريك المجالات المغناطيسية، كذلك التطبيقات التي تستعمل التيار المتناوب كالمحولات سوف تكون اكثر صعوبة للتطور من تلك التي تعتمد على التيار المباشر. ومن المعروف ان المواد فائقة التوصيل عالية درجة الحرارة (HTSC) هي مواد هشة ولهذا فان هناك صعوبات تقنية لانتاج اسلاك، اشربة وملفات لاستعمال هذه المواد. على كل حال، تشير البحوث والتطور في هذا المجال الى استحصال حلول عديدة بحيث ستغدو اجهزة الموصلات الفائقة (HTSC) ووسائطها متوفرة تجاريا في المستقبل القريب، ان استعمال الاسلاك فائقة التوصيل في خطوط نقل الطاقة ذات الفولتية العالية هي احدى التطبيقات المهمة للموصلات الفائقة عالية درجة الحرارة. يعتمد اداء اسلاك (HTSC) على نوعية الاشربة حيث يجب ان تكون الاشربة المستعملة

في اسلاك نقل الطاقة طويلة بحيث تكفي الطول المطلوب لمحتوى السلك المطلوب انشائه. ومن اهم الاستخدامات والتطبيقات لظاهرة التوصيل الفائق هي:

١- اسلاك نقل الطاقة الكهربائية من محطات التوليد الى المحطات الفرعية، ومصنوعة من مادة فائقة التوصيل قليلة المقاومة الكهربائية للتيار الكهربائي، لاتسبب ضياع او خسارة بالطاقة. حيث ان هذه الاسلاك تكون نواقل حامية للكهربائية من الضياع عند الاستهلاك وبشكل اسلاك متعددة الشعيرات وقوية ومرنة ومتينة وقادرة على حمل تيارا كهربائيا اكبر بمقدار (٥-٣) مرات اكثر من تلك المصنوعة من النحاس.

٢- المولدات المصنوعة من اسلاك فائقة التوصيل تكون اكثر كفاءة من المولدات المصنوعة من اسلاك النحاس، وفي الحقيقة هناك مولدات ذات كفاءة (٩٩%) وحجمها نحو نصف حجم المولدات التقليدية. هذه الحقائق تجعلها تحديات مريحة جدا لاستعمالات القدرة.

٣- الطفو المغناطيسي هو احد التطبيقات التي تحسن فيه اداء الموصلات الفائقة بصورة جيدة. فمثلاً القطارات يمكن ان تعتمد في السير على ظاهرة الطفو فوق مغناط فائقة التوصيل قوية من خلال عمليا ازالة الاحتكاك بين القطار والسكة. كون الكهرومغناطيسية التقليدية تخسر الكثير من الطاقة الكهربائية مثل الحرارة، ومن الناحية الفيزيائية تكون اكثر بكثير من المغناط فائقة التوصيل.

٤- في الصناعة الألكترونية هناك مرشحات عالية الأداء جداً تُبنى الآن من سلكٍ فائق التوصيل له مقاومة كهربائية قريبة من الصفر وحتى في التذبذبات العالية، وهناك المزيد من مراحل تطور المرشحات للوصول الى امكانية استخدامها في الترددات المرغوبة. نتيجة الى تمرير الترددات المرغوبة وغلق الترددات غير المرغوبة في تطبيقات الترددات الراديوية عالية الازدحام (Radio Frequency (RF)) كما في انظمة الهواتف الخلوية.

٥- تعتمد في صناعة الجيروسكوب (Gyroscope)، المستخدم لمراقبة الاقمار الصناعية التي تدور حول الأرض والتي تستخدم خصائص تدفق الموصلات الفائقة لأزالة الاحتكاك إلى ما يقرب من الصفر.

٦- استعمال الموصلات الفائقة في تطوير أجهزة الكشف بالأشعة السينية (X-Ray detectors)، نظرا لقدرتها الكامنة على الكشف عن كمية قليلة من الطاقة، وكذلك في تطوير كاميرا تسمى (S-Camera) وهي كاميرا بصرية ذات حساسية عالية، ومن الممكن ان تؤدي الموصلات الفائقة دورا مهما في اتصالات الانترنت قريبا.

١٠-٢ الاستخدامات (Applications):

١٠-٢-١ القطار فائق السرعة (Very Rapid Train):

تمت الاستفادة من ظاهرة الطفو المغناطيسي أو التعليق في سير القطارات بسرعة فائقة من خلال التعلق بالهواء حيث تسير بدون احتكاك مما يعطي توفيراً هائلاً في الطاقة من جهة ويعطي سرعات كبيرة والتخلص من الاحتكاك المولد للضوضاء، كونها تسير على وسادة هوائية والشكل (١٠-١) يوضح ذلك.



الشكل (١٠-١) القطار فائق السرعة

١٠-٢-٢ جهاز السكويد (SQUID Apparatus):

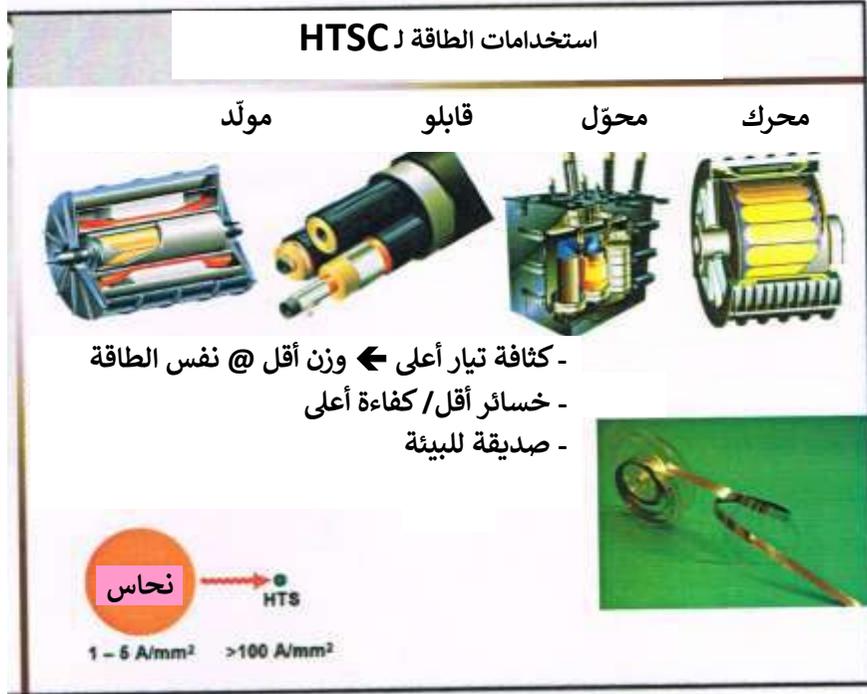
عبارة عن جهاز حساس جداً لقياس المجالات المغناطيسية الدقيقة لتمييز التغيرات في المجالات المغناطيسية ويتكون من جزئين أساسيين، الأول يعتمد على التيار المستمر (SQUID-Dc) والآخر يعتمد على التيار ذي التردد الراديوي (SQUID-RF).

إن النوع الأول يكون على شكل أقلام رقيقة توضع بينها مواد عازلة لغرض الحفاظ على التملص الالكتروني. أما الثاني فيصنع أيضاً من الأقلام الرقيقة أو بالاعتماد على فكرة عمل خرم من مادة موصلة فائقة على شكل قرص، فكلما زادت عدد الخروم زادت الحساسية. فعند وجود خرم واحد يمكن قياس المجال المغناطيسي مباشرة، وعند وجود عدة خروم لقياس تغير المجال المغناطيسي (التدرج).

١٠-٢-٣ نقل الطاقة (Power Transmission):

ان مقاومة الموصلات الفائقة الصغيرة او القريبة من الصفر، ادت بعدم تبديد الطاقة (فقدان I^2R) المرتبطة بتدفق التيار خلالها. لذا، اعتبرت الموصلات الفائقة كقابلات نقل الطاقة، كون مقاومتها الكهربائية تقترب من الصفر كما موضح في الشكل (١٠-٢ أ، ب، ج، د، هـ، و، ز، ح، ط، ي)) لأقل فقدان للطاقة، من ١٠٠ إلى ١٠٠٠ مرة اقل من عند مقارنتها بالموصلات العادية مثل النحاس. إن الحاجة إلى جهاز خفض درجة الحرارة الكافي للتبريد بشكل فعال يستبعدها في النقل صغير الحجم بسبب تكاليفها العالية. وأصبح قابلاً للتطبيق اقتصادياً في مستويات نقلٍ للطاقة عالية جداً. وتوجد هناك الآن

جدوى اقتصادية لنقل الطاقة وفي الدارة الالكترونية التي تستخدم النتروجين
السائل كمحلول مبرّد، كما في الشكل (١٠-٢).



الشكل (١٠-١٢) استخدامات الطاقة في الموصلات الفائقة

موصلات (PIT)

موصل $BiPbSrCaCuO$ (2223) PIT c

موصل MgB_2 PIT c

-متاح في طول طويل
-أداء متوسط ($J_c < 60 \text{ kA/cm}$)
-لا يمكن تطبيقه في المجالات المغناطيسية في
77K
-باهظ جداً (Ag)

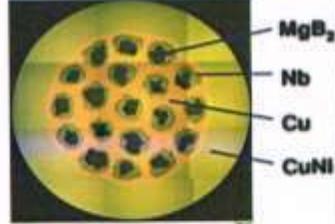
-أول طول طويل متاح
-استخدام محتمل في $\sim 20 \text{ K}$ (نقطة
غليان الهيدروجين)
← بالاتحاد مع تكنولوجيا الهيدروجين



شريط BSCCO
نطول 60.0m



مقطع مستعرض لشريط BSCCO مع 61 فتيلة



متعدد MgB_2 m

موصل

الشكل (١٠-٢) يمثل القابلات الفائقة التوصيل

استخدام الموصلات الفائقة الكلاسيكية

المغناطيس في الأجهزة البحثية

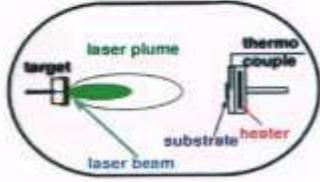
- * المعجلات في فيزياء الجسيمات
- * المفاعلات للاندماج النووي



الشكل (١٠-٣)

موصلات مطلية بـ YBCO على RABiTS

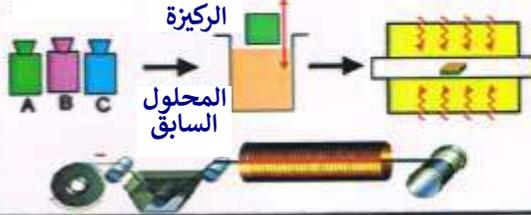
ترسيب ليزري النبضي - PLD



- * جودة عالية للطبقات
- * طريقة مرنة
- * ركائز صغيرة ($10 \times 10 \text{ mm}^2$)
- * (نمذجية)
- * معدات خوائية ضرورية
- * تكاليف عالية

ترسيب المحلول الكيميائي - CSD

المعالجة الحرارية طلي بالتغطيس مادة البدء
كمكونات عضوية



← مثالية للبحث والتطوير

- * لا يوجد خواء ضروري
- * قابلة للقياس بسهولة على الطول الطويل
- * يمكن تحقيق إنتاج عالٍ
- * إمكانية مناطق طلي كبيرة
- ← مثالية للمعالجة الصناعية

الشكل (١٠-١٢)

تحضير موصلات مطلية بـ YBCO

طرق المعالجة الرئيسة للموصلات المطلية بـ YBCO

الترسيب المعزز بحزمة الأيونات (IBAD) الركائز المخشنة ثنائية المحور المعززة بالدلفنة أو الدرجة (RABiTS)



قائمة على ركائز مخشنة ثنائية المحور

قائمة على طبقة دائرية مخشنة ثنائية المحور

الشكل (١٠-١٥هـ)

استخدامات الطاقة لـ HTSC

قابلو فائق التوصيل
قابلو بطول 350 m بدرجة حرارة 34,5K و 800 A في الشبكة
الفعلية، مصنوع من موصلات قائمة على BISCO& YBCO

مشروع قابلوات البانيا- تخطيط موقعي



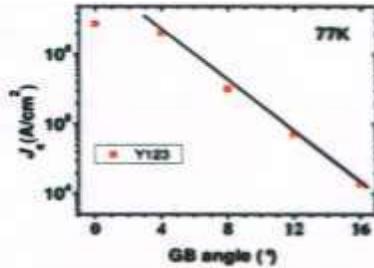
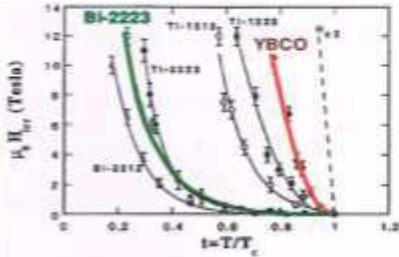
الشكل (١٠-٢)

موصلات مطلية بـ YBCO

استخدام YBCO في موصلات HTSC

الفائدة: مجالات عالية الالاعكوسية
في VVK

التحدي: حدود حبيبية



* لا تعمل تكنولوجيا المسحوق في الانبوب بالنسبة لـ YBCO
* تتم الحاجة إلى طول طويل لموصلات YBCO العالي الخشونة (النسيجي)

نمو YBCO الفوقى على نموذج مخشن: موصلات مكسوة (مطلية)

الشكل (١٠-٩١٠) (ز)

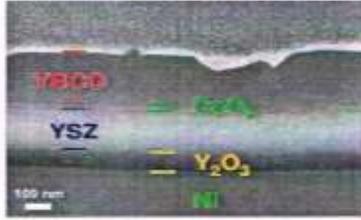
الموصلات المطلية بمركب YBCO على مركب RABiTS

الترسيب الفوقي للطبقات الدائرية وYBCO

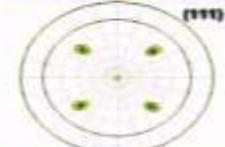
- الوظيفة الضرورية للطبقات الدائرية:
- * قمع أو إخماد انتشار النيكل Ni في YBCO (يحط النيكل من الموصلية الفائقة).
- * قمع انتشار O غير المسيطر عليه إلى الركيزة (قد يؤدي إلى تشققات وتقشير)
- * نقل النسيج من الركيزة إلى الموصل الفائق (YBCO تكعيبي مخشن)



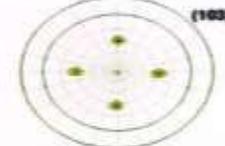
الهندسة المعمارية لموصل مطلي بـYBCO



مقطع مستعرض لموصل مطلي



ركيزة Ni-5at%W RABiTS



طبقة YBCO

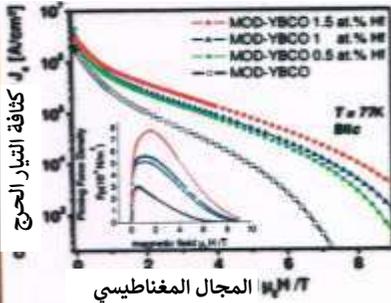
Mühne, R. et al., Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) 709

الشكل (١٠-٢ ح)

أمثلة الموصلات المطلية بـYBCO

مراكز التدبيس الاصطناعي

- * تحسين كثافة التيار الحرج في المجالات المغناطيسية
- * اندماج مواقع التدبيس النانوية الحجم: -جسيمات غير فائقة التوصيل
- عيوب النمو خلال الجزر على الركيزة
- الجسيمات النانوية المغناطيسية

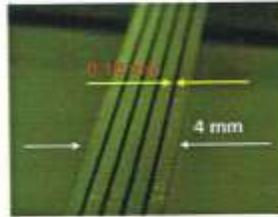


المجال المغناطيسي $\mu_0 H / T$

Engel, S. et al., Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 102505

خفض خسائر ac-

- * خسائر بسبب تغير مغناطيسية الركائز المغناطيسية الحديدية
- ← تطور الـRABiTS مع المغناطيسية الحديدية المخفضة
- خسائر مغناطيسية في YBCO بسبب هندسة الموصلات
- ← قتل الموصلات

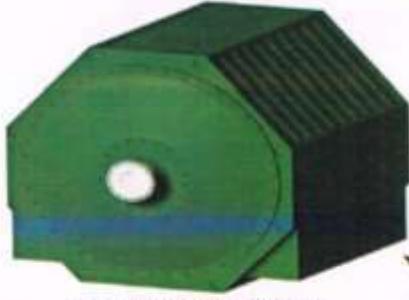


- * خسائر تقارنية في منظومات متعددة الطبقات

الشكل (١٠-٢ ط)

استخدامات الطاقة لـ HTSC

المحركات المسيّرة للسفن



36.5 MW Conventional
(300 tons)



36.5 MW HTS
(75 tons)

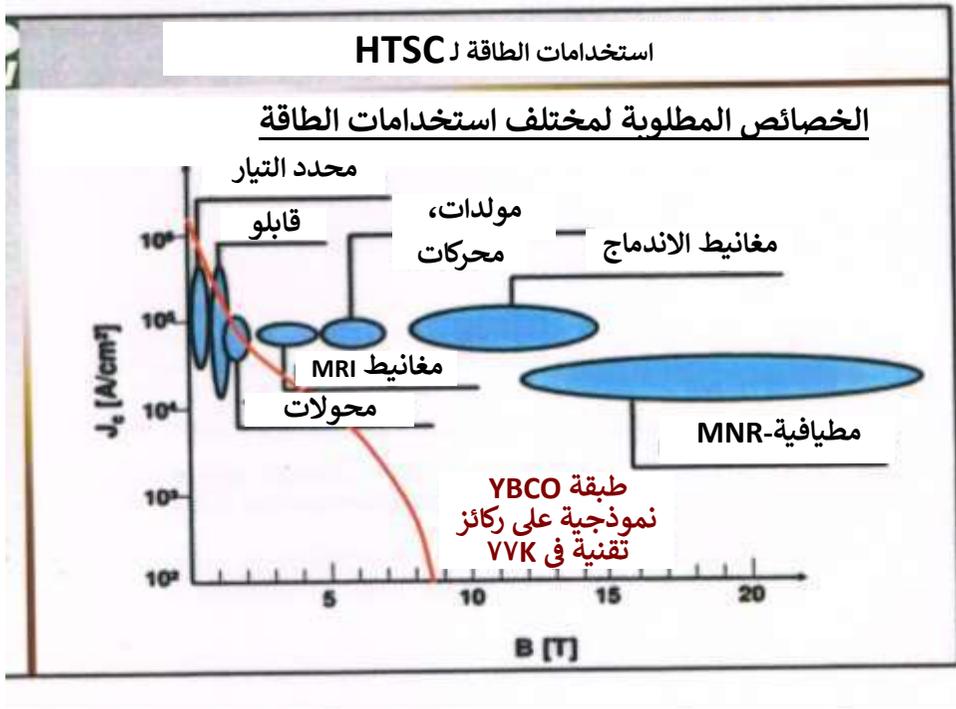
- أقل من نصف الحجم
- أقل من ثلث واحد من الوزن
- صافي كفاية (فعالية) أعلى
- أسعار مكافئة (مُعادلة)
- أسكن صوتاً بشكلٍ مُلازم

الشكل (١٠-٢ي)

١٠-٢-٤ خزن الطاقة (Power Storage):

تستخدم الموصلات الفائقة في:

- خزن الطاقة المغناطيسية.
- استدامة المجالات المغناطيسية العالية جداً.
- رفع التيارات المستمرة لتشغيل ملفات الموصلات الفائقة في الدوائر القصيرة.
- استخدام ملفات الموصلات الفائقة في أجهزة الخزن الحثي.
- تستخدم في موازنة الحمل في شبكات الطاقة الموجودة، كما في الشكل (١٠-٣).



الشكل (١٠-٣)

١٠-٢-٥ المغنايط الفائقة التوصيل (Superconducting)

(Magnets):

من أهم تطبيقات الموصلات الفائقة هي:

- صناعة المغنايط المختبرية الصغيرة.
- التصوير الطبي بواسطة الرنين المغناطيسي (Magnetic Resonance Medical Imaging) (MRI).
- تعجيل وتركيز حزم الجسيمات وغرف فقاعات كشف الجسيمات.
- مفاعلات الانشطار التي تتطلب مغنايط فائقة التوصيل لاحتواء البلازما.
- منظومات فصل المعادن ونقل التعويم المغناطيسي.

١٠-٢-٦ المحركات، المولدات ومولدات التيار المتناوب:

(Motors, Generators and Alternators)

لقد أثبتت محركات ومولدات الـ DC المتجانسة الأقطاب، والمنوبات نجاحها باستخدام ملفات فائقة التوصيل. وتكمن فائدة الموصلية الفائقة في جميع التطبيقات أعلاه في التقليل في حجم طاقة مفترضة على ماكينة تقليدية. إن الكلفة الواطئة لتبريد النيتروجين بدلاً من درجات حرارة الهيليوم، باعتبار المعولية الأكبر لثلاجات النيتروجين على ثلاجات الهيليوم، ستجعل حتماً المكائن المعتمدة على موصلات فائقة بدرجة حرارة ٧٧K أكثر جذباً من الناحية الاقتصادية من تلك التي تستخدم المواد التجارية الموجودة حالياً.

١٠-٢-٧ التطبيقات الالكترونية (Electronic Applications):

على الرغم من أن التيار في الأجهزة الالكترونية صغير بسبب الأبعاد المقيدة، إلا أن كثافات التيار تكون مشابهة لتلك الموجودة في المكائن الكبيرة. مع ذلك، تكون المجالات المغناطيسية صغيرة عموماً. ففي شكل الأغشية الرقيقة، قد تمتلك الموصلات الفائقة للسيراميك كثافات تيار حرج ملائمة. ويبدو من المعقول الإشارة إلى أن الاستخدامات الأولى للموصلات الفائقة للسيراميك ستكون في دوائر وأجهزة الكترونية. وينطوي استخدام الموصلات الفائقة، مع كثافات التيار العالية وغياب التبديد، على إمكانية الحصول على كثافة رص أعلى على لوحة أو شريحة الدارة الكهربائية. لا تكون الموصلية الفائقة التقليدية جذابة جداً في هذه التطبيقات أو الاستخدامات، حيث إن العناصر الشبه الموصلة المرتبطة لا تعمل بصورة جيدة في درجات حرارة الهيليوم. مع ذلك، تكون درجات حرارة النيتروجين مفيدة لتشغيل أشباه الموصلات التي تُعظم حركية الناقل أو الحامل إلى أقصاها في هذا المدى من درجة الحرارة. إن الاستخدام المحتمل للموصلات الفائقة للسيراميك بوصفها عناصر دوائر كهربائية سلبية (أي لا تحوي مصدر طاقة) قد يعطي فائدة مزدوجة. وتتطلب جميع التطبيقات أو الاستخدامات أعلاه إنتاج أغشية فائقة التوصيل ذات كثافة تيار عالية، التي يمكن أن تُعالج بالتوافق مع المكونات شبه الموصلة، وهو هدف لم يثبت إلى حد الآن على أنه ممكن التحقيق بسهولة. وتشمل الأجهزة الالكترونية السلبية الأكبر، التي قد تستفيد من استخدام الموصلية الفائقة، تجويفات RF (التردد اللاسلكي) والهوائي (antennae). ويحسن غياب التبديد الكفائية

(الفعالية). ويساعد تأثير ميسنر (Meissner effect) باستخدام للموصلات الفائقة للدرع المغناطيسي. إن الفئة الأكبر من الأجهزة الفائقة التوصيل النشطة هي الأجهزة ثنائية الطرف القائمة على تأثير جوزفسون (Josephson effect). ويمكن استخدام هذا الجهاز الثنائي التوصيل، المسمّى بسكويد (SQUID)، ككشاف حسّاس ومقياس دقيق جداً للفيض المغناطيسي. كذلك يمكن استخدامه كمضخّم، ومقياس مغناطيسي، وكمكونات رقمية.

١٠-٢-٨ الاستخدامات العسكرية (Military Applications):

تستخدم الموصلات الفائقة في الرادارات العسكرية كونها تتحلى بطرد المجالات المغناطيسية الخارجية، إن دقة الصور التي يكونها الرادار تعتمد على قدرته على التحليل والتي تؤثر عليها المجالات المغناطيسية الخارجية مما يؤدي إلى تشويشها، ولتلافي هذا التشويش تستخدم الدروع المغناطيسية. إن هذه الدروع على مختلف أشكالها مصنوعة من المواد فائقة التوصيل. وكذلك استخدام جهاز السكويد المصنوع من المواد الفائقة التوصيل للكشف عن عيوب التشقق والشروخ في أجسام الطائرات العسكرية والمدنية وهو فحص غير تدميري ولأعماق تزيد عن (١٠ cm).

١٠-٢-٩ الاستخدامات الطبية (Medical Applications):

لدراسة الإشارات الكهربائية والمغناطيسية الدقيقة المتولدة من الدماغ أو الأعصاب، أو المخ، يتم استخدام جهاز سكويد لكونه محاطاً بدروع مصنوعة من مواد فائقة التوصيل، كما في الشكل (١٠-٤)، كدروع تمنع تأثر هذه الإشارات من تأثيرات المجالات الخارجية.

استخدام الموصلات الفائقة الكلاسيكية

الاستخدام في الأجهزة الطبية والتحليلية

الطب:
تصوير الرنين المغناطيسي-
(MRI) للأنسجة الرقيقة مثل
الأعضاء، الغضاريف،
الأوتار.. الخ

لكل سنة 3000 t NbTi



التحليلات:
مطيافية الرنين المغناطيسي- النووي
(MNR)

لكل سنة $500 \text{ t Nb}_3\text{Sn}$



الشكل (١٠-٤) الأجهزة الطبية

المصادر

- ١- فيزياء الحالة الصلبة، الجزء الثاني، د.مؤيد جبرائيل يوسف، بيت الحكمة، ١٩٨٩.
- ٢- فيزياء الحالة الصلبة، د.يحيى نوري الجمال، دار الحكمة للطباعة والنشر، الموصل، ١٩٩٠.
- ٣- حيايدي الفيزياء، د. أحمد سالم صالح، دار صفاء للنشر والتوزيع، ٢٠١٣.
- ٤- Assembling the Puzzle of Superconductivity Element: A Review, Cristina Buzen and Kevin Robbie.
- ٥- Fancais Gervais Physica C185-189 2609, 1991.
- ٦- Materials Science and Engineering, William D. Callister, David G. Rethwisch, Wiley John Wiley and Sons, Inc., 2011.
- ٧- Nagamatsu Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, Nature 410, 63, 2001.
- ٨- Rockett A., The Materials Science of Semiconductors, Springer, New York, 2008.

Spaldin N.A., Magnetic Materials Fundamentals – ٩
and Device Application, Cambridge University
Press, Cambridge, 2003.

Textbook of High Temperature – ١٠
Superconductors by Dr. K. Sonamuthi, Discovery
Publishing House PVT, LTD, 2010.

دليل طرق تحضير المواد فائقة التوصيل لمختبر الدراسات – ١١
العليا للمواد فائقة التوصيل في كلية ابن الهيثم جامعة بغداد دكتور
ابراهيم التميمي.