

أثر الإشابة بالثاليوم في الخصائص الكهربائية والمغناطيسية للطور فائق الناقلية للكهرباء $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{\delta+6}$

بلقيس حسن مدد⁽¹⁾ و محمد عبد الحفيظ⁽¹⁾

و محمد علي الحجبي⁽²⁾

⁽¹⁾ قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة دمشق - سورية

⁽²⁾ قسم العلوم الأساسية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق - سورية

تاريخ الإيداع 2011/11/15

قبل للنشر في 2012/02/06

الملخص

دُرس الإحلال الجزئي للثاليوم في الطور Hg-2212 فائق الناقل في الكهرباء. حُضرت عينات فائقة الناقلية ذات التركيب $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{\delta+6}$ لقيم $x=0, 0.1, 0.2, 0.3$ باستخدام تقنية تفاعل الحالة الصلبة بخطوة واحدة في أنابيب كوارتز محكمة الإغلاق تحت الضغط الجوي العادي. ودُرست العينات المحضرة باستخدام انعراج الأشعة السينية، وقياسات المقاومة الكهربائية $R(T)$ والطواعية المغناطيسية AC و DC. وقد دلت نتائج قياس انعراج الأشعة السينية أن العينة تملك طوراً رئيساً هو (Hg, Tl) -2212 ذا تبلور رباعي قائم ضمن المجموعة البنيوية P/4mmm. قيست المقاومة الكهربائية للمركب كتابع لدرجة الحرارة باستخدام تقنية النقاط الأربع التقليدية في مجال درجات الحرارة 10-300 كلفن. وقد حُسبت درجة الحرارة الحرجة T_c وكثافة التيار الحرج J_c من قياسات المقاومة الكهربائية والطواعية المغناطيسية المتناوبة.

الكلمات المفتاحية: الناقلية الفائقة، تفاعل الحالة الصلبة، المقاومة الكهربائية، والطواعية المغناطيسية، درجة الحرارة الحرجة، وكثافة التيار الحرج.

Effect of thallium doping on the electrical and magnetic properties of $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{\delta+6}$ superconductor phase

B. H. Maded⁽¹⁾; M. Abdulhafiz⁽¹⁾
and M. A. Al-Hajji⁽²⁾

⁽¹⁾ Department of Physics-Faculty of Sciences-Damascus University-Syria.

⁽²⁾ Department of basic science-faculty of civil engineering-Damascus university -Syria.

Received 15/11/2011
Accepted 06/02/2012

ABSTRACT

The effect of partial replacement of mercury by thallium in Hg-2212 superconductor phase is studied. Superconducting samples of the nominal composition $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{\delta+6}$ with x ranging from 0 to 0.3 are prepared under normal pressure by a one step of solid-state reaction technique. The samples are characterized by using X-ray powder diffraction, electrical resistance and magnetic susceptibility measurements. Powder X-ray diffraction analysis revealed that the studied sample showed a main phase of (Hg,Tl)-2212 with tetragonal structure (space group P/4mmm). The electrical resistance $R(T)$ was measured as a function of temperature using the conventional four probe dc technique in the temperature range from 10 K to 300 K. The superconducting parameters, such as superconducting transition temperature T_c , and critical current density J_c are calculated from electrical resistivity and AC-magnetic susceptibility measurements.

Keywords: Superconductor, Solid - state reaction, Electrical resistance, Magnetic susceptibility, Transition temperature, Critical current density.

1. المقدمة

في النواقل الفائقة ذات T_c العالية، تترايط الإلكترونات فيما بينها لتتشكل أزواج من الإلكترونات تدعى أزواج كوبر (Cooper pairs) عن طريق الفجوات الناشئة في الطبقات CuO_2 . لكن عدد الفجوات لا يعتمد على مركب معين، بل أيضاً يعتمد على متغيرات أخرى مثل تركيز الإشابة والضغط [1]. تصنف النواقل الفائقة ذات درجات الحرارة العالية في مجموعات من البنى بأعداد مختلفة للطبقات Cu-O المتجاورة [2,3]. وتتقسم النواقل الفائقة من حيث التركيب البنيوي إلى قسمين رئيسيين: الأول النواقل الفائقة ذات الطبقات CuO_2 ، إذ يحدث النقل الكهربائي في هذه الطبقات. والثاني مستويات عازلة من أكاسيد المعادن (تدعى أيضاً خزانات الشحنة)، إذ تكون مستويات أكاسيد المعادن عادة Hg, Tl, Bi و [4]. ومن الواضح أن أكثر أكاسيد المعادن التي تملك الترتيب الإلكتروني $6s^2 6p^n$ ، مثل Hg, Tl, Bi و Pb ، تؤدي دوراً رئيسياً في تحسين خواص النواقل الفائقة. ولفهم أثر أكاسيد المعادن، قمنا باستبدال الثاليوم في مواقع الزئبق في الطور $Hg-2212$. ويشابه الطور $Hg-2212$ تقريباً الطور $Tl-2212$ في التركيب، ولكن الاختلاف الرئيس بين الطورين هو محتوى الأكسجين في المستويات $Hg-O$ و $Tl-O$. وعادة يكون في الطور $Hg-2212$ نقص في الأكسجين لذا يكون الطور في منطقة تحت الإشابة. وبالعكس تكون مواقع الأكسجين في الطور $Tl-2212$ مشغولة بالكامل وتجعل هذا الطور في منطقة فوق الإشابة. والاستبدال الجزئي لأيونات Hg^{2+} بـ Tl^{2+} يقلل الأكسجين الناقص في المستوى $Hg-O$ ويحسن خواص الناقل الفائق. هذا الاستبدال يعطي نتائج مهمة لتغطي مناطق كثافة كاملة، من المنطقة تحت الإشابة مروراً بأفضل إشابة حتى منطقة فوق الإشابة. أجريت مؤخراً عدة محاولات لترتيب النواقل الفائقة ذات الأساس الزئبقي وتنبيتها؛ وذلك باستبدال الزئبق بالثاليوم [5, 6, 7].

في النواقل الفائقة ذات الأساس الزئبقي تكون ذرات الأكسجين شبه غائبة في المستوى $Hg-O$ في التركيب البنيوي ($\delta=0$) [8] التي تؤدي إلى غياب آلية ظهور النقص المهمة بالنسبة إلى النحاس. هذا النقص في الانشغال بذرات الأكسجين يجعل مركبات الزئبق في حالة تحت أو دون الإشابة (under-doped) بالنقص. ومقارنة بالنواقل الفائقة التي أساسها الثاليوم، تكون مواضع الأكسجين في مستوى $Tl-O$ غالباً مشغولة أو مملوءة. هذا يؤدي إلى أن مركبات الثاليوم تملك حالة فوق الإشابة (over-doped) بالنقص. لذا فإن استبدال الزئبق بالثاليوم في عائلة مركبات الزئبق تعود إلى انشغال جزئي وضروري لتشكيل ناقل فائق جيد.

يؤدي أثر الشوائب في الخصائص الكهربائية للناقلية الفائقة دوراً مهماً في الفهم الأفضل لأصل الناقلية الفائقة وآليتها، وفي تطوير مواد النواقل الفائقة الجديدة. ومعروف

في النواقل الفائقة ذات T_c العالية أن خواص الناقل الفائق تتعلق بالإشابة الكيميائية، وشروط التحضير وتركيز الفجوات ويؤدي الاستبدال الكيميائي في النواقل الفائقة ذات درجة الحرارة العالية إلى عيوب بلورية، وانفعالات شبكية، وتكوين أطوار غير ناقلة فائقة وأطوار أخرى غير متجانسة في مواد النواقل الفائقة، تؤدي إلى تحسين درجة الحرارة الحرجة T_c وتنتج مراكز تجميد لدوامات التدفق (Flux pinning centers) فعالة تعمل على تحسين كثافة التيار الحرج J_c ، الذي يستخدم في التطبيقات التكنولوجية مثل كابلات النقل الكهربائي، والتصوير الطبي باستخدام أجهزة الرنين المغناطيسي MRI و NMR وغيرها من الاستخدامات [10,9,8].

هَدَفَ هذا العمل إلى دراسة شاملة لتحضير Hg-2212؛ وذلك بتقديم طريقة تحضير بوقت قصير والتغلب على الصعوبات التي تحدث أثناء التحضير، ودراسة أثر إحلال التاليوم في Hg-2212. لهذا الغرض حُضِرَت عينات ذات التركيب الكيميائي $(Hg_x, Tl_{1-x})-2212$ ($x=0.1, 0.2, 0.3$) ودرست المقاومة الكهربائية R والطواعية المغناطيسية (باستخدام حقل AC) وتحت تأثير حقل ثابت DC، وكذلك قيسست الطواعية المغناطيسية (باستخدام حقل DC) وتحت تأثير حقل ثابت AC عند حقول مغناطيسية مختلفة لهذه التراكيب؛ وكذلك بنيتها البلورية باستخدام انعراج الأشعة السينية.

2. التقنية التجريبية

يتطلب تحضير عينات فائقة الناقلية خاصة مركبات الزئبق دقة كبيرة في مراحل التحضير المختلفة كلها ابتداء من مرحلة تحديد أوزان العناصر الكيميائية وخطها وما يتبع ذلك من عمليات ثانوية. وقد حُضِرَت عينة رئيسة $(Hg_x, Tl_{1-x})_2Ba_2CaCu_2O_{6+\delta}$ حيث $x=0.1, 0.2, 0.3$ باستخدام تقنية تفاعل الحالة الصلبة لخطوة واحدة. استخدمت الكميات المطلوبة من المركبات Tl_2O_3 و HgO و BaO_2 و CaO و CuO بنقاوة عالية 99.99% لتحضير العينات المدروسة، ثم خلطت وطحنت في هاون سيراميكي، ونخلت بمنخل قطره $63\mu m$ للحصول على مسحوق ناعم ومتجانس، ومن ثم كبست على شكل قرص قطره 1.4 cm وسماكته 0.2cm. ثم لف القرص بصفحة من الفضة ذات سماكة 0.1mm. وذلك لحصر بخار الزئبق والتاليوم اللذين يمكنهما التفاعل مع أنبوب الكوارتز المستخدم في عملية قفل العينات عند الضغط الجوي. وضع أنبوب الكوارتز الذي له قطر داخلي 1.6cm وطول 15cm وسماكة 2mm ونقاوة عالية تساوي 99.95%، في أنبوب معدني مصنوع من الفولاذ أحكم إغلاقه؛ وذلك لتجنب أية عملية تخريب للفرن ممكن أن تنشأ عن انفجار أنبوب الكوارتز. جرى تسخين القرص بمعدل 4 درجات/ دقيقة إلى 850 درجة مئوية مدة أربع ساعات، بعد ذلك بُرِدَ القرص بمعدل تبريد 0.5 درجة/ دقيقة. قُطِعَ القرص عدة عينات بأبعاد $2 \times 3 \times 14 \text{ mm}^3$ ، ثم جرى تثبيت أسلاك من النحاس على سطح

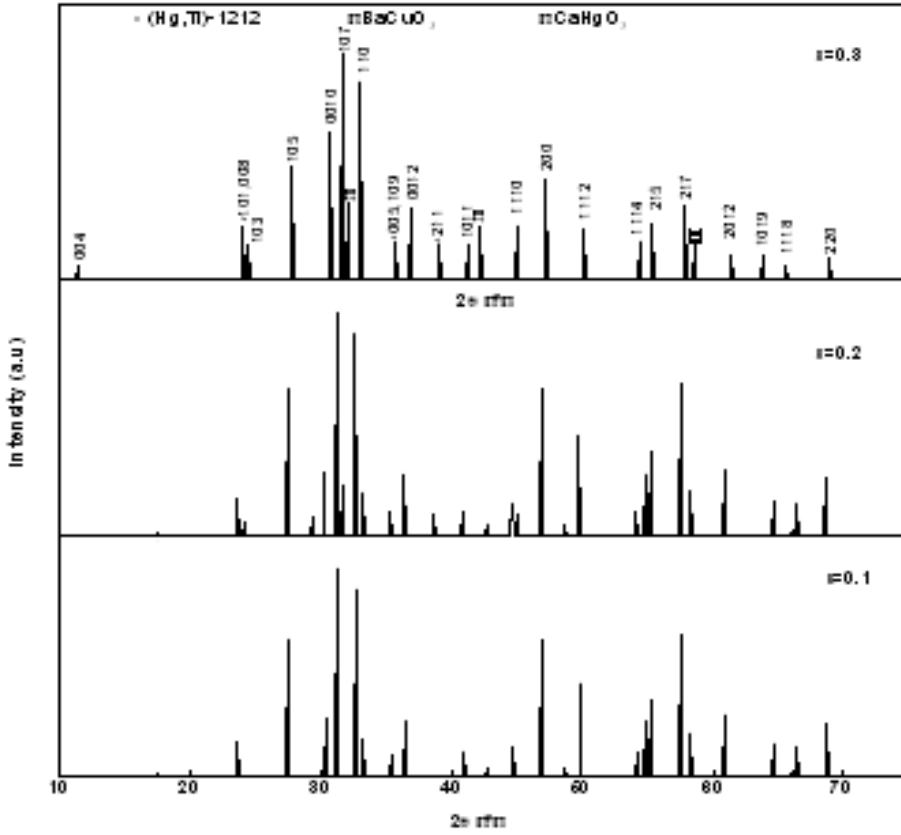
العينة باستخدام طلاء الفضة، وقيست المقاومة الكهربائية للعينات المحضرة وفقاً لطريقة النقاط الأربع. يمرر تيار شدته 5 mA من منبع تيار رقمي من نوع كيثلي 2400 على العينة ويقاس الكمون الناتج باستخدام مقياس نانوفولت عند قياس المقاومة كتابع لدرجة الحرارة، وتبرد العينة من درجة حرارة الغرفة حتى درجة حرارة 10 كلفن. استخدم نظام تبريد مغلق من إنتاج شركة كريوجينيك (Cryogenic) الذي يستخدم غاز الهليوم المضغوط كوسط للتبريد. وتم الحصول على الحقول المغناطيسية المختلفة من نظام توليد الحقل المغناطيسي فائق الناقلية من ليك شور (Lake Shore).

3. النتائج والمناقشة

درست البنية البلورية للعينات المطحونة باستخدام انعراج الأشعة السينية ويظهر الشكل (1) انعراج الأشعة السينية (XRD) للمركب $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ حيث $x=0.1, 0.2, 0.3$. وبمقارنة القمم الرئيسية في الطيف الناتج بالطيف الذي يعطيه برنامج PDP المقدم من مخبر المواد في المركز الدولي للفيزياء النظرية لتحليل الطيف المسجل ومعرفة الشكل الفراغي للعينة تبين وجود الطور $(\text{Hg}, \text{Tl})2212$ كطور أساسي في المركب وذي تبلور رباعي قائم $P4/mmm$ ويعطي الجدول (1) قيم ثوابت الشبكة هي a و c للطور $(\text{Hg}, \text{Tl})2212$ ، ونلاحظ من الجدول أن قيم a لم تتغير بتغير محتوى الثاليوم للطور $(\text{Hg}, \text{Tl})2212$ ، بينما يتناقص ثابت الشبكة c تدريجياً بازدياد محتوى الثاليوم، وهذه النتيجة هي من حقيقة أن قطر أيون الثاليوم TI^{+3} (0.88Å) أصغر مقارنةً بقطر أيون الزئبق Hg^{+2} (1.02Å) [11]. كذلك ظهرت كميات صغيرة من الأطوار $(\text{Hg}, \text{Tl})1212$ ، BaCuO_2 و CaHgO_2 كأطوار إضافية. بازدياد قيمة x فإن الطور BaCuO_2 يتحول إلى $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_5$ الذي يكون موجوداً مع طور الناقل الفائق. يرجع تشكل هذا الطور إلى ضغط بخار الزئبق العالي عند درجة حرارة التحضير. ولا يمكن تجنب ظهور كميات قليلة من الأطوار BaCuO_2 و CaHgO_2 التي تكون دائماً موجودة في النواقل الفائقة ذات الأساس الزئبقي [12].

الجدول (1) تغيرات ثوابت الشبكة "a" و "c" مع محتوى الثاليوم للعينات $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$

x	0.1	0.2	0.3
a=b (Å°)	3.8427	3.8447	3.8596
c (Å°)	29.6211	29.591	29.331



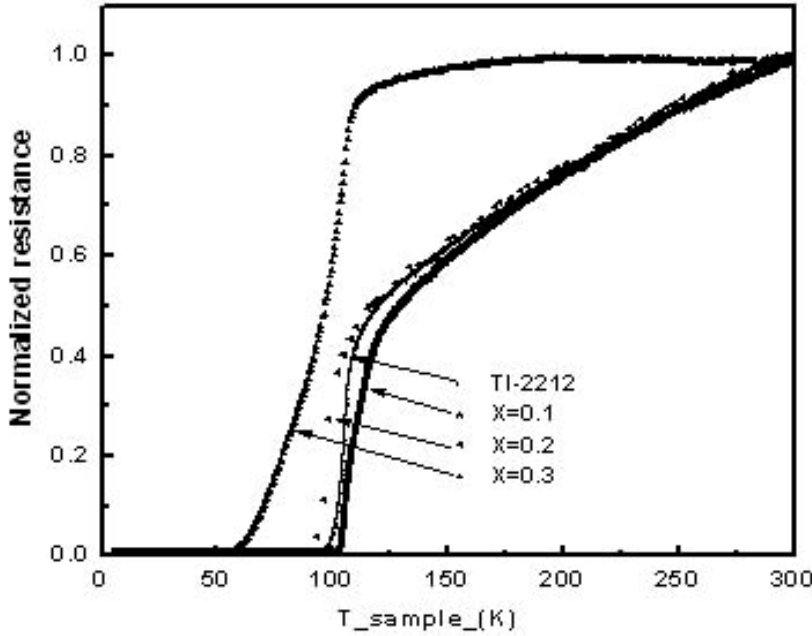
الشكل (1) طيف انعراج الأشعة السينية للعينة
($X=0.1, 0.2, 0.3$) $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$

ولمعرفة أثر الاستبدال الجزئي لأيونات Hg^{2+} بـ Tl^{2+} في الطور Hg-2212 قيست المقاومة الكهربائية باستخدام تقنية النقاط الأربع التقليدية للعينات المحضرة عند مدى درجات الحرارة من 300 كلفن حتى 10 كلفن في نظام تبريد مغلق. ويبيّن الشكل (1) تغيير المقاومة كتابع لدرجة الحرارة للعينات $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ حيث $x=0.1, 0.2, 0.3$ ، ويلاحظ أنه بزيادة محتوى التاليوم ($x=0, 0.1, 0.2$)، تظهر العينات سلوكاً معدنياً عند درجات الحرارة العالية من 300 كلفن حتى نحو 150 كلفن، ودون هذه الدرجة يبدأ الانحراف عن السلوك الخطي، ونلاحظ وجود تحسن في الناقلية حتى نسبة الإشابة 0.2. من بيانات المقاومة الكهربائية أجريت موازنة القيم التجريبية للمقاومة كتابع

لدرجة الحرارة للعينات المدروسة جميعها في مدى درجة الحرارة $150K \leq T \leq 300K$ باستخدام العلاقة التجريبية:

$$R(T) = R_0 + \beta T \quad (1)$$

حيث تمثل β ثابت المقاومة الحرارية الذي يعطي فكرة عن الناقلية العادية ويحسب من ميل العلاقة (1)، وتمثل R_0 المقاومة المتبقية عند الدرجة صفر كلفن نتيجة الاستقرار الخارجي. حُسبت قيم الثوابت β و R_0 في منطقة تأثير الفونونات التي تمثل العلاقة الخطية بين المقاومة ودرجة الحرارة. ونلاحظ من الشكل أن مقاومة درجة حرارة الغرفة تزيد بزيادة نسبة الاستبدال. وكذلك نجد أن درجة حرارة الانتقال تقل بزيادة نسبة الاستبدال؛ ويرجع ذلك إلى النقص في عدد حوامل الشحنة (الفجوات) [13]. ويظهر التقوس الصغير في المقاومة الكهربائية ($x=0.3$) فوق درجة حرارة انتقال الناقل الفائق، الذي يميّز تأرجحات أزواج كوبر (Cooper-pairs) في الناقل الفائق، أو انفتاح فجوة السبين في الناقل الفائق ذات درجات الحرارة العالية [14].



الشكل (2) المقاومة المستتظمة كتابع لدرجة الحرارة للعينات $(Hg_x, Tl_{1-x})_2Ba_2CaCu_2O_{6+\delta}$ حيث $x=0.1, 0.2, 0.3$

ويلاحظ أن سلوك المقاومة الكهربائية للعيينة $x=0.3$ ، يشبه سلوك أنصاف النواقل عند درجة الحرارة العالية في الحالة العادية، وتكون قيمة درجة حرارة التحول الابتدائية T_{onset} 110 كلفن وتصل المقاومة إلى الصفر عند 53 كلفن. ويوضح هذا السلوك طبقاً لنموذج شائبة اندرسون [15] الذي يشير إلى أن الحالات الإلكترونية قرب سطح فيرمي غير ضالة بسبب التداخل الكبير للدوال الموجية لـ $Cu(3d)$ و $O(2p)$ ، وتصبح متمركزة عندما يقل التداخل. فضلاً عن ذلك، يتوسع عرض الانتقال ΔT_c بزيادة محتوى التاليوم، نتيجة لوجود عدم التجانس الجهري في العينات؛ وكذلك بسبب الأطوار الثانوية التي تنشأ من المعالجة الحرارية [16].

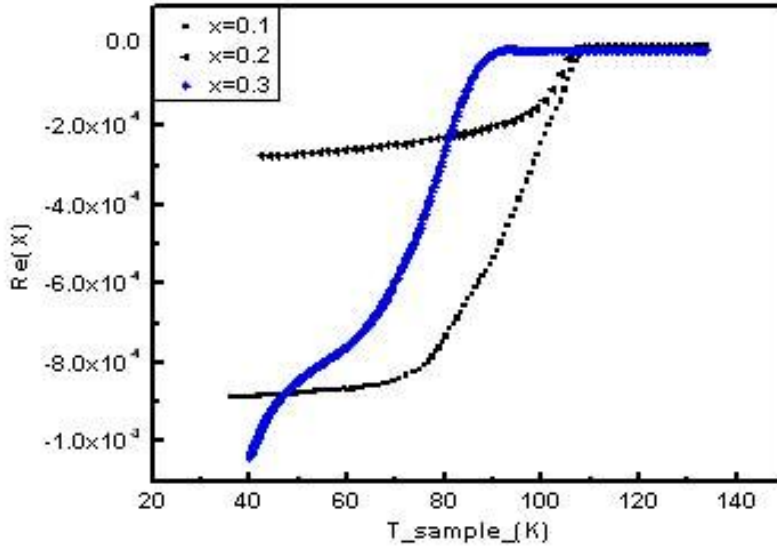
وتعدّ مقاومة الحالة العادية مقياساً للاضطراب، ويزداد هذا الاضطراب بزيادة محتوى التاليوم [17]، ومعروف أن المقاومة المتبقية تنشأ من تشتت الشوائب في المستوى $Cu-O_2$ ، وتؤدي الزيادة في قيمة R_0 بسبب زيادة محتوى التاليوم إلى زيادة تشتت الشوائب في المستوى $Cu-O_2$. ونلاحظ من الجدول (2) قيم درجة الحرارة الحرجة الابتدائية T_{onset} ، ودرجة الحرارة الحرجة الصفرية $T_{c zero}$ ، وعرض منطقة الانتقال $\Delta T = T_{onset} - T_{c zero}$ بدلالة تغيير محتوى التاليوم. نجد أن العينات (Hg, Tl)-2212 تملك درجات حرارة حرجة أكبر من الطور Tl-2212 النقي ونلاحظ أن درجة الحرارة الحرجة الابتدائية T_c لم تتغير بشكل متدرج بتغير نسبة التاليوم في مواقع الزئبق. وواضح أن درجة الحرارة الحرجة تتناقص بازدياد قيمة x . هذا يعني أن ظروف التحضير التي استخدمناها للعيينة $x=0.1$ تملك الإشابة المطلوبة، ومن أجل $x > 0.1$ فإننا نكون قد دخلنا في منطقة الإشابة الزائدة.

الجدول (2) قيم درجة الحرارة الحرجة الابتدائية T_{onset} ، درجة الحرارة الحرجة الصفرية $T_{c zero}$ وعرض منطقة الانتقال DT للعينات $(Hg_x, Tl_{1-x})_2Ba_2CaCu_2O_{6+\delta}$.

x	R(300) Ω	R_0 (Ω)	β ($m\Omega K^{-1}$)	T_{onset} (K)	$T_{c zero}$ (K)	DT (K)
0	0.47827	0.24039	0.0026	113	97	16
0.1	0.0894	0.25601	0.00254	115	103	12
0.2	0.1786	0.25811	0.00256	110	93	17
0.3	0.23829	0.97822	5.4999e-5	110	53	57

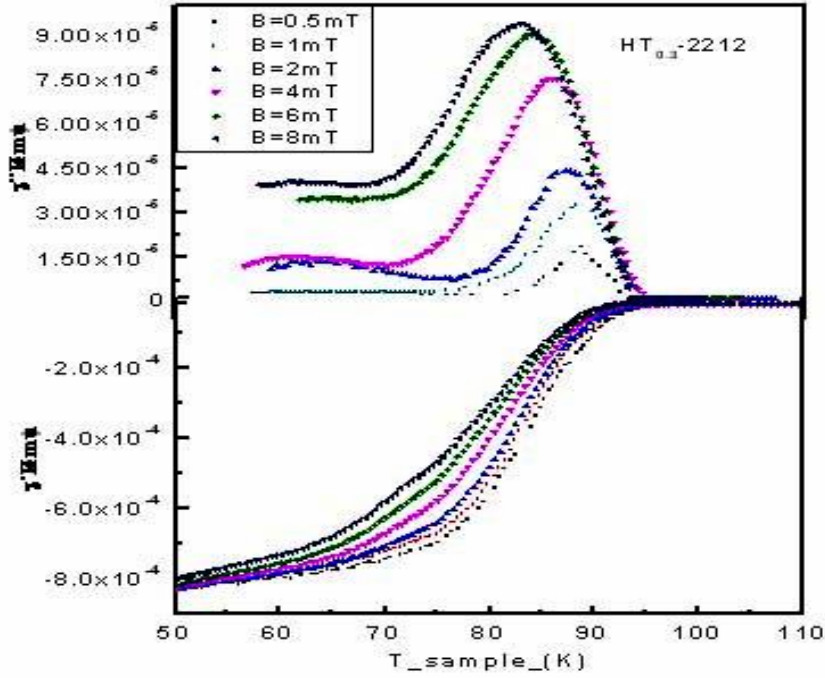
يظهر الشكل (3) الجزء الحقيقي للطواعية المغناطيسية χ' كتابع لدرجة الحرارة للعينات $(Hg_x, Tl_{1-x})_2Ba_2CaCu_2O_{6+\delta}$ حيث $x=0.1, 0.2, 0.3$. ويلاحظ أن تغيرات الطواعية للعينات كلها حادة بما فيه الكفاية لتحديد T_c عندما تتغير χ' من القيم الموجبة الصغيرة إلى القيم السالبة. كذلك تظهر χ' تناقصاً سريعاً لوضع درجات تحت T_c ، بعد ذلك يكون التناقص بطيئاً حتى تبلغ المادة إلى حالة المغناطيسية المعاكسة التامة (perfect diamagnetism). ويعين الهبوط الأول لـ χ' درجة الحرارة الابتدائية للناقل الفائق فيما بين الحبيبات بعضها بعضاً (intragrains) دالاً على وجود مناطق ذات ناقلية عادية على حدود الحبيبات. في

حين يشير الهبوط الثاني ($x=0.3$) عند درجات الحرارة المنخفضة إلى الناقلية الفائقة داخل الحبيبات ذاتها (intergrains). ويتضح أن المغناطيسية المعاكسة مسيطرة أكثر من أجل الناقلية الفائقة عند الإشابة المثالية 0.1، كما هو واضح من الشكل (3).



الشكل (3) الجزء الحقيقي للطواعية المغناطيسية DC ($B=0$) كتابع لدرجة الحرارة للعينات $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ حيث $x=0.1, 0.2, 0.3$

ويبين الشكل (4) الجزء الحقيقي والتخيلي للطواعية المغناطيسية المتناوبة ac كتابع لدرجة الحرارة للعيينة $(\text{Hg}_{0.3}, \text{Tl}_{0.7})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ عند حقول مغناطيسية متناوبة مختلفة تطبق على العينة. تظهر هذه العينة انتقالاً حاداً، ويظهر اتساع صغير في منطقة الانتقال كما هو موضح بالشكل (4). ويوضح الشكل أيضاً تأثير الحقل المغناطيسي المطبق في منحنيات $T - \chi''$ ، إذ نلاحظ انزياح القمم لـ χ'' باتجاه درجات حرارة منخفضة عند زيادة الحقل المغناطيسي المتناوب إلى قيم أعلى، إذ تعمل زيادة قوة الحقل المغناطيسي الخارجي على تحسين القوة المغناطيسية في الحبيبات، التي تعمل على زيادة مراكز التجميد بين الحبيبات (intra-grain) بسبب نقص الكسر الحجمي للناقل الفائقة، هناك. عندما تزيد قوة الحقل المطبق تنزاح T_p إلى القيم درجات الحرارة المنخفضة، يرجع ذلك إلى أن زيادة الكسر الحجمي للتجميد عند المواقع بين الحبيبات يقلل من الكسر الحجمي للناقل الفائقة.



الشكل (4) الجزء الحقيقي والتخيلي للطواعية المغناطيسية المتناوبة ac كتابع لدرجة الحرارة للعينة $(\text{Hg}_{0.3}, \text{Tl}_{0.7})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$.

يمكن حساب قيم كثافة التيار الحرج J_c من منحنيات $T - \chi''$ كما في الشكل (5). إذ تأخذ القيمة العظمى عندما يخنرق حجم الناقل الفائق كله بالحقل المطبق، ذلك يكون عندما يكون تيار الحجب مساوياً لسعة حاملات التيار (الفجوات) أو التيار الحرج للحجم. وهكذا فإن قيمة J_c عند درجة الحرارة للقمة العظمى الموافقة لـ χ'' يكون الحقل H_p (هو حقل الاخنراق) قد اخنرق العينة بشكل كامل عند درجة حرارة الاخنراق T_p ، وهذا الحقل سوف يصل إلى مركز العينة. بناء على نموذج الحالة الحرجة لبين (Bean) تعطى العلاقة بين كثافة التيار الحرج J_c عند درجة الحرارة T_p مع الحقل H_p بالعلاقة الآتية [18]:

$$J_c = \frac{B_p}{\mu_0 r} \quad (2)$$

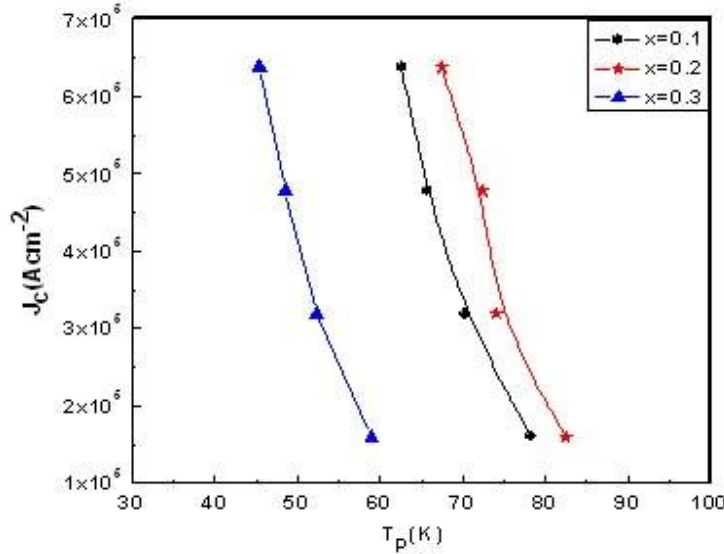
حيث r متوسط نصف قطر الحبيبة ويساوي 25 ميكرومتراً. وباستخدام العلاقة (3) حُسبت كثافة التيار الحرج من موضع القمة في القسم التخيلي χ'' للطواعية المغناطيسية.

أُجريت أيضاً مطابقتاً نتائج كثافة التيار الحرج كتابع لدرجة الحرارة للعينات المدروسة بالعلاقة التجريبية:

$$J_c(T) = J_c(0) \left\{ 1 - \frac{T_p}{T_c} \right\}^\alpha \quad (3)$$

إذ تمثل $J_c(0)$ كثافة التيار الحرج عند درجة حرارة صفر كلفن، و α الأس الحرج و T_c درجة الحرارة الحرجة للناقل الفائق. وجميعها معطاة بالجدول (3) من أجل العينات المدروسة جميعها. وبتطبيق المعادلة (3) يمكن الحصول على كثافة التيار الحرج بأخذ $\ln J_c$ و $\ln(1-T_p/T_c)$ إذ تمثل α قيمة الميل والجزء المقطوع هو عبارة عن $J_c(0)$.

وتشير بيانات الجدول (3) إلى أن قيم T_c التي حصلنا عليها من قياسات الطواعية المغناطيسية قريبة جداً من القيم التي حصلنا عليها من نتائج العلاقة (3). وتكون قيم الأس الحرج مساوية تقريباً 3. وهذه القيمة لا تختلف كثيراً عن قيم α في النواقل الفائقة الأخرى. ونلاحظ زيادة كثافة التيار الحرج بزيادة محتوى الثاليوم عند درجة حرارة صفر كلفن. ومن المحتمل أن السبب في الزيادة هي العيوب الشبكية الناتجة عن الاستبدال الجزئي لايونات Hg^{2+} بـ Tl^{2+} الذي يؤدي بدوره إلى تحسن تجمد التدفق (flux pinning)

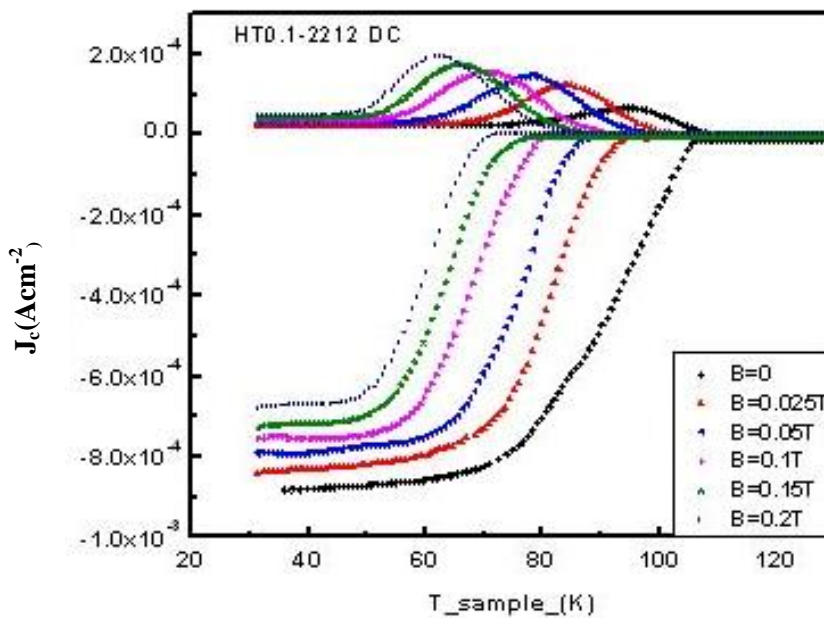


الشكل (5) كثافة التيار الحرج DC كتابع لدرجة الحرارة للعينات $(Hg_x, Tl_{1-x})_2Ba_2CaCu_2O_{6+\delta}$ حيث $x=0.1, 0.2, 0.3$

الجدول (3) قيم درجة الحرارة الحرجة T_c وكثافة التيار الحرج $J_c(0)$ والأس الحرج α للعينات $(Hg_x, Tl_{1-x})_2Ba_2CaCu_2O_{6+\delta}$

x	$T_c(K)$ (susceptibility)	$J_c(0) \times 10^6 (Acm^{-2})$	الأس الحرج α
0.1	108.5	8.34	3.1
0.2	107	11.5	2.9
0.3	90.8	9.48	3.9

أيضاً تقاس الطواعية المغناطيسية AC بتطبيق حقول مغناطيسية DC. ويبين الشكل (6) الجزء الحقيقي χ' والتخيلي χ'' للطواعية المغناطيسية المتناوبة AC للعينات $(Hg_{0.1}, Tl_{0.9})_2Ba_2CaCu_2O_{6+\delta}$ عند حقول مغناطيسية مختلفة DC. ويلاحظ أيضاً من الشكل (6) أن درجة الحرارة الحرجة وحجم مايسنر المغناطيسي المعاكس يتغير إلى القيم المنخفضة كلما زاد الحقل المغناطيسي DC. في حين تقل χ'' عند درجات الحرارة المرتفعة وتصل إلى قيمة عظمى عند درجات الحرارة المنخفضة بزيادة الحقل المغناطيسي الخارجي.



الشكل (6) الجزء الحقيقي χ' والتخيلي χ'' للطواعية المغناطيسية المتناوبة AC للعينات $(Hg_{0.1}, Tl_{0.9})_2Ba_2CaCu_2O_{6+\delta}$ عند حقول مغناطيسية مختلفة DC.

5. الاستنتاجات

- 1- دُرِس أثر الاستبدال الجزئي للزئبق بالتاليوم في الطور الفائق الناقلية للكهرباء $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{\delta+6}$ حيث $x=0.1, 0.2, 0.3$. وقد حُضِرَت العينات في أنابيب كوارتز محكمة الإقفال مستخدمين تقنية تفاعل الحالة الصلبة بخطوة واحدة.
- 2- بُحِث أثر الاستبدال الجزئي في العينات المحضرة باستخدام حيود الأشعة السينية وقياسات المقاومة الكهربائية والطواعية المغناطيسية AC و DC.
- 3- دلت نتائج الإحلال الجزئي لأيونات Hg^{2+} بـ Tl^{2+} على حدوث تغيير في قيم كل من $T_{\text{c zero}}$ و T_{onset} ، وكذلك عرض منطقة الانتقال للعينات المدروسة.
- 4- حُسِبَت كثافة التيار الحرج، من موضع القمة من منحنيات الجزء التخليبي للطواعية المغناطيسية كتابع لدرجة الحرارة، ومن ثم أُجريت مطابقة النتائج مع العلاقة التجريبية (3) ومن هذه المطابقة عيَّنت الثوابت كثافة التيار الحرج عند صفر كلفن $J_c(0)$ والأس الحرج α .

REFERENCES المراجع

- [1] Ambrosch-Draxl C., Thonhauser T., and Sherman E. Ya. 2008. The role of doping and pressure in Hg based high Tc cuprates: A theoretical study, *Current Applied Physics* 8, pp 149–152
- [2] Kayed TS, Qasrawi AF. 2005. Temperature and magnetic field effects on the carrier density and Hall mobility of boron-doped Tl-Ba-Ca-Cu-O superconductor. *Journal of Alloys and Compounds*, 402, pp. 5–11
- [3] James R. Tobin. 2008. Superconductivity research developments. Published by Nova Science Publishers, Inc. New York.
- [4] Shivagan. D. D, Shirage, P. M, Crisan, A., Tanaka, Y., A. Iyo., Tokiwa, K., Watanabe. T., Terada. N. 2008. AC-Susceptibility study on vortex-molecule lattice in supermultilayer cuprate. $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2+d}$ ($n=14$)/ *Physica, C* 468, pp.1281–1286
- [5] Thopart, D., Hejtmanek, J. Pelloquin, D. Martin, C. and Maignan, A. 2000. New Tl₁Hg-2212 and -2223 superconducting crystals: growth, structures and superconductivity. *Physica, C* 336, pp.143–150.
- [6] Kandyel. E, Wu. X. -J, Adachi. S, Tajima. S. 1999. New Tl–Sr–Ca–Cu–O superconductor with 2223-type structure stabilized by mercury under high-pressure. *Physica, C* 328, pp 44–52
- [7] Awad, R. Abou-Aly, A. I. Ibrahim, I. H. El-Korek, M. Isber, S. Faraj, A. 2008. Superconducting properties of zinc substitution in. Tl-2223 phase. *Journal of Alloys and Compounds*, 460, pp.500–506.
- [8] M. Roumie, R. Awad, I. H. Ibrahim, A. Zein, K. Zahraman, and B. 2008. Nsouli. PIXE and RBS analysis of Tl-1223 superconducting phase substituted by scandium. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* 266, pp.133–139.
- [9] Wang. X. L., H. K. Liu, S. X. Dou, Horvat. J., Millikon. D., Heine .G., Lang. S., Luo. H.M., Ding. S. Y., Appl. J. 2001. Superconductivity and flux pinning in Y and heavily Pb codoped Bi-2212 single crystals, *Phys.* 89, pp.7669.
- [10] Abou-Aly. A. I, Awad. R, Ibrahim. I. H, and Abdeen. W. 2009. Effect of Sm-substitution on the electrical and magnetic properties of (Tl_{0.8}Hg_{0.2})-1223. *Journal of Alloys and Compounds*, 481, pp 462–469.
- [11] Hur. H., Kim. H., lee. W., Park. K. and Park. C. 1994. Synthesis of a Sr-doped $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{0.86}\text{Sr}_{0.14}\text{Cu}_2\text{O}_{6+\delta}$ superconductor using ternary oxide precursors., *Physica, C* 231,4.
- [12] Parthoman. M. 1994. Single-step synthesis of bulk $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_3\text{O}_8$,. *Physica, C* 222, pp.7.
- [13] Khosroabadi, H. Daadmehr, V. and Akhavan, M. 2003. Magnetic transport prop-erties and Hall effect in $\text{Gd}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ system. *Physica, C* 384, pp. 169–177.
- [14] Koo. J. H., Cho. G. J. 2003. The spin-gap in high Tc superconductivity. *Phys. Condens. Matter*, 15, L729.
- [15] Eskes. H., Sawatzky. G. A. 1988. Effective transfer for singlets formed by hole doping in the high-z', superconductors *Phys. Rev. Lett.* 61, pp, 1415.
- [16] Jayaram. B., Lanchester. P.C., Weller. T. 1991. Localization and interaction effects during superconductor-insulator transition of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Cu}_2\text{O}_{8+d}$, *Phys Rev. B* 43, pp.5444.
- [17] Singhm. S. 1998. Suppression of superconductivity in Sm and Co substituted Bi Sr Ca Cu O system., *Physica, C* 294 pp,249.
- [18] Bean. C P. 1964. Magnetization of high-field superconductors *Rev. Mod. Phys.* 36, pp. 9– 31