

تغير الناقلية الكهربائية في الناقل الفائق $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{\delta+6}$

بليقيس حسن مدد⁽¹⁾ و محمد عبد الحفيظ⁽¹⁾ و محمد علي الحجي⁽²⁾

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

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

تاريخ الإيداع 2011/03/13

قبل للنشر في 2011/08/22

الملخص

تعدّ مركبات (Hg, Tl) -2212 $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{\delta+6}$ التي تملك خاصية الناقلية الفائقة من المركبات ذات درجة الحرارة العالية مقارنة بمركبات YBCO ومن المفيد تسليط الضوء على تغير الناقلية الكهربائية لهذه المواد عند بلوغ درجة الحرارة الحرجة والدخول بطور الناقلية الفائقة. فلذا قمنا في هذا البحث بتحضير مركبات فائقة الناقلية $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{\delta+6}$ على قاعدة الزنبق إذ $x = 0.1, 0.2, 0.3$ باستخدام تقنية تفاعل الحالة الصلبة بخطوة واحدة في أنابيب كوارتز محكمة الإغلاق. ودُرست العينات المحضرة باستخدام حيود الأشعة السينية وقياسات المقاومة الكهربائية $R(T)$. وقد دلت نتائج قياس اتعراج الأشعة السينية أن العينة تملك طوراً رئيسياً هو (Hg, Tl) -2212 ذات تبلور معيني قائم وضمن المجموعة البنيوية $P/4mmm$. قيست المقاومة الكهربائية للمركبات كتابع لدرجة الحرارة باستخدام تقنية النقاط الأربع التقليدية في مجال درجات الحرارة 10-300 كلفن. ودُرست تغير الناقلية $(\Delta\sigma)$ فوق درجة الحرارة الحرجة T_c كتابع لدرجة الحرارة باستخدام نظرية اسلمزوف - لاركن (Aslamazov-Larkin) ولوحظ خمس مناطق تغيرات مختلفة تتمثل في: المنطقة الحرجة cr ، المنطقة ثلاثية الأبعاد 3D، منطقة ثنائية البعد 2D ومنطقة أحادية البعد 1D ومنطقة التغير ذي الموجة القصيرة (sw) على الترتيب.

الكلمات المفتاحية: ناقل فائق، تفاعل الحالة الصلبة، تغير الناقلية، درجة حرارة الحرجة، نظرية اسلمزوف - لاركن.

Fluctuation of the electrical conductivity in (Hg_xTl_{1-x})₂Ba₂CaCu₂O_{δ+6} superconductor

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 13/03/2011

Accepted 22/08/2011

ABSTRACT

(Hg, Tl) - 2212 is high temperature superconductor; it has high critical temperature more than other like YBCO. It is useful to focusing on the fluctuation of conductivity $\Delta\sigma$ for this material for achieving critical temperature and becoming a superconductor. So in this research mercury based superconducting samples of type (Hg_xTl_{1-x})₂ Ba₂CaCu₂O_{δ+6}, where $x = 0.1, 0.2, 0.3$ were prepared, in a sealed quartz tube, by a single step solid-state reaction technique. The prepared samples were investigated using X-ray powder diffraction and electrical resistance. 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 fluctuation conductivity, above the superconducting transition temperature T_c , was analyzed as a function of temperature using the Aslamazov and Larkin theory. It exhibits five different fluctuation regions, namely critical (cr), three-dimensional (3D), two-dimensional (2D), one-dimensional (1D) and short-wave (sw).

Key words: Superconductor, Solid-state reaction, Fluctuation conductivity, Transition temperature, Aslamazov and Larkin theory.

المقدمة

تعدّ المواد فائقة الناقلية على قاعدة الزئبق $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2+\delta}$ إذ $n = 1, 2, 3, \dots$ موضوعاً شيقاً للدراسة، تمتلك هذه المواد أعلى درجة حرارة انتقال T_c معروفة حتى اليوم من بين النواقل الفائقة التي تحتوي على النحاس جميعها. وكما هو معروف في دراسة الناقلية الفائقة، بسبب عدم التناحي القوي في الاتجاهات، وارتفاع درجة الحرارة الحرجة وانخفاض تركيز حوامل الشحنة، فإن الترجّحات الحرارية في الناقل الفائق (فوق درجة الحرارة الحرجة) تؤدي دوراً مهماً في تفسير خصائص الحالة العادية للنواقل الفائقة عند درجات حرارة الحرجة العالية، وتؤدي الشروط السابقة نفسها أيضاً دوراً مهماً عندما ندرس الناقلية الفائقة وفق بعد واحد أو بعدين أو ثلاثة أبعاد. تؤدي الترجّحات الحرارية في النواقل الفائقة عند درجات حرارة أعلى من درجة الحرارة الحرجة إلى تشكيل أزواج كوبر وهو بدوره يزيد الناقلية الكهربائية (وهو ما يدعى أيضاً الناقلية الكهربائية المسايرة paraconductivity) [2,1]. التفسير الأساسي لمنحنى المقاومة الكهربائية كتابع لدرجة الحرارة قرب درجة حرارة الانتقال وفوقها هو أن التغيرات الحرارية يمكن أن تؤدي إلى تشكل أزواج كوبر (Cooper pairs) قصيرة الأجل، ينتج عنها لاحقاً زيادة واضحة في الناقلية. وقد درست بشكل موسع عدة مجموعات بحثية أمثال اسلمزوف - لاركن [3] (AL) Aslamazov-Larkin، ماكي - تومسون (MT) Maki-Thompson، لورانس - دونياش (LD) Lawrence-Doniach وهكمي - لاركن (HL) Hikami-Larkin [4, 5, 6]، تأثر الناقلية الكهربائية بالترجّحات الحرارية في النواقل الفائقة ذات درجة الحرارة الحرجة العالية، إذ لوحظت زيادة كبيرة في الناقلية عند درجات حرارة أعلى من درجة الحرارة الحرجة ناتجة عن الترجّح الحراري في الناقل الفائق، التي أعطت اهتماماً كبيراً وخصوصاً عندما تتعلق بالبعديّة للناقلية الفائقة. والتحليل الأكثر شيوفاً لزيادة الناقلية الكهربائية في مواد النقل الفائق ذات درجات الحرارة الحرجة العالية (HTSC) في مختلف النظريات يتركز أساساً على بحث العبور (انتقال لورانس - دونياش LD) عند الانتقال من ترجّحات حرارية ثلاثية البعد (3D) إلى ترجّحات حرارية ثنائية البعد (2D)، وتحدث هذه الظاهرة عند درجة T_{LD} ، عند الانتقال من درجات الحرارة المنخفضة إلى درجات الحرارة المرتفعة، [7,8].

بعد عدم التناحي في الخواص سمة رئيسية للنواقل الفائقة ذات درجات الحرارة الحرجة العالية، فمثلاً تتحرك الإلكترونات بشكل أكثر استقراراً في اتجاه ما أكثر من اتجاهات أخرى. وكذلك تبدي الإلكترونات في المواد بعض القابلية للحركة عبر المستويات الجزيئية في المواد ضمن مدى معين من درجات الحرارة. ضمن هذا المدى من درجات الحرارة تكون فيها التغيرات الحرارية أكثر وضوحاً. وعند التبريد إلى درجة حرارة منخفضة فإن الإلكترونات تتحرك منقولة عبر المستويات الجزيئية من واحد إلى

آخر، وهو ما نسميه الحركة الثلاثية الأبعاد. وبعد ذلك تتأثر الإلكترونات بشكل أكبر بالترجّحات الحرارية، وهذا يعني أن الإلكترونات تسعى للحركة بشكل أكثر حرية بكامل البنية البلورية قبل أن تصنع الأزواج (Cooper pairs) (عند درجات حرارة أعلى بقليل من قيمة T_c).

هَدَف هذا العمل إلى دراسة سلوك الترجّح الحراري فوق درجة حرارة انتقال الناقل الفائق وإعطاء تحليل مفصل لمقاومة درجة الحرارة الابتدائية للناقلية الفائقة. ومناقشة مقياس السلوك والملاحظات والمتغيرات المختلفة.

طريقة التحليل

يمكن حساب التغير في الناقلية باستخدام العلاقة [7,9]:

$$\frac{\Delta\sigma(T)}{\sigma_0} = \sigma_m(T) - \sigma_n(T) \quad (1)$$

إذ تمثل $\sigma_m(T)$ الناقلية المقیسة، و $\sigma_n(T)$ تمثل ناقلية الحالة العادية و σ_0 الناقلية العادية عند درجة حرارة الغرفة، والناقلية عبارة عن مقلوب المقاومة النوعية ويمكن التعبير عن العوامل الهندسية الشائعة لكل من $\sigma_m(T)$ و $\sigma_n(T)$ عن طريق المقاومة المقیسة مباشرة R ، وذلك كالآتي:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\sigma(T)}{\sigma_0} &= \left[\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_n} \right] \\ &= R_n(300) \left[\frac{1}{R_m(T)} - \frac{1}{R_n(T)} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

إذ تمثل $R_m(T)$ المقاومة المقیسة و $R_n(T)$ تمثل مقاومة الحالة العادية التي استُنتجت بالمطابقة في المنطقة الخطية عند مدى درجة الحرارة $2T_c \leq T \leq 300$ ، طبقاً للمعادلة:

$$R_m(T) = R_0 + \beta T \quad (3)$$

إذ تمثل β ثابت المقاومة الحرارية الذي يعطي فكرة عن الناقلية العادية، وبحسب من ميل العلاقة (3) عند مدى درجة الحرارة من 300 كلفن إلى $2T_c$ ، و تمثل R_0 المقاومة المتبقية عند الدرجة صفر كلفن نتيجة الاستقرار الخارجي. حيث تمتلك العينة منطقتي تدرج، تبدأ الأولى من 300 كلفن وتنتهي عند $2T_c$ ، في حين تبدأ المنطقة الثانية من $2T_c$ وتنتهي عند مستهل درجة حرارة الانتقال الحرجة T_c . بناء على نظرية (AL) تعطى الزيادة في الناقلية الفائقة ($\Delta\sigma$) بالعلاقة الآتية [11, 10]:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} = A \varepsilon^\lambda \quad (4)$$

إذ تمثل σ_0 الناقلية العادية عند درجة حرارة الغرفة و ϵ درجة الحرارة المختزلة (reduced temperature) $(\epsilon = \frac{T-T_c}{T_c})$ ، ويمثل λ وهو الأس الحرج قيمة مختلفة باختلاف الحالات المدروسة ويساوي:

$$\lambda = \begin{cases} -0.3 & \text{For (cr)} \\ -0.5 & \text{For (3D)} \\ -1.0 & \text{For (2D)} \\ -1.5 & \text{For (1D)} \\ -3.0 & \text{For (sw)} \end{cases} \quad (5)$$

كما أن للثابت A قيمة مستقلة عن درجة الحرارة تعطى كالاتي:

$$A = \begin{cases} \frac{e^2}{32\hbar\xi(0)\sigma_{room}} & \text{For A(3D)} \\ \frac{e^2}{16\hbar d\sigma_{room}} & \text{For A(2D)} \\ \frac{e^2\xi(0)}{32\hbar s\sigma_{room}} & \text{For A(1D)} \end{cases} \quad (6)$$

إذ $\xi(0)$ طول الترابط عند درجة حرارة الصفر وفق المحور c، و d سمك الطبقة الفعالة ذات الناقلية الفائقة للمنظومة ثنائية البعد 2D، و s مساحة المقطع العرضي للمنظومة أحادية البعد 1D. من ناحية أخرى مقارنة بالناقل الفائقة التقليدية، يلاحظ من سلوك المقاومة كتابع لدرجة الحرارة للناقل الفائقة ذات درجة الحرارة العالية الانحراف من سلوك الحالة العادية المعدني عند بداية التبريد عند درجات حرارة أعلى من درجة الحرارة الحرجة T_c . وفي أعمال أخرى لأنظمة مختلفة من الناقل الفائقة تظهر الناقلية الزائدة ($\Delta\sigma$) السلوك العام نفسه كما في نظام البزموت [12,10] ونظام LBCCO [13] الذي يظهر سلوك تغير الناقل الفائق للحالة ثنائية البعد 2D و Y123 [15,14] الذي يظهر الانتقال من حالة ثنائية البعد 2D إلى حالة ثلاثية البعد 3D مع انخفاض درجة الحرارة. ويظهر (Hg,Tl)1223 كلاً من الانتقال من 3D - 2D و 2D - 1D [9,11].

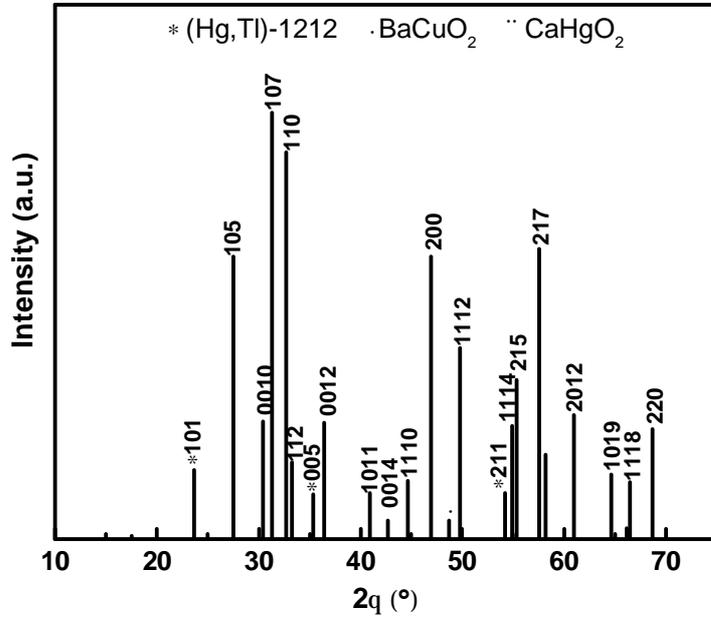
التقنية التجريبية

يتطلب تحضير عينات فائقة الناقلية دقة كبيرة في مراحل التحضير المختلفة كلاً ابتداء من مرحلة تحديد أوزان العناصر الكيميائية وخطها وما يتبع ذلك من عمليات ثانوية. وقد حُضرت عينات رئيسية $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ ، إذ $x=0.1, 0.2, 0.3$ باستخدام تقنية

تفاعل الحالة الصلبة لخطوة واحدة. استخدمت الكميات المطلوبة من المركبات Ti_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 $63\mu\text{m}$ للحصول على مسحوق ناعم ومتجانس، ومن ثم كبست على شكل قرص قطره 1.4 cm وسماكته 0.2cm . ثم لف القرص بصفيحة من الفضة ذات سماكة 0.1mm . وذلك لحصر بخار الزئبق والناليوم اللذين يمكنهما التفاعل مع أنبوب الكوارتز المستخدم في عملية قفل العينات عند الضغط الجوي. وضع أنبوب الكوارتز الذي له قطر داخلي 1.6cm وطول 15 cm وسماكة 2mm ونقاوة عالية تساوي 99.95%، في أنبوب معدني أحكم إغلاقه، وذلك لتجنب أية عملية تخريب للفرن ممكن أن تنشأ عن انفجار أنبوب الكوارتز. سُخن القرص بمعدل 4 درجات/دقيقة إلى 850 درجة مئوية مدة أربع ساعات، بعد ذلك بُردَ القرص بمعدل تبريد 0.5 درجة/دقيقة. قُطع القرص لعدة عينات بأبعاد $2 \times 3 \times 14\text{mm}^3$ ، ثم تُبنت أسلاك من النحاس على سطح العينة باستخدام طلاء الفضة وقيست المقاومة الكهربائية للعينات المحضرة وفقاً لطريقة النقاط الأربع. مرر تيار شدته 5 mA من منبع تيار رقمي من نوع كيتلي 2400 على العينة وباستخدام مقياس نانوفولت عند قياس المقاومة كتابع لدرجة الحرارة، وُبردت العينة من درجة حرارة الغرفة حتى درجة حرارة 10 كلفن باستخدام نظام تبريد مغلق من إنتاج شركة كريوجينيك (Cryogenic) الذي يستخدم غاز الهليوم المضغوط كوسط للتبريد.

النتائج والمناقشة

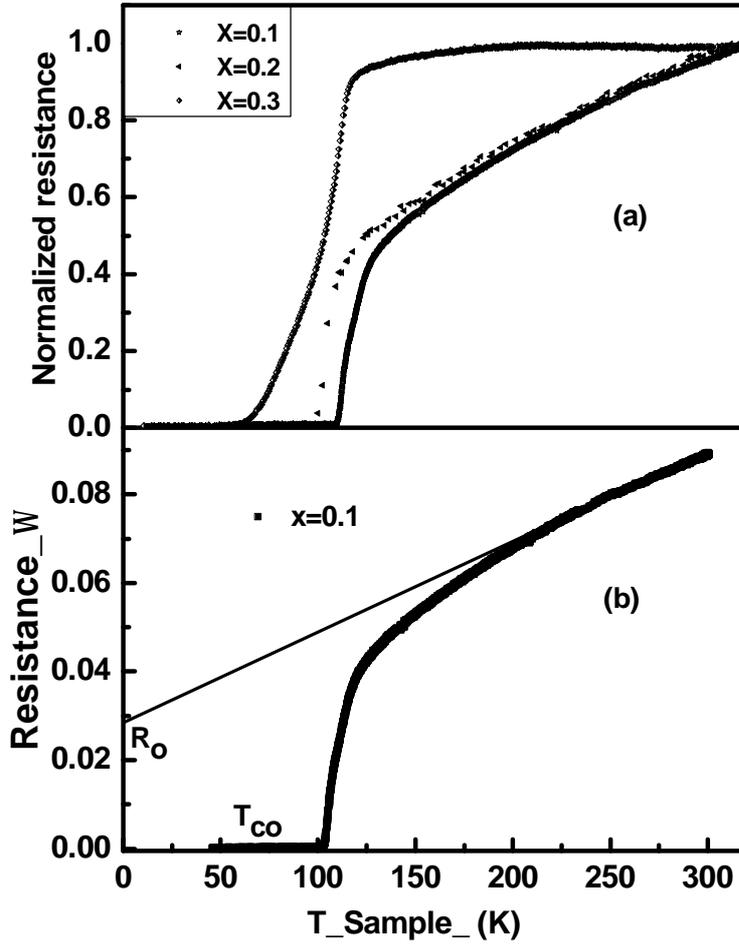
دُرست البنية البلورية للمادة المحضرة بواسطة مطيافية XRD للتأكد من الأطوار المتشكلة تبعاً لشروط التحضير، وبهدف تحديد الثوابت الفيزيائية للشبكة البلورية وشكل التبلور لها. وبيّن الشكل (1) انعراج الأشعة السينية (XRD) للعينة المطحونة $(\text{Hg}_{0.1}, \text{Ti}_{0.9})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$. وبمقارنة القمم الرئيسية في الطيف الناتج مع الطيف الذي يعطيه برنامج PDP المقدم من مخبر المواد في المركز الدولي للفيزياء النظرية لتحليل الطيف المسجل، ومعرفة الشكل الفراغي للعينة تبين وجود الطور $(\text{Hg}, \text{Ti})2212$ كطور أساسي في المركب وذات تبلور رباعي قائم $P4/mmm$ وبقيم لوسطاء الشبكة هي $a = 3.8427\text{ \AA}$ و $c = 29.6211\text{ \AA}$. فضلاً عن كميات صغيرة من الأطوار BaCuO_2 ، CaHgO_2 كشوائب رئيسية التي تكون دائماً موجودة في النواقل الفائقة ذات الأساس الزئبقي [16]. وأطوار أخرى من نحاسيات الثاليوم مثل Ti-1212 التي تظهر في تحضير الطور Ti-2212 .



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

قيست المقاومة الكهربائية باستخدام تقنية النقاط الأربع التقليدية عند مجال درجات الحرارة من 300 كلفن حتى 10 كلفن للعينات المحضرة جميعها في نظام تبريد مغلق. ويبيّن الشكل (2,a) تغيير المقاومة المنتظمة كتابع لدرجة الحرارة للعينات $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ إذ $x=0.1, 0.2, 0.3$ ، ونلاحظ أن العينات تملك منطقتي تدرج، تبدأ الأولى من 300 كلفن وتنتهي عند 250 كلفن، في حين تبدأ المنطقة الثانية من 250 كلفن، وتنتهي عند مستهل درجة حرارة التحول الابتدائية T_{onset} ، ويكون في هذا المدى السلوك غير خطي للناقلية ونلاحظ وجود زيادة في الناقلية.

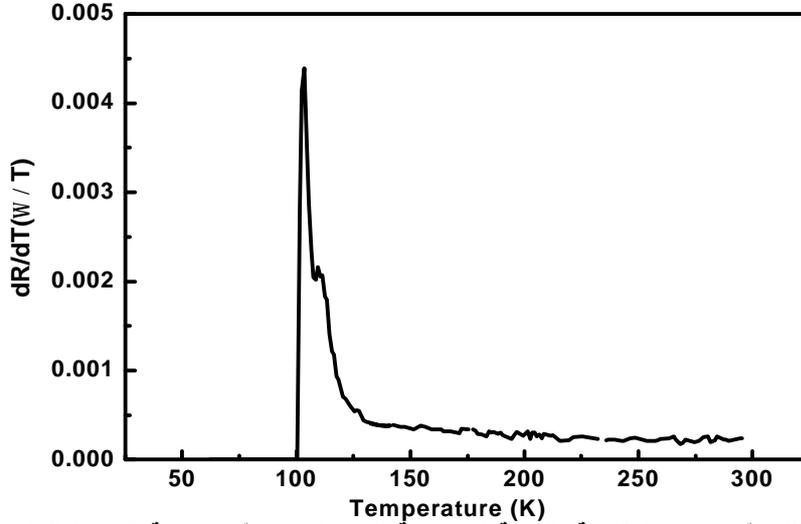
اختبرت العينة $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ إذ $x=0.1$ لاستكمال البحث نظراً إلى تمتعها بدرجة حرارة حرجة أعلى وسلوك عام أفضل، لذلك فإن الحديث سينصب على العينة $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ عندما $x=0.1$ الموضحة في الشكل (2,b)، حيث تظهر المقاومة علاقة خطية مع درجة الحرارة في المجال من 300 كلفن حتى نحو 250 كلفن، ودون هذه الدرجة يبدأ الانحراف عن السلوك الخطي. ويلاحظ ظهور انحراف واضح عند 175 كلفن، ويزيد هذا الانحراف مع انخفاض درجة الحرارة. ويحدث هبوط سريع في المقاومة عند 115 كلفن على شكل انتقال حاد، وتتعدم المقاومة عند 103 كلفن.



الشكل (2) (a) المقاومة المستنظمة كتابع لدرجة الحرارة للعينات $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ إذ $x=0.1, 0.2, 0.3$ (b) سلوك انتقال المقاومة المقيسة والمقاومة المستنظمة في حالة السلوك العادي، المطابقة الخطية للمقاومة في مدى درجة الحرارة 200-300 والمستنظمة حتى 0 كلفن التي تعطى الميل β والمقاومة المتبقية R_0 للعينة $(\text{Hg}_x, \text{Tl}_{1-x})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ إذ $x=0.1$.

وبأخذ امتداد تغير المقاومة כתابع لدرجة الحرارة في المجال الحراري 250-300 كلفن قاطعاً المحور R فإننا نجد أن قيمة R_0 الافتراضية فيما لو كانت العينة ذات سلوك معدني كامل. ويمكن الحصول على الزيادة في الناقلية من قياسات المقاومة $R(T)$ بطرح الناقلية في الحالة العادية $\sigma_n(T)$ من الناقلية المقيسة $\sigma_m(T)$ عند درجات الحرارة القريبة من T_c وفق العلاقة (2). جرت مطابقة نتائج المقاومة على امتداد الخط المستقيم (للحالة العادية) بشكل جيد مع العلاقة التجريبية (3) وحساب قيم الثوابت β و R_0 في منطقة تأثير الفونونات التي تمثل العلاقة الخطية بين المقاومة ودرجة الحرارة (وفي المرحلة الثانية لم تظهر المقاومة علاقة خطية ويلاحظ في هذه المنطقة زيادة في الناقلية). وتحدث الناقلية الفائقة عند مدى من درجة الحرارة بين درجة الحرارة الحرجة الابتدائية T_{onset} ودرجة حرارة المقاومة الصفرية T_{co} وتكون المقاومة غير خطية مع درجة الحرارة بسبب تعديلات ما ضمن الحبيبات ذات الناقلية الفائقة (intragranular).

استُخدمت نظرية AL لحساب تأثير الترحج في منطقة الزيادة وتحليله في الناقلية. وبيّن الشكل (3) إجراءً بسيطاً لتكبير تفاصيل الانتقال إذ إنّ درجة الحرارة التي يكون عندها $\frac{dR}{dT}$ قيمة عظمى هي درجة الحرارة الحرجة T_c . ويمكن تحديد قيمة T_{co} للعينة عند آخر نقطة تصبح فيها المقاومة صفراً في الرسم البياني $\frac{dR}{dT}$ كتابع في T إذ تساوي 103 كلفن.



الشكل (3) تغير مشتق المقاومة بالنسبة إلى درجة الحرارة مع تغير درجة الحرارة للعينة $(\text{Hg}_{0.1}, \text{Tl}_{0.9})\text{-2212}$

ويمكن تحديد عرض منطقة الانتقال $\Delta T = T_{\text{onset}} - T_{\text{co}}$ للعينة من الفرق بين درجة الحرارة الحرجة الابتدائية T_{onset} ودرجة حرارة المقاومة الصفرية T_{co} ، التي تساوي 12 كلفن، وتشير إلى انتقال حاد. ومن الصعب الحصول على مادة بانتقال حاد وقيمة صغيرة ΔT . ويعتقد أن وجود عرض ΔT يرجع إلى وجود الشوائب و أطوار أخرى. وبالنسبة إلى درجة الحرارة العالية، نلاحظ أن القيمة العظمى الحادة في $\frac{dR}{dT}$ ترجع إلى تغيرات الحبيبات فيما بينها، وتعرف هذه التغيرات المميزة بانتقال الاقتران الحبيبي. وتقترب قيمة درجة الحرارة عند هذه القمة من قيمة درجة الحرارة الحرجة T_c [17]. تكون القياسات النموذجية للمقاومة في العينات ذات البلورات المتعددة أكبر من القيم في المستويات الداخلية. تكون نسبة عدم التماثل في المناحي للمقاومة أكبر في المستويات من تلك التي تأخذ ممرات صغيرة عمودية على المستويات، ولهذا تميل لتفسير بشكل رئيسي على طول مستويات البلورة. يسير التيار بشكل منفرد، ومتعرجاً من بلورة إلى التي تليها، وهكذا يكون طول الممر الكلي أكبر منها في حال لو رتبت البلورات بمستوياتها بشكل مواز لاتجاه التيار. ومن الواضح أن هذه الدراسة تشير إلى تطابق جيد بين نظرية AL مع النتائج التجريبية عند مجال درجات الحرارة $2T_c \leq T \leq 300$ ، و دون هذا المجال يزداد التباين بين الواقع التجريبي و مدلولات نظرية AL. و من المفيد بمكان البحث في نظرية أندرسن - زو (Anderson-Zou) من أجل دراسة سلوك تأرجح الناقلية لغاية الوصول إلى الدرجة T_c .

وفقاً لنظرية أندرسن - زو [18]، تعطى مقاومة الحالة العادية للناقل الفائق كالاتي:

$$R = \frac{A}{T} + BT \quad (7)$$

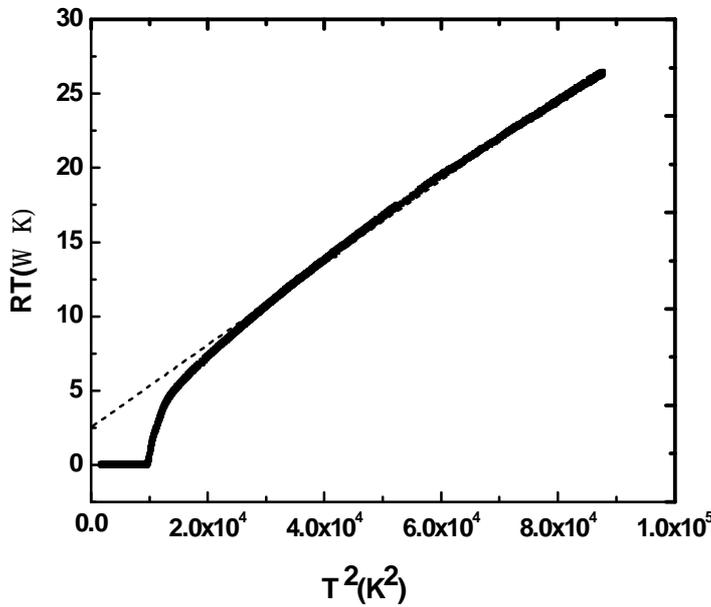
إذ A و B ثوابت المطابقة. وعلى الرغم من أن العينات المتعددة التبلور تتألف من بني حبيبية عشوائية التوجيه، ونتيجة لعدم التناحي فإن المقاومة تكون أكثر انخفاضاً كلما كان ترتيب هذه البلورات بشكل أفضل وفق خط مستقيم. ومن ثم فإن الحبيبات الكثيفة وذات النوعية العالية ستمتلك مقاومة تسلك السلوك السابق نفسه وكذلك سنحصل على القيمة نفسها للمقاومة كما لو أنها تعود إلى بلورة أحادية [19]. وبتطبيق تحليل أندرسن - زو على بيانات المقاومة في الحالة العادية برسم المقاومة مضروبة بدرجة الحرارة RT كتابع

لمربع درجة الحرارة T^2 للعينة (يمثل الخط المستقيم نتائج المطابقة في الحالة العادية اعتماداً على العلاقة (7)) نجد أن الرسم البياني الناتج يكون خطياً من أجل معظم درجات الحرارة المدروسة، كما في الشكل (4)، الذي يوضح سلوك المقاومة لعينة البلورات المتعددة ذات النوعية الجيدة التي يمكن تمثيلها بحبيبية وحيدة، ومن ثم تكون مقاومتها ضمن المستوى مشابهة للبلورة الوحيدة. ويبين الجدول (1) قيم الثوابت المختلفة للعينة.

الجدول (1) قيم المتغيرات المختلفة الناتجة من قياسات $R(T)$ لعينة الناقل الفائق $(Hg_{0.1}, Tl_{0.9})-2212$

R at T=300K	Normal-state fit $R=R_0+\beta T$		T_c (K)	T_{co} (K)	ΔT_c (K)	AZ-fit $R = A/T+BT$	
	R_0 (Ω)	β ($m\Omega K^{-1}$)				A (ΩK)	B ($m\Omega K^{-1}$)
0.09 Ω	0.027	0.21	115	103	12	1.69	0.289

ولإيجاد المتغيرات المختلفة للعينة ومقارنتها بالنتائج السابقة لأنظمة النواقل الفائقة $HBCCO$ ، تحسب الزيادة في الناقلية $(\Delta\sigma)$ كتابع لدرجة الحرارة المختزلة ε بالشكل اللوغاريتمي $\ln-\ln$ ، ثم تحسب الناقلية الزائدة من المعادلة (2).



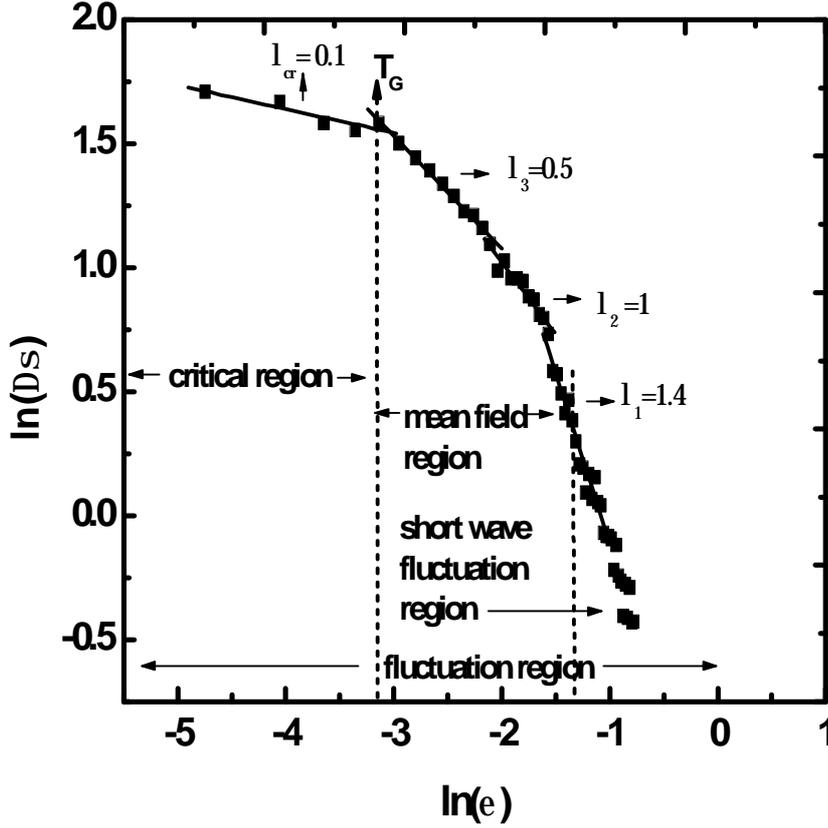
الشكل (4) رسم أندرسن - زو للمقاومة مضروبة بدرجة الحرارة RT كتابع لمربع درجة الحرارة T^2 لبيانات المقاومة في الشكل 2.

ويمكن تفسير السلوك العام للناقلية كتابع لدرجة الحرارة أنه في حالة درجة الحرارة العالية (القسم الخطي 300 - 250 كلفن) في المرحلة الخطية تكون المقاومة تابعاً خطياً لدرجة الحرارة وذلك بتأثير الفونونات (حركة الذرات أو الجزيئات حركة عشوائية وبكافة الاتجاهات). وتظهر في المنطقة (MFR) mean field region إمكانية الانتقالات الثلاثة أحادي البعد وثنائي وثلثي البعد. ويمكن أن نفسر السلوك العام للناقلية كتابع لدرجة الحرارة في هذه المنطقة وفقاً لما يأتي: عند التبريد إلى درجات حرارة أخفض يتناقص مفعول الفونونات وتظهر ناقلية زائدة وهذه الناقلية الزائدة ناتجة عن إمكانية حركة حاملات التيار باتجاه واحد (1D) بحرية أكثر مما يؤدي إلى تناقص المقاومة أي زيادة الناقلية. بمتابعة التبريد تستطيع حاملات التيار الحركة بحرية أكبر في المستوى (2D)، ولهذا تكون المقاومة أصغر، ومن ثم الناقلية أكبر (تزداد الناقلية) وبالمتابعة بتبريد العينة إلى درجات حرارة أخفض (أعلى من درجة حرارة انتقال المادة إلى الناقلية الفائقة) تستطيع حاملات التيار في هذا المجال من درجات الحرارة الحركة بحرية كبرى في حجم البلورة كاملاً (3D). وعندما تصبح درجة الحرارة أعلى بقليل من بداية درجة الحرارة الحرجة (T_{onset}) يبدأ تشكل أزواج كوبر؛ مما يؤدي إلى انخفاض المقاومة وزيادة الناقلية الكهربائية، ولكن لا تنتقل المادة إلى الحالة فوق الناقلية (تبقى في الحالة العادية).

ويوضح الشكل (5) الناقلية الزائدة كتابع في درجة الحرارة المختزلة للعينة $(\text{Hg}_{0.1}, \text{Ti}_{0.9})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$ ، وهناك اختلاف صغير في قيم الأس المحدد من الأجزاء الخطية للرسم البياني. ويمكن ملاحظة ثلاثة تغييرات واضحة في الميل، ويزيد تدرج الميل من درجة الحرارة المنخفضة إلى المرتفعة. وتدعى درجة الحرارة التي يحدث عندها الانتقال من المنطقة الحرجة إلى المنطقة ثلاثية الأبعاد بدرجة حرارة العبور T_G .

يعطي الجدول (2) قيم الأس λ المحددة من الميل. حيث تكون قيمة الأس في منطقة السلوك الحرج cr مساوية إلى 1 ± 0.022 . في المنطقة القريبة من درجة الحرارة الحرجة T_c فإن الترجحات الحرارية في الناقلية تظهر انتقال لورانس - دونياش عند الانتقال من الحالة ثنائية البعد (2D) إلى الحالة ثلاثية البعد (3D)، ويرجع ذلك إلى تغيير الاتجاهات في حركة أزواج كوبر من 2D إلى 3D. ويحدث هذا الانتقال عند درجة حرارة T_{LD} . وتشير λ_3 إلى الأس تحت T_{LD} ، و λ_2 إلى الأس فوق T_{LD} وتشير λ_1 إلى الأس عند درجة الحرارة العالية. ونحصل على الأس λ_3 من ميل $\ln(\Delta\sigma)$ كتابع لـ $\ln(\varepsilon)$ الذي يكون مساوياً تقريباً إلى (-0.5) في مدى المنطقة الثلاثية الأبعاد للناقلية وفقاً لنظرية (AL). وتكون قيمة الأس λ_3 في مدى درجة الحرارة من 120 كلفن إلى 129 كلفن مساوية إلى 0.5 ± 0.014 للعينة $(\text{Hg}_{0.1}, \text{Ti}_{0.9})_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6+\delta}$. بالمثل يكون الأس λ_2 مساوياً تقريباً (-1) في مدى منطقة البعدين 2D للناقلية وفقاً لنظرية (AL). وتكون قيمة الأس λ_2 في مدى درجة الحرارة من 129 كلفن إلى 139 كلفن مساوية إلى 1 ± 0.052 للعينة. ونلاحظ عند منطقة

درجة الحرارة العالية درجة حرارة عبور أخرى في العينة حيث الأس البعدي يتغير من λ_2 إلى λ_1 . ويكون الأس λ_1 في منطقة درجة الحرارة العالية مساوياً إلى 1.4 ± 0.09 في مدى درجة الحرارة من 139 كلفن إلى 154 كلفن، بعد ذلك في درجات الحرارة العالية تصبح العينة في مجال تأثير الفونونات جميعها.



الشكل (5) الناقلية الزائدة كتابع لدرجة الحرارة المختزلة بالشكل اللغاريتمي للعينة $(\text{Hg}_{0.1}, \text{Tl}_{0.9})\text{-2212}$. وتبين الخطوط المتقطعة نقطتي عبور واضحة مع قيم الأس λ_1 و λ_2 و λ_3 .

الجدول (2) قيم الأس المختلفة للناقلية ودرجات حرارة العبور للعينة $(\text{Hg}_{0.1}, \text{Tl}_{0.9})$ -2212.

λ_{cr}	λ_3	λ_2	λ_1
$T^{cr-3D} = T_G$ (K)	T^{3D-2D} (K)	T^{2D-1D} (K)	T^{1D-sw} (K)
0.1 ± 0.022	0.5 ± 0.014	1 ± 0.052	1.4 ± 0.088
120	129	139	154

الاستنتاجات

بُحِثت الزيادة في الناقلية للعينة $(\text{Hg}_{0.1}, \text{Tl}_{0.9})$ -2212 الفائقة الناقلية باستخدام قياسات المقاومة الكهربائية، في مجال درجات الحرارة 10-300 كلفن. وحُسبت الزيادة في الناقلية فوق درجة حرارة الحرجة إذ لوحظ تطابق نتائج المقاومة الكهربائية في الحالة العادية بشكل جيد مع العلاقة التجريبية $R = R_0 + \beta T$ في مدى درجات الحرارة $2T_c \leq T \leq 300$. جرت مطابقة نتائج المقاومة القياسية التي لها سلوك (أندرسون - زو) في الحالة العادية، بالمعادلة $R.T = A_1 + B_1 T^2$ ، وقد أظهرت النتائج بأنه يوجد توافق جيد بين النتائج المخبرية مع هذه المعادلة حيث يكون للعينة انتقال طوري حاد وتظهر علاقة خطية (المقاومة القياسية مضروبة بدرجة الحرارة كتابع لمربع درجة الحرارة) في المدى ابتداء من درجة حرارة الانتقال الابتدائية وإلى درجة حرارة 300 كلفن.

بُحِثت الزيادة في الناقلية $(\Delta\sigma)$ كتابع لدرجة الحرارة المختزلة (ε). ولوحظ بأن الأس يساوي -0.1, -0.5, -1.0, و-1.4 في المنطقة الحرجة cr، المنطقة ثلاثية الأبعاد 3D ومنطقة البعدين 2D ومنطقة البعد الواحد 1D على الترتيب، وهذه النتائج تتطابق مع نظرية اسلمزوف - لاركن.

REFERENCES

- [1] Poddar, A. Mandal, P. Das, A. N. and Ghosh, B., 1989. Excess conductivity in $Tl_1Ca_3Ba_1Cu_3O_x$ and $Bi_1Ca_1Sr_1Cu_2O_x$ systems due to thermodynamic fluctuations. *Physica C* 159, pp. 231-238.
- [2] Vovk, R.V. Nazyrov, Z.F. Obolenskii, M.A. Goulatis, I.L. Chroneos, A. and Pinto Simoes, V.M., 2011. Effect of small oxygen deficiency on the para-coherent transition and 2D–3D crossover in untwined $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals. *Journal of Alloys and Compounds* 509, pp. 4553–4556.
- [3] Aslamazov, L.G. and Larkin, A.I., 1968. Effect of Fluctuations on the Properties of a Superconductor Above the Critical Temperature, *Sov. Phys. Solid State*, 10(4), pp. 875-880.
- [4] Maki, K., 1968. The Critical Fluctuation of the Order Parameter in Type-II Superconductors. *Prog. Theor. Phys.* 39, pp. 897-906.
- [5] Lawrence, W. E. and Doniach, S., 1971. Proceedings of the Twelfth International Conference on Low Temperature. in: Eizo Kanda (Ed.). *Physics, Keigaku, Tokyo*, p. 361.
- [6] Hikami, S. and Larkin, A.I., 1988. Magnetoresistance of high temperature superconductors. *Mod. Phys. Lett. B* 2 (5), pp. 693-698.
- [7] Khan, N. A. Hassan, N. Irfan, M. and Firdous, T., 2010. Different regions of fluctuation conductivity in Sn-doped $Cu_{0.5}Tl_{0.5}Ba_2Ca_2Cu_{3-y}Sn_yO_{10-\delta}$ superconductors. *Physica B* 405, pp.1541–1545.
- [8] Mun, M. Lee, S. Bae, M. and Lee, S., 1994. Conductivity fluctuation in HBCCO superconductor. *Solid State Communications*, Vol.90, No. 9, pp.603-606.
- [9] Ahmad, N. H. Khan, N. A. and Yahya, A. K., 2010. Superconducting fluctuation behavior and infrared absorption properties of $Tl_{1-x}Cu_xSr_{1.6}Yb_{0.4}CaCu_2O_{7-\delta}$ and $Tl_{0.5}Pb_{0.5}Sr_{2-y}MgyCa_{0.8}Yb_{0.2}Cu_2O_{7-\delta}$ ceramics. *J. Alloys Compounds*. 492, pp. 473-481.
- [10] Sato, T. Nakane, H. Mori, N. and Yoshizawa, S., 2001. Fluctuation conductivity analysis for Bi-2223 superconductors with different sintering time, *Physica C* 357–360, pp 244-247.
- [11] Abou-Aly, A.I. Awad, R. Ibrahim, I.H. and Abdeen, W., 2009. Excess conductivity analysis for $Tl_{0.8}Hg_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{9-\delta}$ substituted by Sm and Yb. *Solid State Communications* 149, pp. 281-285.
- [12] Ghosh, A.K. Bandyopadhyay, S.K. Barat, P. Sen P. and Basu, A.N., 1995. Excess-conductivity analysis of α irradiated polycrystalline Bi-2212 superconductor. *Physica C* 255, pp 319-323.
- [13] Minowa, R. Yamada, Y. and Mori, N., 2008. Characterization of polycrystalline $LaBaCaCu_3O_{7-\delta}$ superconductors in the fluctuation regime. *Physica C* 468, pp. 1225–1227.
- [14] Mohanta, A. and Behera, D., 2011. Effect of granularity and inhomogeneity in excess conductivity of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta+x}BaTiO_3$ superconductor. *Physica B* 406, pp. 877–884.

- [15] Patapis S.K., Papavasiliou I.P., Adamopoulos N., Inyushkin A.V., Uvarova T. G., 2000. Study of the $\text{Y}_{1-x}\text{Er}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ system: Electrical and Fluctuation Conductivity. *Physica b* 284–288, pp. 979–980.
- [16] Parthoman, M., 1994. Single-step synthesis of bulk $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$. *Physica C* 222, pp. 7.
- [17] Anderson, P. W. and Zou, Z. 1988. "Normal" Tunneling and "Normal" Transport: Diagnostics for the Resonating-Valence-Bond State. *Phys. Rev. Lett.* B60, pp.132.
- [18] Rojas Sarmiento, M. P. Uribe Laverde, M.A. Vera López, E. Landínez Téllez, D. A. and Roa-Rojas, J., 2007. Conductivity fluctuation and superconducting parameters of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}(\text{PO}_4)_x\text{O}_{7-\delta}$ material. *Physica B* 398, pp. 360–363.
- [19] Nkum, R.K. and Datars, W.R., 1992. Fluctuation induced conductivity in the Sn-doping $(\text{Bi, Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconducting system. *Physica C* 192, pp. 215-222.