



دراسة انتقال طور التوصيل الفائق كدالة في درجة الحرارة لمركبات أكسيد البنكتايد المعتمد على الحديد

*مبروكة الزبير عبد الرحمن الزبير و طارق محمد فايز أحمد

قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة سبها، ليبيا

الكلمات المفتاحية:

السعة الحرارية $C(T)$
المقاومية $\rho(T)$
درجة الحرارة الحرجة T_C
فجوة الطاقة 2Δ

الملخص

تعتبر درجة الحرارة الحرجة T_C وفجوة الطاقة 2Δ من أهم خصائص الموصلات الفائقة، ولتحسين الخواص الفيزيائية لهذه الموصلات الفائقة يتم التركيز على هاتين الخاصيتين. في هذا الورقة تمت نمذجة سلوك السعة الحرارية $C(T)$ والمقاومية $\rho(T)$ المعتمدة على درجة الحرارة من طور الحالة الطبيعية إلى طور حالة التوصيل الفائق، وذلك بالاعتماد على مفهومين أساسيين، الأول أن الفونون يتوسط زوج الإلكترون كرابطة بينهما، والذي يعرف بأزواج كوبر، والتي تنشأ عند درجة الحرارة الحرجة، والثاني أن أزواج الإلكترونات يمكن أن تتواجد مع الكترولونات التوصيل في طور الحالة الطبيعية. وتم أخذ بيانات المركبات $LaO_{1-x}FxFeAs$ و $SmO_{1-x}FxFeAs$ وبتطبيق النموذج المقترح على هذه البيانات وحساب الثوابت الظاهرة في النموذج، تم تحديد درجة الحرارة الحرجة T_C وعلاقتها بفجوة الطاقة 2Δ ، وعلاوة على ذلك تم تحديد الفجوة الزائفة Δ_2 ، وطاقة الربط للزوج الإلكتروني Δ_2 . بينت الدراسة أن فجوة الطاقة للمركب $LaO_{0.9}F_{0.1}FeAs$ كانت في حدود $\Delta_2 = 7.62$ meV، بينما كانت طاقة ربط الزوج للإلكترون في حدود $\Delta_{pair} = 20.358$ meV، أما المركب $SmO_{0.9}F_{0.1}FeAs$ كانت $\Delta_2 = 7.75$ meV و $\Delta_{pair} = 20.36$ meV. وحسب النموذج المقدم تم تصنيف أي من المركبات تنتهي إلى الاقتران القوي أو الضعيف، حيث كانت $KBTC = 3.5-4.2/\Delta_2$ للمركبات $LaO_{0.9}F_{0.1}FeAs$ و $SmO_{0.87}F_{0.13}FeAs$ وهي في توافق مع الاقتران الضعيف weak-coupling BCS gap ratio، أما العينات $SmO_{0.9}F_{0.1}FeAs$ و $SmO_{0.88}F_{0.12}FeAs$ فقد كانت $KBTC > (3.5-4.2/\Delta_2)$ وهي تنتهي إلى الاقتران القوي strong-coupling BCS gap ratio.

Study of superconducting phase transition as a function of temperature for iron-based pentoxide compounds

*Mabrouka Al-Zubair Abdul Rahman Al-Zubair , Tariq Muhammad Fayez Ahmed

Department of Physics, Faculty of Science, University of Sabha, Libya

Keyword:

Heat capacity $C(T)$
Resistivity $\rho(T)$
Critical temperature T_C
Energy gap 2Δ

ABSTRACT

the transition temperature T_C and its relationship to the energy gap 2Δ were determined. Moreover, the pseudo gap $2\Delta_p$ and the binding energy of the electron pair $2\Delta_{pair}$ were determined. The study showed that the energy gap of the compound $LaO_{0.9}F_{0.1}FeAs$ was $2\Delta = 7.62$ meV, and the pair binding energy $2\Delta_{pair} = 20.358$ meV. The transition temperature T_C and the energy gap 2Δ are considered the most important features of superconductors, and to improve the physical properties of these superconductors, focus is placed on these two features. In this research, the temperature dependence of heat capacity $C(T)$ and resistance $\rho(T)$ were modeled, through the transition from the normal state to the superconducting state, based on two basic concepts. The first is that the phonon mediates the electron pair as a bond between them, which is known as Cooper pairs, which are formed at the transition temperature, and the second is that electron pairs can exist with conduction electrons in the normal phase. Data for the compounds $LaO_{1-x}FxFeAs$ and $SmO_{1-x}FxFeAs$ were studied, and by applying the proposed model to these data and calculating the constants appearing in the my of the electrons was $2\Delta_{pair} = 0.358$ meV, while for the compound $SmO_{0.9}F_{0.1}FeAs$ the results were $2\Delta = 7.75$ meV and $2\Delta_{pair} = 0.36$ meV. According to the

*Corresponding author:

E-mail addresses: Mab.alzubair@sebhau.edu.ly ,(T. M. Ahmed) tar.ahmad@sebhau.edu.ly

Article History : Received 19 February 2024 - Received in revised form 08 May 2024 - Accepted 25 May 2024

proposed model, the compounds were classified as belonging to strong or weak coupling, where the $2\Delta/k_B T_C = 3.5-4.2$ for the compounds $LaO_{0.9}F_{0.1}FeAs$ and $SmO_{0.87}F_{0.13}FeAs$, which is consistent with the weak-coupling BCS gap ratio, while for the compounds $SmO_{0.88}F_{0.12}FeAs$ and $SmO_{0.9}F_{0.1}FeAs$ the $2\Delta/k_B T_C > (3.5-4.2)$ and it belongs to the strong-coupling BCS gap ratio.

المقدمة.

في الطاقة. بالنظر إلى وجود فجوة الطاقة، تختلف السعة الحرارية للموصل الفائق بعد الوصول إلى درجة الحرارة الحرجة حيث تنخفض بشدة عند درجات الحرارة المنخفضة، مما يشير إلى أن السعة الحرارية C وكذلك فجوة الطاقة 2Δ ودرجة الحرارة الحرجة T_c للموصل فائق التوصيل كلها مرتبطة مع بعضها [1, 17, 18, 19, 20, 21]. في عام (2006) Kamihara et al [22]، استطاعوا تحضير مركب $LaOFeP$ باستخدام طريقة التفاعل الحراري للحالة الصلبة وبذلك أنشأت فئة جديدة من الموصل الفائق بدرجات حرارة انتقالية $T_{onset} = 5 K$ و $T_{p=0} = 3.2 K$. وفي عام 2008. Y. Kamihara et al. تم تحضير المركب الرباعي القائم على الحديد والمسعى iron- based $LaOxypnictide$ quaternary phase $LaOFeAs$ $LaO_{1-x}F_xFeAs$ أظهر F^- doping بالطور الإلكتروني، أظهر انتقالاً فائق التوصيل عند $T_c = 26 K$ عند F -doping $x = 0.11$ عندما تم استبدال الأكسجين جزئياً بالفلور في هذه المرحلة (يتم استبدال 11٪ من الأكسجين بالفلور). من خلال التطعيم الإلكتروني أو تطعيم الفجوة electron or hole doping أظهرت $LnOFeAs$ القائمة على الحديد انتقالاً فائق التوصيل، وكان واضحاً في الانخفاض عند درجة حرارة معينة في منحنيات المقاومة والطواعية المغناطيسية [23, 24, 25, 26, 4, 7]، في مركبات $SmO_{0.88}F_{0.12}FeAs$, SmO oxypnictide لوحظت درجات الحرارة الحرجة العظمى $T_{onset} = 56.1 K$ و $T_{p=0} = 54.1 K$ [27]. بالإضافة إلى ذلك، أظهر المركب $Gd_{0.8}Th_{0.2}OFeAs$ Gd -oxypnictid درجة حرارة انتقالية $T_{onset} = 56 K$ [28].

توصل الباحث (P. J Baker) وآخرون في عام (2009) بعد بإجراء مطابقة لبيانات الخاصة بمواد $SmO_{0.99}F_{0.10}FeAs$, $SmO_{0.87}F_{0.13}FeAs$, $SmO_{0.88}F_{0.12}FeAs$ لدرجة الحرارة من (200K-2) للسعة الحرارية حسب المعادلة: $C(T) = C^D(T) + C^E(T) + \gamma T$ حيث أن المصطلحات الثلاثة، في المعادلة هي السعة الحرارية ديبي وإينشتاين، ومصطلح المساهمة الإلكترونية لسعة الحرارية، على التوالي [29].

بناء على تحليل العديد من الباحثين (A. Narduzz JE, A. Kondrat Hamann-Borrero) في عام (2006) للمقاومية الكهربائية، بدراسة خصائص الحالة الطبيعية للموصلات الفائقة لمواد (oxypnictide)، أظهرت مقاومة الحالة الطبيعية (ρ_n) فوق T_c K و أقل 200K إعتماًًاً تربيعياً لدرجة الحرارة حسب المعادلة: $\rho_n = \rho_0 + AT^2$ بإجراء (ρ_0 is fitting) وأجريت التحليلات وحصل قيم الثوابت [30, 31].

وكذلك أجرى الباحث (Arushanov) وآخرون في عام (2008) تحليل البيانات التجريبية للموصلات الفائقة عالية T_c من الحديد في الحالة الطبيعية. وتحليل سلوك القياس للمقاومية ل ($0.2 \geq x \geq 0.1$) $LaO_{1-x}F_xFeAs$ ويعتمد تحليل القياس علي طبيعة الاعتماد على درجة حرارة الحال الطبيعية لدرجات الحرارة من (300K- T_c) حسب المعادلة: $\rho(T) = \rho_0 + (c T) \exp(-2\Delta/T)$ بإجراء تحليل المطابقة، وحصل علي قيم الثوابت ($\rho_0, c, 2\Delta$) [32].

1. مقدمة في الموصلية الفائقة Introduction to Superconductivity

الموصلية الفائقة هي حالة فيزيائية لفيزياء درجات الحرارة المنخفضة تحدث في ظروف معينة مما يمكن المادة من الانتقال من الحالة الطبيعية (normal state) في درجة حرارة الغرفة إلى حالة التوصيل الفائق (superconducting state) عند درجة حرارة منخفضة جداً، وتتميز الموصلية الفائقة باقتراب المقاومة الكهربائية من الصفر في مختلف المعادن والسبائك والمركبات عندما يتم تبريدها إلى درجة الحرارة الحرجة (critical temperature) (T_c). لوحظت هذه الظاهرة لأول مرة في عام (1911) من قبل العالم الهولندي Onnes الذي لاحظ ان مقاومة انبوب الزئبق المجمد انخفضت فجأة إلى الصفر عند تبريده إلى درجة ($T_c = 4.2 K$) وهي درجة تحول غاز الهليوم لسائل ويعود الفضل لهذا العالم في إدراك ان المادة في حالة التوصيل الفائق يمكن اعادةها إلى حالتها الطبيعية (غير فائقة التوصيل) من خلال تعرضها لمجال مغناطيسي قوي ذي قيمة حرجة معينة أو تمرير تيار كبير عبرها [1, 2].

إن أبرز مؤشر على الموصلية الفائقة هو درجة الحرارة الحرجة فائقة التوصيل (T_c) التي تشير إلى ثلاث نقاط، حيث يتم تعريف درجة حرارة بداية التحول أو بداية انخفاض المقاومة (T_{onset}) على أنها نقطة الانحراف بعيداً عن الخط المستقيم للاعتمادية $\rho(T)$ ، وتعرف درجة حرارة منتصف الانتقال ($T_{midpoint}$) بأنها درجة الحرارة التي عندها تصبح المقاومة 50٪ من قيمتها عند T_{onset} ، ويتم تعريف درجة الحرارة الحرجة للمقاومة الصفرية ($T_{p=0}$) على أنها درجة الحرارة التي تكون عندها المقاومة صفرية أو صغيرة جداً بحيث لا يمكن قياسها [3, 4, 5, 6, 7].

البارامتر الأكثر أهمية للموصل الفائق هو فجوة الطاقة الناتجة عن اقتران أو ازدواج الإلكترونات، حيث تتزاوج جميع الإلكترونات ذات الطاقة المنخفضة في نطاق طاقة معين. في حالة الازدواج يرتبط كل إلكترونان معا عند درجات حرارة منخفضة بطاقة أقل من مستوى فيرمي. وعند $T \leq T_c$ تشكل الإلكترونات الموجودة على سطح فيرمي أزواج إلكترونية electron pairs، ويتم بعد ذلك بداية فتح فجوة على سطح فيرمي مما يشير إلى أن سطح فيرمي به فجوة في حالة التوصيل الفائق $T = T_c$ [8, 9, 10, 11, 12]. يعد دراسة واستكشاف فجوة الطاقة أمراً ضرورياً لشرح آلية الموصلية الفائقة، حيث يتسبب الاقتران في فتح فجوة في الطيف المستمر. يمكن أن توفر القياسات الضوئية معلومات مهمة حول طبيعة انتقال الطور حيث توفر أطيف الأشعة تحت الحمراء من مطيافية الأشعة تحت الحمراء لتحويل فوربييه (FTIR) دليلاً على تكوين فجوة الطاقة على سطح فيرمي [13, 14, 15, 16].

يعد وجود فجوة الطاقة إحدى السمات المميزة للنظريات التي تفسر الموصلية الفائقة، ومع ذلك فإن اكتشاف الفجوة يعتمد على التجارب التي أجريت على قياسات السعة الحرارية لمدى واسع من درجات الحرارة أعلى وأدنى من درجة الحرارة الحرجة. تشير الفجوة أو الارتفاع المفاجئ عند درجة الحرارة الحرجة في منحني اعتمادية السعة الحرارية على درجة الحرارة $C(T)$ إلى وجود فجوة

وتحدد قوة النموذج المطابق للبيانات التجريبية بعاملين مهمين الأول R (square) معامل التحديد وهو معدل تفسير المتغير T بالنسبة للتابع C والتابع ρ_n ، وكلما كانت قيمته تقترب من الواحد كلما كان النموذج المقترح يعبر عن البيانات التجريبية.

والعامل الاخر الذى يدل على معنوية النموذج هو (SSE Residual) وتمتل مجموعة مربعات الاخطاء للفروق بين القيم المقدرة من النموذج والقيم العملية، وتصغير هذا العامل اساس لتطابق النموذج الرياضى علي البيانات التجريبية

النتائج والمناقشة

3. النموذج النظري Theoretical Model

• أولاً: نموذج السعة الحرارية C(T) تكتب بالصورة:

$$C(T) = C_e^n(T) + C_{ph}^n(T) + C_e^s(T) + C_{ph}^s(T) + C_{ind} \quad (2)$$

حيث C_{ind} قيمة ثابتة ولا تعتمد على درجة الحرارة، وهي تعبر عن السعة الحرارية الناشئة عن الشوائب والعيوب البلورية، وبشكل أدق فإن هذا الحد لا يعتمد على T عند درجات الحرارة المنخفضة جداً وذلك حسب نظرية الإلكترون الحر في الفلزات.

تم اخذ بيانات C(T) للمركب $LaO_{1-x}F_xFeAs$ ($x=0.10$) والمركب ($x=0.10$)، تم اخذ بيانات C(T) للمركب $SmO_{1-x}F_xFeAs$ (0.12, 0.13) [29] وتطبيق المعادله (2) على هذه البيانات تحصلنا على الثوابت الظاهرة في المعادلة في جدول (1)

جدول (1) ثوابت المطابقة fitting parameters للسعة الحرارية مشتقة من معادلة (2) بين درجات الحرارة 200K - 2

Compound	SmO _{0.9} F _{0.1} FeAs	SmO _{0.88} F _{0.12} FeAs	SmO _{0.87} F _{0.13} FeAs	LaO _{0.9} F _{0.1} FeAs
$a_{n,ph}$ (J/mol K)	111.0905	116.2157	117.4080	103.1853
$C_{n,ph}$ (K)	89.996630	90.98914	92.54524	88.45265
$a_{s,e}$ (J/mol K)	-1.651148	-1.266358	-4.22090	-2.282987
$C_{s,e}$ (K)	4.189125	3.847472	3.73721	4.164306
$a_{n,e}$ (J/mol K ²)	0.3126935	0.269165	0.3424006	0.2276146
$a_{s,ph}$ (J/mol K ⁴)	-1.815256e-06	-1.573456e-06	-1.793233e-06	-1.052211e-06
const. (J/mol K)	14.46616	11.20237	1.182441	-0.09628355
Sse	4.933	5.99	5.482	1.046
Rsqr	0.999	0.999	0.999	0.999

$$2\Delta = C_{ph}^n K_B \quad (7)$$

$$K_B = 8.617 \times 10^{-2} \text{meV}$$

جدول (2) يبين قيم درجة الحرارة الحرجة T_c وفجوة الطاقة $2\Delta, 2\Delta_{pair}$ للمركبات المدروسة

Compound	T_c [K]	2Δ [meV]	$2\Delta_{pair}$ [meV]
LaO _{1-x} F _x FeAs ($x=0.10$)	22.11	7.62	0.358
SmO _{1-x} F _x FeAs ($x=0.10$)	20.38	7.75	0.36
SmO _{1-x} F _x FeAs ($x=0.12$)	19.28	7.83	0.33
SmO _{1-x} F _x FeAs ($x=0.13$)	26.7	7.97	0.32

المركب $LaO_{1-x}F_xFeAs$ عند $x=0.10$ أظهر درجة حرارة حرجة $T_c=22.11K$ وفجوة الطاقة $2\Delta=7.62 \text{meV}$ ، وهي قيم قريبة جداً من القيم العملية، يوضح شكل (1) مدى توافق النتائج المأخوذة من النموذج للقيم المقدرة مع نتائج البيانات التجريبية للسعة الحرارية عند درجات الحرارة العالية والمنخفضة.

توصل الباحثين (Andrzej, Konrad, Przemystaw) في عام (2020) [33]، الى وصف إعتمادية فجوة الطاقة على درجة الحرارة لمركبات القائمة على الحديد حسب المعادلة:

$$\frac{\Delta(T)}{\Delta(T \rightarrow 0)} \cong \tanh\left(\alpha \sqrt{1 - \frac{T}{T_c}}\right) \quad (1)$$

في هذه الورقة نقدم دراسة الانتقال الطوري (العادي- الموصلية الفائقة) لاعتمادية السعة الحرارية على درجة الحرارة C(T)، والطور العادي لاعتمادية المقاومة الكهربائية على درجة الحرارة $\rho(T)$ للموصلات الفائقة المحتوية على الحديد iron-oxypnictide superconductors، وذلك بالاعتماد على فرضيات نظرية BCS Bardeen-Cooper-Schrieffer theory، ونظرية Two Fluid Model. وتحديد درجة الحرارة الحرجة T_c ، ومقاييس الطاقة المختلفة كفجوة الطاقة 2Δ ، والعلاقة بينهما حسب الانتقال الطوري وتحديد علاقتهما بالخواص الإلكترونية او الفونونية.

المواد وطرق العمل

2. تحليل البيانات Data Analysis

تم استخدام برنامج R لتحليل البيانات وإيجاد fitting parameters، والذي يعتمد على استخدام طريقة المربعات الصغرى اللاخطية حيث الدالة nls function هي برنامج رئيسي يحتاج الى تعريف النموذج الرياضى بمشتقاته الاولى وقيم مبدئية للبارامترات المراد تقديرها، إضافتها الى قيم C vs. T وقيم ρ_n vs. T.

نلاحظ من جدول (1) أنه البارامترات a_{ph}^s و a_e^s ظهرت بإشارة سالبة وهذه الإشارة لها مدلول انتقال العينة من طور الحالة العادية الى طور الموصلية الفائقة، وهذه نتيجة مهمة جداً تبين تميز طور عن طور آخر بالإشارة السالبة، وذلك عبر مدى من درجات الحرارة. ولحساب درجة الحرارة الحرجة T_c من المعادلة:

$$T_c = \frac{C_{ph}^n - C_e^s}{\log a_{ph}^n / a_e^s} \quad (3)$$

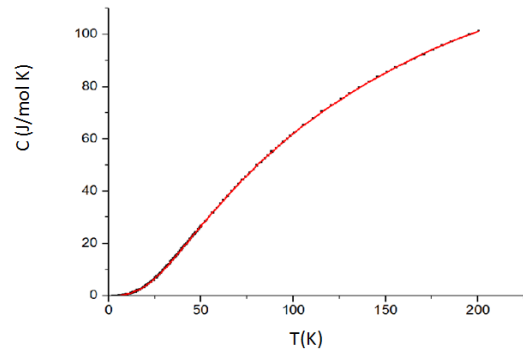
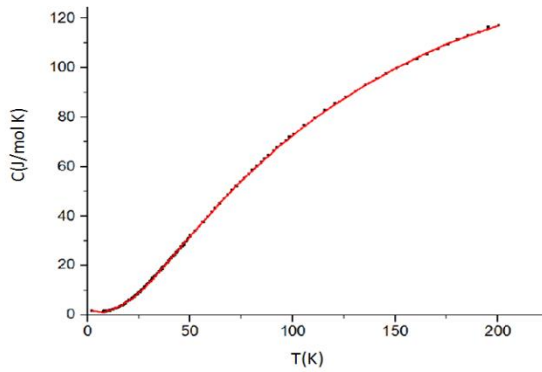
وحساب فجوة الطاقة $2\Delta_{pair}$

$$C_{ph}^n(T) = a_{ph}^n \exp\left(\frac{-2\Delta}{k_B T}\right) \quad (4)$$

$$C_e^s(T) = a_e^s \exp\left(\frac{-\Delta_{pair}}{k_B T}\right) \quad (5)$$

كانت النتائج المتحصل عليها في الجدول (2). وذلك باعتبار أن:

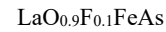
$$2\Delta_{pair} = C_e^s K_B \quad (6)$$



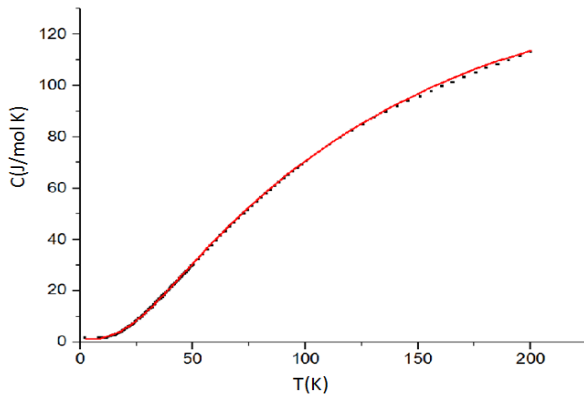
شكل (1) يبين الخط المتصل ببيانات القيم المقدرة من النموذج (معادلة 2) والنقاط المتقطعة

شكل (2) يبين الخط المتصل ببيانات القيم المقدرة من النموذج (معادلة 2) والنقاط المتقطعة

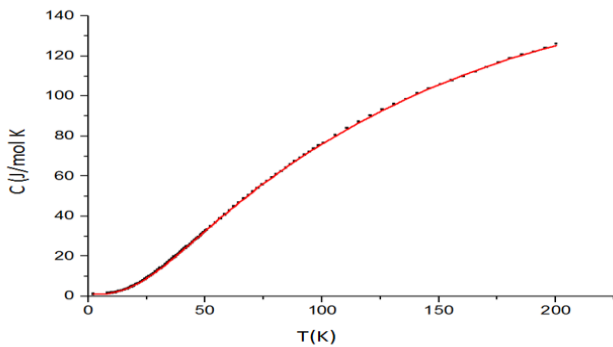
البيانات العملية لتغيرات السعة الحرارية مع درجة الحرارة $C(T)$ للعينة



البيانات العملية لتغيرات السعة الحرارية مع درجة الحرارة $C(T)$ للعينة $\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$.



شكل (3) يبين الخط المتصل ببيانات القيم المقدرة من النموذج (معادلة 2) والنقاط المتقطعة البيانات العملية لتغيرات السعة الحرارية مع درجة الحرارة $C(T)$ للعينة $\text{SmO}_{0.88}\text{F}_{0.12}\text{FeAs}$.



شكل (4) يبين الخط المتصل ببيانات القيم المقدرة من النموذج (معادلة 2) والنقاط المتقطعة البيانات العملية لتغيرات السعة الحرارية مع درجة الحرارة $C(T)$ للعينة $\text{SmO}_{0.87}\text{F}_{0.13}\text{FeAs}$.

نتائج طاقة الربط $2\Delta_{\text{pair}}$ المحسوبة من النموذج بعد تطبيقه على البيانات تظهر في جدول (2). حيث كانت للمركب $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ عندما $x=0.10$ هي $2\Delta_{\text{pair}} = 0.36 \text{ meV}$ ومع زيادة نسبة التطعيم تنقص هذه الطاقة إلى 0.32 meV عندما $x=0.13$. والنقطة المثيرة للاهتمام أن فجوة الطاقة 2Δ تزداد بزيادة x مع نقصان في قيمة طاقة الربط $2\Delta_{\text{pair}}$ كما في شكل (5) مما يعنى أن زيادة التطعيم يزيد في الايونات في طبقات المركب والتي بدورها تزيد

بالنسبة للمركب $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ والذي يظهر قمة صغيرة شاذة بالقرب من درجة حرارة نييل T_N في قياسات $C(T)$ سببها الرئيسي عزوم sm^{3+} (sm^{3+} moments) [29]. تم اهمال هذه القيم ، وهذا المركب في التجارب العلمية يعطى درجة حرارة انتقال T_c تعتمد على طريقة التحضير والشروط الحرارية، في الحسابات الظاهرة في الجدول (2) كانت T_c للعينة $x=0.13$ للمركب $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ هي $T_{\text{mid}}=26.7\text{K}$ وهي قريبة جداً من القيمة العملية لقياسات المقاومة مع درجة الحرارة، اما بالنسبة للعينات $(x=0.10, 0.12)$ فإن درجة الحرارة الحرجة T_c كانت 19.28K ، 20.38K على التوالي، بالنسبة للمركب $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ هناك عدم توافق واختلافات كثيرة في النتائج العملية لفجوة الطاقة، وخالصة القول بالنسبة لفجوة الطاقة حسب $2\Delta / K_B T_c = 3.5-4.2$ وهي تعطي weak-coupling BCS gap ratio. [34,35] تبقى العينات $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ($x=0.10$) و $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ($x=0.13$) في توافق داخل هذا المدى حسب قياسات النموذج المقدم، وذلك في جدول (3). اما بالنسبة للعينات $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ($x=0.12, 0.10$) حيث كانت النسبة $2\Delta / K_B T_c > (3.5-4.2)$ فهي تنتمي الى الاقتران القوي - strong coupling BCS gap وتدل على وجود ترابط قوى يقترح وجود بعض انماط الاهتزاز (الفونون) القوية التي تساعد على الاقتران الإلكتروني- بوزون وتؤدي الى قيمة فجوة طاقة عالية [34,36].

جدول (3) يبين نسبة BCS gap ratio حسب النموذج المقدم لفجوة الطاقة مع درجات الحرارة الحرجة

Compound	$2\Delta / K_B T_c$
$\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ($x=0.10$)	3.99
$\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ($x=0.13$)	3.46
$\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ($x=0.12$)	4.71
$\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ($x=0.10$)	4.41

تغيرات السعة الحرارية مع درجة الحرارة حسب البيانات العملية ومدى مطابقة ببيانات النموذج المقدم تظهر في شكل (2) (3) (4) للمركب $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ في حالة ($x=0.10, 0.12, 0.13$) على التوالي.

شكل (5) يبين تغير فجوة الطاقة 2Δ مع تغير طاقة الربط $2\Delta_{\text{pair}}$ وذلك بزيادة x كمية التطعيم

• ثانياً: نموذج المقاومة $\rho(T)$ تكتب بالصورة:

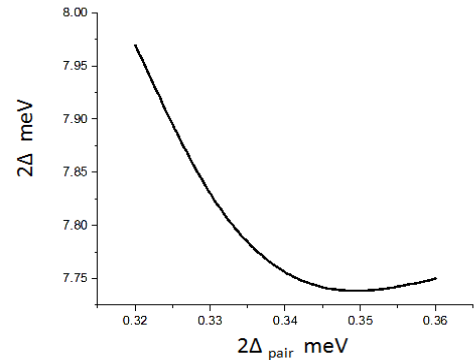
$$\rho_n(T) = \rho_0 + A_4 T + A_5 \exp\left(-\frac{A_6}{T}\right) \quad (8)$$

حيث: A_4, A_5, A_6 fitting constants وباعتبار

ان $2\Delta_{p_s} = K_B A_6$ وهي تمثل pseudogap in the normal state

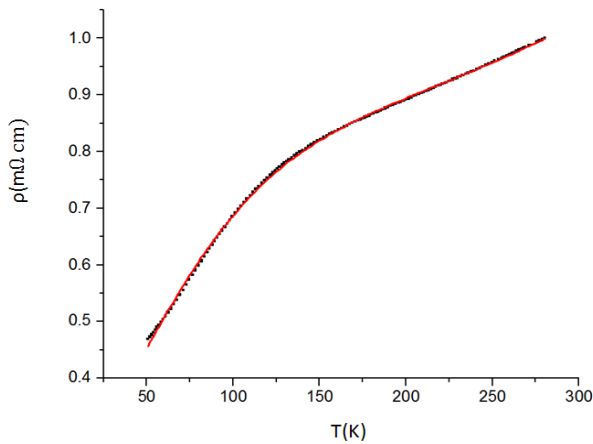
تم اخذ بيانات $\rho_n(T)$ للمركب $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ عند $x=0.10, 0.12, 0.13$ [37] وبتطبيق المعادلة (8) تحصلنا علي الثوابت الظاهرة في المعادلة في جدول (4). بيانات المقاومة $\rho_n(T)$ أخذت في الحالة العادية فقط normal state حيث الحالة العادية لمنحنى المقاومة تنتهي عند اول نقطة انحراف او هبوط للحالة الفائقة التوصيل.

من فجوة الطاقة، بينما هذه الزيادة تعمل على تقليل التفاعلات الإلكترونية مع الشبكة البلورية مما يؤدي الى نقص في طاقة الربط $2\Delta_{\text{pair}}$. واطهر المركب $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ عند $x=0.10$ طاقة مقدارها $2\Delta_{\text{pair}} = 0.358\text{meV}$.



جدول (4) ثوابت المطابقة لمقاوميه $\rho_n(T)$ مشتقة من معادلة (8) للمركب $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$

T (K)	27.59-279.6	50.47-280	58.38-279	45.02-279.75
Compound	$\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$	$\text{SmO}_{0.88}\text{F}_{0.12}\text{FeAs}$	$\text{SmO}_{0.87}\text{F}_{0.13}\text{FeAs}$	$\text{SmO}_{0.85}\text{F}_{0.15}\text{FeAs}$
ρ_0 mΩ cm	0.221405822	0.178182424	0.25470951	0.159177413
A_4 mΩ cm / K	0.005157327	0.005529361	0.00454345	0.003724274
A_5 mΩ cm	-3.717380496	-3.465518401	-2.40770000	-2.707265596
A_6 K	477.085463763	436.997611495	426.84554734	725.216235785
Sse	0.0216	0.0015	0.000714	0.00062
Rsqr	0.995	0.9995	0.9997	0.9998
$\Delta_{\text{pseudogap}}$ meV	41.10	37.65	36.78	62.47

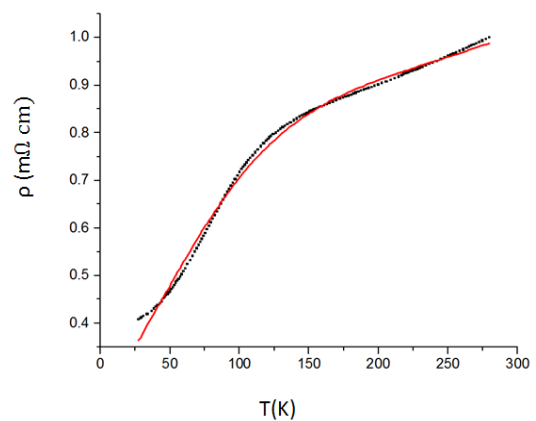


شكل (7) يبين الخط المتصل ببيانات القيم المقدرة من النموذج (معادلة 8) والنقاط المتقطعة

البيانات العملية لتغيرات المقاومة $\rho_n(T)$ مع درجة الحرارة للعينة

$\text{SmO}_{0.88}\text{F}_{0.12}\text{FeAs}$.

تغيرات المقاومة مع درجة الحرارة حسب البيانات العملية ومدى مطابقتها مع النموذج المقدم تظهر في شكل (6)، (7)، (8)، (9) للمركب $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ عند $x=0.10, 0.12, 0.13, 0.15$ والتي تظهر التوافق الجيد للمعادلة (8) مع سلوك المقاومة $\rho_n(T)$ عند درجات الحرارة $T > T_C$.



شكل (6) يبين الخط المتصل ببيانات القيم المقدرة من النموذج (معادلة 8) والنقاط المتقطعة

البيانات العملية لتغيرات المقاومة $\rho_n(T)$ مع درجة الحرارة للعينة

$\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$.

الفجوة الزائفة والتي كانت في مدى 15 meV إلى 40 meV عند $T \leq 100K$ للعائلة Fe As-based superconductors [39].

الفجوة $2\Delta_{Ps}$ المحسوبة للعينة $SmO_{1-x}F_xFeAs$ التي تظهر في جدول (4) تبين ان قيمة الفجوة تنقص بزيادة التطعيم x من $x=0.10$ الى $x=0.13$ ، ولكن عندما $x=0.15$ فإن هذه الفجوة زادت للقيمة 62.47 meV مما يعنى ان الخواص الإلكترونية تتغير بشكل كبير عند هذا التطعيم مؤدية الى فجوة كبيرة، لتدخل في مدى اخر من اعتمادية التطعيم على هذه الفجوة يبدأ من $x \geq 0.15$.

وفي كل الحالات يُعزى الباحثون [40,41] الى أن الفجوة الزائفة يمكن أن تنشأ تحت ظروف معينة في طور الحالة الطبيعية تتحول فيما بعد الى فجوة طاقة في طور التوصيل الفائق، وذلك لاقتران إلكتروني مساهمات الطاقة الفونونية.

4. الاستنتاجات Conclusions

في هذا الورقة تم نمذجة السعة الحرارية والمقاومية $\rho(T)$ ، $C(T)$ المعتمدة على درجة الحرارة، وذلك بالاعتماد على مفاهيم اساسية لنظرية BCS المتضمنة ازواج كوبر cooper pairs، ونموذج المائعين Two Fluid Model المتضمن تواجد ازواج الإلكترونات مع إلكترونات التوصيل في طور الحالة الطبيعية وتم أخذ بيانات المركبات $LaO_{1-x}Fe_xFeAs$ و $SmO_{1-x}F_xFeAs$ وتطبيق النموذج المقترح على هذه البيانات وحساب الثوابت الظاهرة في النموذج ومن تم ايجاد الخواص الفيزيائية لمركب الفائق التوصيل والمتمثلة في درجة الحرارة الحرجة T_c ، وفجوة الطاقة 2Δ ، وطاقة الربط للزوج الإلكتروني $2\Delta_{pair}$ توصلنا الى النتائج التالية:

1- زوج الإلكترون ينشأ بتوسط الفونونات الناشئة من الاهتزاز الشبكي، وظهر ذلك في اقتراح السعة الحرارية الفونونية C_{ph}^n ، a_{ph}^n ، حيث اظهرت التغيرات في السعة الحرارية الفونونية $C_{ph}^n(T)$ للحالة الطبيعية على مدى درجات الحرارة ضمن الطور الطبيعي والطور الفائق عبر درجة الحرارة الحرجة، فجوة طاقة والتي تغيرت الى فجوة طاقة للحالة فائقة التوصيل (2Δ).

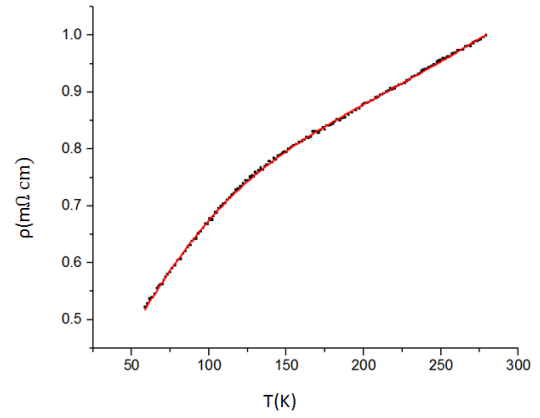
2- ازواج كوبر cooper pairs تبدأ في التكون عند درجة حرارة اعلى من درجة الحرارة الحرجة ($T > T_c$)، وظهر ذلك في اقتراح السعة الحرارية الإلكترونية C_e^s ، a_e^s ، حيث اظهرت التغيرات في السعة الحرارية الإلكترونية $C_e^s(T)$ للحالة فائقة التوصيل على مدى درجات الحرارة ضمن درجة الحرارة الحرجة T_c ، وفجوة الطاقة الى حد كبير تعبر عن طاقة ترابط الأزواج ($2\Delta_{pair}$).

نلاحظ من النقطتين السابقتين أن، اثر الدالة يظهر في الطور الذي تعبره هذه الدالة، بمعنى اذا كانت الدالة في طور الحالة الطبيعية فإن البارامتر لهذه الدالة يظهر اثره في طور الحالة فائقة التوصيل، والعكس صحيح.

3- درجة الحرارة الحرجة تفصل بين طورين محددتين حيث اظهرت معادلة T_c أنها تربط بين بارامترات السعة الحرارية الإلكترونية للحالة الفائقة وبين بارامترات السعة الحرارية الفونونية للحالة العادية، والتي تبين تفاعل الفونون- الإلكترون، وإن الفرق بين فجوة الطاقة وطاقة ربط الزوج له دور في

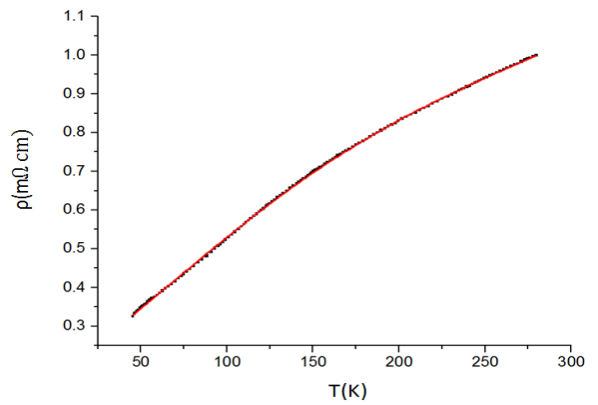
$$T_c = \frac{2\Delta - 2\Delta_{pair}}{k_B \log(a_{ph}^n/a_e^s)} \text{ حيث:}$$

4- حسب النموذج المقدم تم تصنيف اي من هذه المركبات تنتهي الى الاقتران القوى أو الضعيف حيث كانت العينات $LaO_{0.9}F_{0.1}FeAs$ و



شكل (8) يبين الخط المتصل ببيانات القيم المقدرة من النموذج (معادلة 8) والنقاط المتقطعة

البيانات العملية لتغيرات المقاومة $\rho_n(T)$ مع درجة الحرارة للعينة $SmO_{0.87}F_{0.13}FeAs$.



شكل (9) يبين الخط المتصل ببيانات القيم المقدرة من النموذج (معادلة 8) والنقاط المتقطعة

البيانات العملية لتغيرات المقاومة $\rho_n(T)$ مع درجة الحرارة للعينة $SmO_{0.85}F_{0.15}FeAs$.

نلاحظ في جدول (4) أن الثابت A_5 تملك إشارة سالبة، وهي تعنى وجود طور آخر يتضمن الحالة العادية، ويمكن إن يشير الى وجود إلكترونات التوصيل الفائق اعلى درجة الحرارة الحرجة كما تنبأت به نظرية Two Fluid Model، وهذا الطور يرتبط بظهور الفجوة الزائفة pseudogap in normal state وهي تمثل الفجوة بين إلكترونات التوصيل المعتادة وإلكترونات التوصيل الفائقة

$$\text{حيث: } 2\Delta_{Ps} = K_B A_6 \quad A_6 / T = 2\Delta_{Ps} / K_B T \\ K_B = 8.617 \times 10^{-2} \text{ meV / K}$$

دراسة سلوك الحالة العادية مع درجات الحرارة لتغيرات $\rho_n(T)$ بين فجوة زائفة في حدود $2\Delta_{Ps} = 50 \text{ meV}$ وظهرت كانهضاف في طيف Point- PCS contact spectroscopy وكانت بشكل واضح عند $T > T_c$ في عينات $SmO_{1-x}F_xFeAs$ [38]. القياسات الطيفية تستخدم لدراسة التركيبات الإلكترونية للمواد (Angle-resolved photoemission spectroscopy) ARPES ومقياس هذه الفجوة في هذا الطيف يظهر كانهضاف في الطيف او انحراف عن خط معين عند مدى معين للطاقة. يبين وجود هذه الفجوة الزائفة للعينة $SmO_{1-x}F_xFeAs$ والتي كانت في حدود 62 meV و $2\Delta_{Ps} = 20$ [39]، وبشكل عام فإن هذه القياسات الطيفية أظهرت صفة

- $x\text{Ce}_x(\text{O}_{0.9}\text{F}_{0.1})\text{FeAs}$ and $(\text{La}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{OFeAs}$. *Europhysics Letters*. 83(6), 2008, pp.66005.
- [5]- C. Y. Liang, R. C. Che, H. X. Yang, H. F. Tian, R. J. Xiao, J. B. Lu, R. Li and J. Q. Li. Synthesis and structural characterization of LaOFeP superconductors. *Superconductor Science and Technology*. 20(7), 2007, pp.687-690.
- [6]- S. Matsuishi, Y. Inoue, T. Nomura, H. Yanagi, M. Hirano and H. Hosono. Superconductivity Induced by Co-Doping in Quaternary Fluoroarsenide CaFeAsF . *Journal of the American Chemical Society*. 130(44), 2008, pp.14428-14429.
- [7]- Y. L. Chen, C. H. Cheng, Y. J. Cui, H. Zhang, Y. Zhang, Y. Yang and Y. Zhao. Ir doping-induced superconductivity in the SmFeAsO system. *Journal of the American Chemical Society*. 131(30), 2009, pp.10338-10339.
- [8]- J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer. Theory of Superconductivity. *Physical Review*. 108(5), 1957, pp.1175-1204.
- [9]- J. F. Annett. *Superconductivity, Superfluids and Condensates*. New York: Oxford University Press, 2003, Pp. 131-145.
- [10]- D. S. Linden, A Modified Two-Fluid Model of Conductivity for superconducting Surface Resistance Calculation. MSc thesis Master of Science in Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology. 1993.
- [11]- F. C. Niestemski, *Bosonics in the Copper and iron based high transition temperature superconductors*. Ph.D thesis, Boston College. 2009.
- [12]- C. Hainzl and R. Seiringer. Critical temperature and energy gap for the BCS equation. *Physical Review B*. 77(18), 2008, pp.184517.
- [13]- S. I. Mirzaei, V. Guritanu, A. B. Kuzmenko, C. Senatore, D. van der Marel, G. Wu, R. H. Liu and X. H. Chen. Far-infrared probe of superconductivity in $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$. arXiv: 0806.2303v1, 2008.
- [14]- G. F. Chen, Z. Li, G. Li, J. Zhou, D. Wu, J. Dong, W. Z. Hu, P. Zheng, Z. J. Chen, H. Q. Yuan, J. Singleton, J. L. Luo and N. L. Wang. Superconducting properties of the Fe-based layered superconductor $\text{LaFeAsO}_{0.9}\text{F}_{0.1-\delta}$. *Physical Review Letters*. 101(5), 2008, pp.057007.
- [15]- J. Dong, H. J. Zhang, G. Xu, Z. Li, G. Li, W. Z. Hu, D. Wu, G. F. Chen, X. Dai, J. L. Luo, Z. Fang and N. L. Wang. Competing orders and spin-density-wave instability in $\text{La}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)\text{FeAs}$. *Europhysics Letters*. 83(2), 2008, pp.27006.
- [16]- G. F. Chen, Z. Li, D. Wu, G. Li, W. Z. Hu, J. Dong, P. Zheng, J. L. Luo and N. L. Wang. Superconductivity at 41 K and its competition with spin-density-wave instability in layered $\text{CeO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$. *Physical Review Letters*. 100(24), 2008, pp.247002.
- [17]- T. Timusk. The superconducting energy gap. *La Physique Au Canada*. 67(2), 2011, pp.99-100.
- [18]- A. Brown, M. W. Zemansky and H. A. Borse. Behavior of the heat capacity of superconducting niobium below 4.5° K. *Physical Review*. 86(1), 1952, pp.134-135.
- [19]- S. O. Pillai. *Solid state physics*. New Delhi: New age international. 2005. Pp.370-371.
- [20]- W. S. Corak, B. B. Goodman, C. B. Satterthwaite and A. Wexler. Exponential temperature dependence of the electronic specific heat of superconducting Vanadium. *Physical Review*. 96(5), 1954, pp.1442-1444.
- [21]- W. S. Corak, B. B. Goodman, C. B. Satterthwaite and A. Wexler. Atomic heats of normal and superconducting Vanadium. *Physical Review*. 102(3), 1956, p.656-661.
- [22]- Y. Kamihara, H. Hiramatsu, M. Hirano, R. Kawamura, H. Yanagi, T. Kamiya and H. Hosono. Iron-based layered superconductor: LaOFeP . *Journal of the American Chemical Society*. 128(31), 2006, pp.10012-10013.
- [23]- Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano and H. Hosono. Iron-based layered superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x=0.05-0.12$) with $T_c=26$ K, *Journal of the American Chemical Society*. 130(11), 2008, pp.3296-3297.

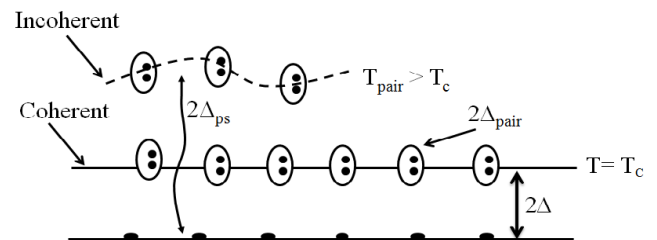
حيث weak-coupling BCS gap ratio في توافق مع $\text{SmO}_{0.87}\text{F}_{0.13}\text{FeAs}$ كانت: $2\Delta / K_B T_c = 3.5-4.2$. اما العينات $\text{SmO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$ و $\text{SmO}_{0.88}\text{F}_{0.12}\text{FeAs}$ فهي تنتهي الى الاقتران القوي strong-coupling BCS gap ratio حيث كانت: $2\Delta / K_B T_c > (3.5-4.2)$.

5- بين النموذج أن فجوة الطاقة 2Δ تزداد، وطاقة الترابط $2\Delta_{\text{pair}}$ تنقص، وذلك مع زيادة كمية التطعيم x للعيونة $\text{SmO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ ، مما يعني أن زيادة التطعيم يزيد في الايونات في طبقات المركب والتي بدورها تزيد من فجوة الطاقة، بينما هذه الزيادة في الايونات تعمل على تقليل التفاعلات الإلكترونية مع الشبكة البلورية مما يؤدي الى نقص في طاقة الربط $2\Delta_{\text{pair}}$. اما بالنسبة للمركب $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ عند $x=0.10$ فقد اظهر طاقة ربط مقدارها meV $2\Delta_{\text{pair}} = 0.358$.

6- الفجوة الزائفة $2\Delta_{\text{ps}}$ ظهرت في نموذج المقاومة $\rho_n(T)$ في حالة الطور الطبيعي $T > T_c$ ، حيث تبين وجود طور اخر متضمن في الطور الطبيعي، وهذا الطور مرتبط بظهور الفجوة الزائفة وهوة يشير الى وجود إلكترونات التوصيل الفائت في الطور الطبيعي كما تنبأت به نظرية Two Fluid Model. ازواج كوبر غير المتماسكة Incoherent في حالة الطور الطبيعي تسبب في نشوء الفجوة

الزائفة، وعند الوصول لدرجة الحرارة الحرجة يحدث طور التماسك Coherent لهذه الأزواج وبذلك تنشأ فجوة الطاقة للموصل الفائت. وظهور الفجوة الزائفة في تغيرات $\rho_n(T)$ امر منطقي جداً، حيث ازواج كوبر في حالة الطور الطبيعي تمتلك طاقة اعلى من الإلكترونات مما يسبب نشوء الفجوة الزائفة، وعند الوصول لدرجة الحرارة الحرجة يحدث طور التماسك حيث تتحول كل الإلكترونات الى ازواج كوبر لتصبح المادة موصل فائق.

7- يبين الشكل (10) تصور لمقاييس فجوة الطاقة $2\Delta_{\text{ps}}$ ، $2\Delta_{\text{pair}}$ ، 2Δ التي تصف الموصل الفائت عند انتقاله من طور الحالة الطبيعية الى طور الحالة الفائقة عند درجة الحرارة الحرجة T_c .



شكل (10) يبين فجوة الطاقة $2\Delta_{\text{ps}}$ ، $2\Delta_{\text{pair}}$ ، 2Δ التي تصف الموصل الفائت عند انتقاله من طور

الحالة الطبيعية الى طور الحالة الفائقة عند درجة الحرارة الحرجة T_c .

5.المراجع References

- [1]- M. Cyrot and D. Pavuna. *Introduction to superconductivity and high- T_c materials*. Singapore: World scientific. 1992 , pp.2-9, 21-23, 28-29, 32-34.
- [2]- K. Fossheim and A. Sudboe. *Superconductivity: physics and applications*. England: John Wiley. 2004 , 6-7, 10-14, 16-17, 18-23, 37, 66.
- [3]- L. Shan, Y. Wang, X. Zhu, G. Mu, L. Fang and Hai-Hu Wen. Point-contact spectroscopy of iron-based layered superconductor $\text{LaO}_{0.9}\text{F}_{0.1-\delta}\text{FeAs}$. *Europhysics*
- [4]- R. C. Che, L. Wang, Z. Chen, C. Ma, C. Y. Liang, J. B. Lu, H. L. Shi, H. X. Yang and J. Q. Li. Superconductivity in $(\text{La}_{1-x}$

- [24]- A. S. Sefat, A. Huq, M. A. McGuire, R. Jin, B. C. Sales, D. Mandrus, L. M. D. Cranswick, P. W. Stephens and K. H. Stone. Superconductivity in $\text{LaFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{AsO}$. *Physical Review B*. 78(10), 2008, pp.104505.
- [25]- L. -Jun Li, Y. -Ke Li, Z. Ren, Y. -Kang Luo, X. Lin, M. He, Q. Tao, Z. -Wei Zhu, G. -Han Cao and Z. -An Xu. Superconductivity above 50 K in $\text{Tb}_{1-x}\text{Th}_x\text{FeAsO}$. *Physical Review B*. 78(13), 2008, pp.132506.
- [26]- S. J. Singh, J. Prakash, S. Patnaik and A. K. Ganguli. Enhancement of the superconducting transition temperature and upper critical field of $\text{LaO}_{0.8}\text{F}_{0.2}\text{FeAs}$ with antimony doping. *Superconductor Science and Technology*. 22(4), 2009, pp.045017.
- [27]- C. Wang, Z. Gao, L. Wang, Y. Qi, D. Wang, C. Yao, Z. Zhang and Y. Ma. Low-temperature synthesis of $\text{SmO}_{0.8}\text{F}_{0.2}\text{FeAs}$ superconductor with $T_c=56.1$ K. *Superconductor Science and Technology*. 23(5), 2010, pp.055002.
- [28]- C. Wang, L. Li, S. Chi, Z. Zhu, Z. Ren, Y. Li, Y. Wang, X. Lin, Y. Luo, S. Jiang, X. Xu, G. Cao and Z. Xu. Thorium-doping-induced superconductivity up to 56 K in $\text{Gd}_{1-x}\text{Th}_x\text{FeAsO}$. *Europhysics Letters*. 83(6), 2008, pp.67006
- [29]- Access, Open P J Baker, S R Giblin, F L Pratt, R H Liu, G Wu, X H Chen, M J Pitcher, D R Parker, S J Clarke and S J Blundell., Heat Capacity Measurements on FeAs-Based Compounds: A Thermodynamic Probe of Electronic and Magnetic States. *New Journal of Physics*, 11 (2009) 025010 ,2009, pp1-12.
- [30]- C. Hess, A. Kondrat, A. Narduzzo, J. E. Hamann-Borrero, R. Klingeler, J. Werner, G. Behr and B. Buchner. The intrinsic electronic phase diagram of iron-oxypnictide Superconductors. *Europhysics Letters*. 87(1), 2009, pp.17005.
- [31]- . A. S. Sefat, M. A. McGuire, B. C. Sales, R. Jin, J. Y. Howe and D. Mandrus. Electronic correlations in the superconductor $\text{LaFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$ with low carrier density. *Physical Review B*. 77(17), 2008, pp.174503.
- [32]- E. Arushanov, S. Levchenko, G. Fuchs and S.-L. Drechsler Resistivity scaling 1111 iron-pnictide superconductors. *Physica C*. 471(17-18), 2011, pp.509-514.
- [33]- Ptok, Andrzej, et al. Effects of Pair-Hopping Coupling on Properties of Multi-Band Iron- Based Superconductors. no. August, 2020, pp. 1–16.
- [34]- Kuzmenko, N. K. "BCS Universal Ratios in Finite Systems." *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, vol. 576, no. June, 2020, p. 1353709.
- [35]- Weber, Frank, and Rolf Heid. Direct Observation of the Superconducting Gap in Phonon Spectra. no. January, 2009,
- [36]- Du, Zengyi, et al. "Scrutinizing the Double Superconducting Gaps and Strong Coupling Pairing in $(\text{Li}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{OHFeSe}$." *Nature Communications*, vol. 7, 2016, pp. 1–8.
- [37]- Drew, A. J., et al. "Coexistence of Static Magnetism and Superconductivity in $\text{SmFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ as Revealed by muon Spin Rotation." *Nature Materials*, vol. 8, no. 4, 2009, pp. 310–14.
- [38]- R.S. Gonnelli, D. Daghero, M. Tortello, G.A. Ummarino, V.A. Stepanov, J. S. Kim and R. K. Kremer. Coexistence of two order parameters and a pseudogaplike feature in the iron-based superconductor $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$. *Physical Review B*. 79(18), 2009, pp.184526.
- [39]- Y. Ishida, T. Shimojima, K. Ishizaka, T. Kiss, M. Okawa, T. Togashi, S. Watanabe, X. Wang, C. Chen, Y. Kamihara, M. Hirano, H. Hosono and S. Shin. Unusual pseudogap features observed in iron oxypnictide superconductors. *Journal of the Physical Society of Japan*. 77(C), 2008, pp.61-64.
- [40]- X. Huang. A unified theory of superconductivity. *arXiv:physics.gen-ph/0804.1615v2*, 2008.
- [41]- X. Huang. Real Space Coulomb Interaction: A Pairing Glue for FeAs Superconductors. *arXiv:cond-mat/0806.3125v2*, 2008.