

Atenuasi Ultrasonik dan Modulus Ricih pada Suhu Genting Superkonduktor Terdop Sederhana $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$

(Ultrasonic Attenuation and Shear Modulus at the Critical Temperature of Moderately Doped $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$ Superconductor)

R. ABD-SHUKOR^{1*}, L.K. TAN¹, NOR AZAH NIK-JAAFAR² & M.N. MOHD NASIR¹

¹*Department of Applied Physics, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia*

²*Pusat GENIUS@Pintar Negara, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia*

Diserahkan: 5 Mac 2021/Diterima: 14 Jun 2022

ABSTRAK

Modulus ricih dan atenuasi ultrasonik superkonduktor suhu tinggi terdop sederhana $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$ (Tl-1212) dengan suhu genting (T_c) 98 K telah dikaji. Modulus ricih, G meningkat apabila suhu diturunkan daripada 240 K ke 80 K yang menunjukkan pengerasan kekisi. Walau bagaimanapun, pada suhu antara 160 K hingga 190 K modulus ricih menunjukkan anomali menandakan kecenderungan untuk kekisi melembut. Berhampiran suhu genting modulus ricih menunjukkan pelembutan kekisi iaitu ketakselajaran pada cerun (dG/dT) dan ini sejajar dengan ciri peralihan fasa termodinamik tertib ke dua. Peratus perubahan modulus ricih antara 240 K dan 80 K ialah 5.5%. Atenuasi ultrasonik menunjukkan penurunan mendadak daripada 240 K ke 210 K diikuti dengan profil yang hampir mendatar sehingga 140 K. Puncak atenuasi dicerap berhampiran suhu genting dan ini menunjukkan penyerapan tenaga akustik meningkat apabila bahan memasuki fasa mensuperkonduksi. Anomali modulus ricih dan atenuasi ultrasonik ini dijelaskan melalui peralihan fasa tertib kedua dan tertiban oksigen jarak dekat dalam satah Cu-O unit sel bahan superkonduktor ini.

Kata kunci: Getaran kekisi; mikrostruktur; peralihan fasa; sifat akustik

ABSTRACT

The shear modulus and ultrasonic attenuation of a moderately doped $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$ (Tl-1212) high temperature superconductor with critical temperature (T_c) of 98 K have been studied. The shear modulus, G increased when the temperature was lowered from 240 K to 80 K indicating lattice hardenings. However, at temperatures between 160 K and 190 K, the shear modulus showed an anomaly indicating a lattice softening tendency. Near the critical temperature the shear modulus showed lattice softenings i.e., a discontinuity in the slope (dG/dT) and this is consistent with the characteristic of a second-order thermodynamic phase transition. The percent change in shear modulus between 240 K and 80 K was 5.5%. Ultrasonic attenuation showed a sharp decrease from 240 K to 210 K followed by a near horizontal profile to 140 K. An attenuation peak was observed near the critical temperature and this indicated an increase in acoustic energy absorption as the material entered the superconducting phase. The shear modulus and ultrasonic attenuation anomalies were explained using the second-order phase transition and short-range oxygen orderings in the Cu-O plane of the cell unit of this superconducting material.

Keywords: Acoustic properties; lattice vibration; microstructure; phase transition

PENGENALAN

Atenuasi ultrasonik dan modulus kekenyalan adalah sensitif dalam mengesan perubahan getaran kekisi dan peralihan fasa. Sifat kenyal superkonduktor kuprum oksida

menunjukkan anomali yang menandakan ketidakstabilan kekisi dan peralihan antara fasa superkonduktor dan bukan superkonduktor (Abd-Shukor 2018; Neeleshwar et al. 2006; Vui & Abd-Shukor 2016; Zhang et al. 2011).

Terdapat beberapa laporan mengenai pengukuran ultrasonik terhadap bahan superkonduktor kuprum oksida sistem La, Bi, Y dan nadir bumi lain. Walau bagaimanapun, laporan mengenai bahan sistem Tl tidak begitu banyak disebabkan oleh kesukaran menyediakan sampel berkualiti tinggi. Ini termasuklah ketulenan dan ketumpatan yang tinggi serta bebas daripada ketidaksempurnaan mikroskopik supaya gema ultrasonik boleh diperolehi untuk membolehkan pengukuran dijalankan (Abd-Shukor 1997; Yahya & Abd-Shukor 1998; Yusrianto et al. 2021).

Lapisan kuprum oksida (Cu-O) memainkan peranan penting dalam kesuperkonduksian bahan ini. Kajian ultrasonik boleh digunakan untuk mengkaji interaksi gelombang ultrasonik dengan lapisan Cu-O ini. Superkonduktor suhu tinggi sistem Tl amat menarik kerana ia merangkumi banyak fasa dengan pelbagai bilangan lapisan Cu-O. Walaupun sifat fizik dan kimianya menarik, laporan ultrasonik dan sifat kenyal bahan ini masih tidak banyak dilaporkan. Mod akustik ricih dilaporkan mempunyai gandingan kuat dengan sifat superkonduktor kuprum oksida (Bhattacharya et al. 1988; Toulouse et al. 1988). Oleh itu, maklumat mengenai rambatan ultrasonik gelombang ricih dalam bahan ini adalah sangat penting untuk diperolehi.

Bahan yang dikaji dalam penyelidikan ini ialah $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$ (Tl-1212). Bahan ini dipilih kerana suhu gentingnya yang agak tinggi dan boleh disediakan dengan ketulenan dan ketumpatan yang tinggi. Objektif kajian ini adalah untuk mengkaji atenuasi ultrasonik dan modulus ricih superkonduktor suhu tinggi $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$ dengan memberi tumpuan kepada julat berhampiran suhu peralihan atau suhu genting, T_c . Sampel juga dicirikan dengan pembelauan sinar-X untuk menentukan struktur, mikroskop imbasan elektron (SEM) untuk melihat mikrostruktur dan rintangan elektrik melawan suhu untuk menentukan keadaan normal dan suhu gentingnya.

BAHAN DAN KAEDAH

Serbuk tulen (99.9 %) Cr_2O_3 , SrO, CaO dan CuO digunakan untuk menyediakan sampel dengan kaedah tindak balas keadaan pepejal. Bahan oksida tersebut dicampur dengan komposisi nominal $\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$, dikisar dalam mortar dan dikalsinkan dalam udara pada suhu 900 °C selama 48 jam. Serbuk pelopor ini kemudiannya dicampurkan dengan Bi_2O_3 dan Tl_2O_3 mengikut formula nominal $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$ dan ditekan menjadi pelet berdiameter 12.5 mm

dan ketebalan 2.5 mm. Pelet seterusnya dipanaskan pada suhu 1000 °C dalam aliran oksigen selama 4 minit. Sampel dikisar semula dan Tl_2O_3 yang hilang semasa pemanasan pertama ditambah dan seterusnya dipanas sekali lagi pada suhu dan tempoh yang sama. Langkah ini telah meningkatkan ketumpatan sampel dan corak gema ultrasonik dapat dicerap. Ini membolehkan pengukuran ultrasonik dijalankan. Ketumpatan sampel ditentukan dengan membahagikan jisim dengan isi padu pelet. Isi padu dihitung dengan mengukur dimensi pelet.

Corak pembelauan sinar-X dengan sinaran CuK_α (panjang gelombang $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) diperolehi menggunakan difraktometer Siemens D 5000 dengan sudut $2\theta = 2^\circ$ hingga 60° . Parameter kekisi dikira menggunakan sekurang-kurangnya 10 puncak dengan perisian PTC Mathcad Prime 4.0. Mikrograf mikroskop elektron imbasan (SEM) diperolehi menggunakan mikroskop Philips XL 30.

Pengukuran rintangan elektrik telah dijalankan melalui teknik empat titik dengan sentuhan cat perak. Jarak antara titik adalah 1 hingga 2 mm. Radas uji kaji terdiri daripada Keithley 197 Autoranging Microvolt DMM dan sumber arus Keithley 220 dengan arus malar daripada 1 mA hingga 100 mA. Sistem kriogenik tertutup CTI Cryogenics Model 22 dan pengawal suhu Lake Shore Model 340 telah digunakan untuk pengukuran suhu rendah.

Atenuasi ultrasonik, α dan halaju ricih, v_s diukur secara serentak menggunakan sistem Matec 7700, yang menggunakan teknik gema denyut bertindih. Sampel dihubungkan dengan transduser menggunakan gris Nonaq. Transduser kuarza potong Y (ricih) pada frekuensi $f = 5.69 \text{ MHz}$ telah digunakan. Frekuensi ini digunakan kerana ia memberikan corak gema terbaik. Pengukuran ultrasonik suhu rendah telah dijalankan menggunakan kriostat cecair nitrogen Oxford Instruments model DN 1711. Suhu telah diubah pada kadar kira-kira 0.5 K/min semasa pemanasan atau penyejukan antara 80 K hingga 240 K. Tiada pembetulan pengembangan haba dibuat.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Corak pembelauan sinar-X menunjukkan fasa tunggal (Rajah 1). Parameter kekisi menunjukkan fasa tetragonal $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$ dengan kumpulan ruang P4/mmm. Pecahan isi padu fasa ditentukan dengan membandingkan puncak tertinggi fasa Tl-1212 iaitu puncak (103) dan puncak tertinggi fasa Tl-1201 iaitu (102). Puncak fasa Tl-1201 ditandakan dengan (*) pada Rajah 1. Corak pembelauan menunjukkan fasa Tl-1212

JADUAL 1. T_c , parameter kekisi, ketumpatan, halaju ricih (v_s), modulus ricih (G) diukur pada 80 K bagi superkonduktor $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$

| $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$ | |
|--|----------------|
| T_c / K | 98 |
| Parameter Kekisi: | |
| $a / \text{Å}$ | 3.815 |
| $c / \text{Å}$ | 12.11 |
| % Fasa 1212:1201 | 76:24 |
| Ketumpatan/ g cm^{-3} | 5.40 |
| $v_s / \text{m s}^{-1}$ | 2822 ± 23 |
| G / GPa | 43.0 ± 1.2 |

adalah dominan (76 %) dan fasa Tl-1201 adalah fasa sampingan (24 %). Parameter kekisi $a = 3.815 \text{ Å}$ dan $c = 12.11 \text{ Å}$ (Jadual 1). Ketumpatan sampel adalah 5.40 g/cm^3 .

Mikroskop imbasan elektron (SEM) bahagian dalaman sampel menunjukkan butiran adalah berbentuk rawak dan saiz purata lebih kurang $d = 5 \mu\text{m}$ (Rajah 2). Saiz purata butiran d dianggar dengan mengukur secara manual saiz terbesar setiap butiran bagi 50 butiran. Serakan gelombang ultrasonik sangat bergantung kepada nisbah panjang gelombang terhadap saiz purata butiran. Ia juga dipengaruhi oleh butiran yang besar pada laluan gelombang. Panjang gelombang ultrasonik ($\lambda = v/f$) yang digunakan adalah sekitar $500 \mu\text{m}$ dan ini jauh lebih besar daripada saiz purata butiran sampel. Oleh sebab $\lambda \gg d$, serakan adalah kecil maka gelombang ultrasonik dapat melalui bahan superkonduktor ini dan seterusnya menghasilkan gema melalui pemalangan pada permukaan berlawanan.

Graf rintangan elektrik melawan suhu menunjukkan profil yang tidak berubah dengan suhu iaitu sifat normal seperti semi-logam. Suhu genting, T_c ialah 98 K (Rajah 3). Bahan adalah terdop optimum apabila lengkung rintangan melawan suhu sebelum memasuki fasa mensuperkonduksi menunjukkan penurunan linear apabila suhu diturunkan. Sementara itu bagi bahan terdop sederhana lengkung rintangan melawan suhu sebelum memasuki fasa mensuperkonduksi tidak berubah apabila suhu berubah iaitu bersifat semi-logam seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Keadaan semi-logam ini menunjukkan bahawa bahan $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$ yang dikaji ini dalam keadaan terdop sederhana. Kebanyakan laporan sebelum ini adalah mengenai bahan terdop optimum. Keadaan terdop sederhana bahan ini

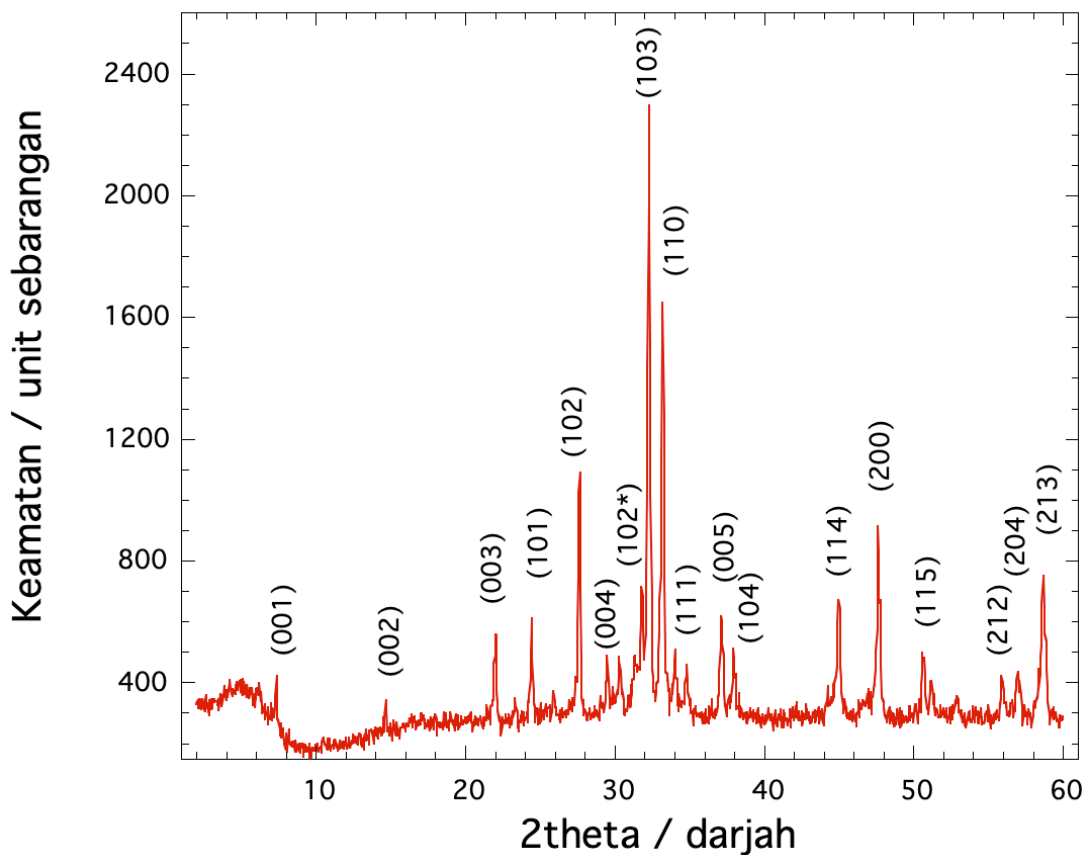
memberikan maklumat baru mengenai sifat modulus ricih dan atenuasi ultrasonik superkonduktor jenis ini.

Bagi sampel polihablur, modulus ricih diberikan sebagai $G = \rho v_s^2$ dengan ρ ialah ketumpatan, v_s ialah halaju bunyi ricih. Modulus ricih menunjukkan kira-kira 5.5% peningkatan antara 240 K dan 80 K (Rajah 4). Tiada histeresis modulus ricih dicerap dalam pengukuran ini. Histeresis terma telah dilaporkan berlaku apabila pengukuran diambil semasa penyejukan dan pemanasan sampel $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ dengan butiran kasar (Mamsurova et al. 1990). Ketiadaan histeresis bagi sampel $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$ ini menunjukkan tiada pengaruh dalaman disebabkan sifat polihablur sampel. Jelas, histeresis terma dalam superkonduktor kuprum oksida adalah disebabkan oleh faktor mikrostruktur termasuk saiz butiran dan tidak berkaitan dengan mekanisme kesuperkonduksian. Modulus ricih pada 80 K ialah $G = 43.0 \text{ GPa}$.

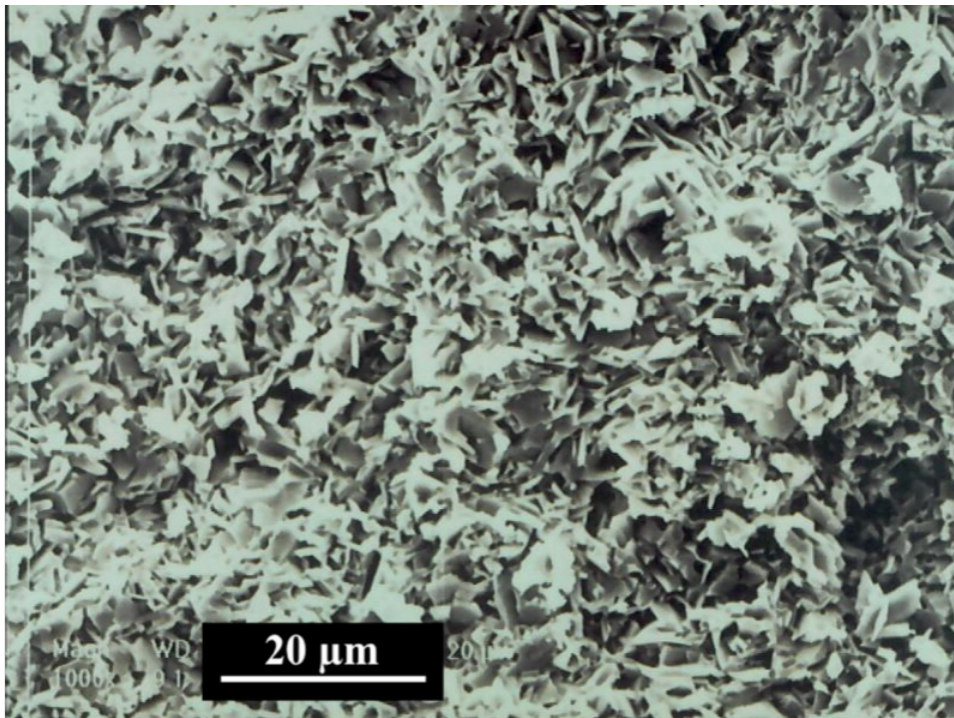
Pada suhu 160 hingga 190 K modulus ricih menunjukkan anomali iaitu pelembutan kekisi. Bahan Tl-1212 seperti $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$ yang terdop sederhana mempunyai kekosongan oksigen pada tapak O(3) pada satah Tl-O antara 80% hingga 88% (Ledersert et al. 1994). Proses tertiban oksigen jarak pendek seperti yang dicadangkan dalam superkonduktor berasaskan Tl ini boleh dikaitkan dengan kecenderungan pelembutan kekisi berhampiran suhu ini (Klehe et al. 1996). Kajian yang melibatkan kesan penyaringan daripada polarisasi yang tinggi oleh atom oksigen telah menunjukkan bahawa peralihan boleh berlaku pada suhu melebihi suhu genting. Oleh itu, anomali modulus ricih pada 160 K hingga 190 K mungkin disebabkan oleh tertiban oksigen jarak dekat (Klehe et al. 1996).

Pada berhampiran suhu genting, satu puncak pada modulus ricih telah dicerap. Sisipan pada Rajah 4 menunjukkan wujud ketakselajaran pada modulus ricih yang membawa maksud terdapat pelembutan kekisi pada suhu genting, T_c . Termodinamik peralihan fasa tertib kedua seperti peralihan superkonduktor dalam medan sifar memberikan anomali dalam modulus ricih pada suhu genting seperti berikut: $\frac{\Delta G}{G} = \frac{T\Delta S}{T_c} G \frac{\partial^2 T_c}{\partial \sigma^2}$, dengan ΔS ialah perubahan entropi pada T_c dan σ ialah tegasan ricih yang berkaitan (Alers 1966; Testardi 1975). Dalam fasa peralihan tertib kedua, $\Delta S = 0$ maka $\frac{\Delta G}{G} = 0$. Graf sisipan dalam Rajah 4 menunjukkan berhampiran suhu genting terdapat ketakselajaran pada terbitan modulus ricih terhadap suhu iaitu $\left. \frac{dG}{dT} \right|_{T>T_c} \neq \left. \frac{dG}{dT} \right|_{T<T_c}$. Garis putus-putus dalam sisipan menunjukkan perubahan kecerunan (dG/dT) dari negatif pada $T > T_c$ ke positif pada $T < T_c$. Ciri modulus ricih pada suhu genting adalah selaras dengan jangkaan daripada teori termodinamik peralihan fasa tertib kedua.

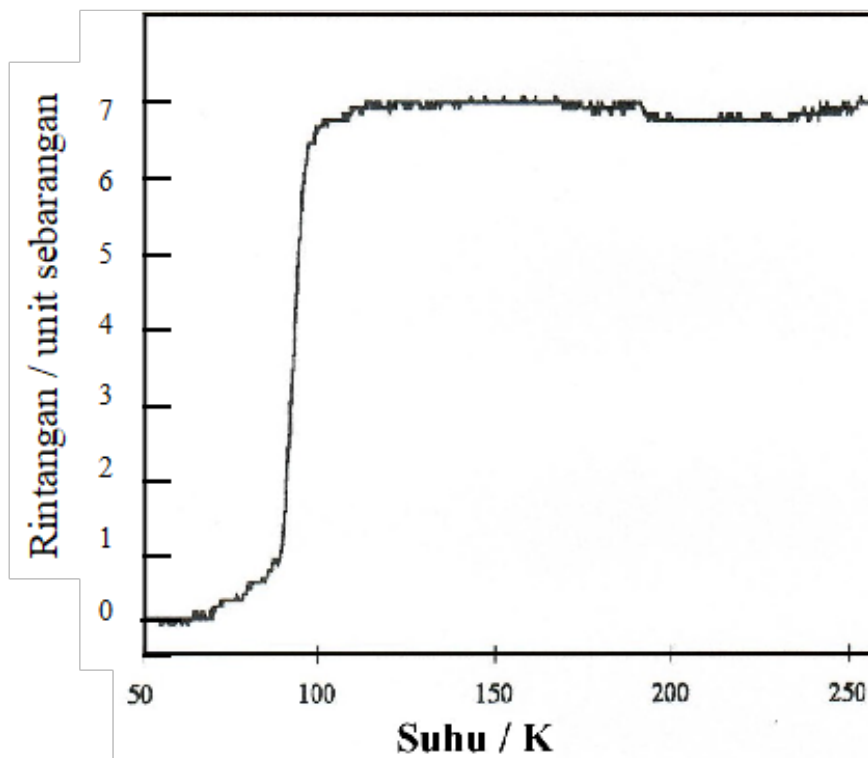
Atenuasi ultrasonik gelombang ricih yang diukur secara serentak dengan modulus ricih menunjukkan penurunan mendadak dari 240 K ke 210 K dan satu puncak pada 100 K (Rajah 5). Puncak atenuasi boleh dikaitkan dengan penyerapan tenaga ultrasonik yang meningkat dalam fasa superkonduktor. Dalam superkonduktor konvensional atenuasi ultrasonik, α menunjukkan penurunan eksponen disebabkan oleh kondensasi elektron yang membentuk pasangan Cooper apabila suhu diturunkan di bawah suhu genting iaitu $T_c \propto e^{-\Delta/kT}$, dengan Δ ialah jurang tenaga dan k ialah pemalar Boltzmann. Untuk superkonduktor pseudo-jurang dengan jurang tenaga zarah tunggal Δ_p , kadar pengurangan frekuensi fonon pada suhu rendah $T \ll T_c$ ditentukan oleh mod kolektifnya dan atenuasi adalah berkadar dengan $\alpha \propto e^{-2\Delta_p/kT}$. Perbezaan faktor 2 dalam eksponen berbanding dengan superkonduktor Bardeen-Cooper-Schrieffer adalah kerana superkonduktor pseudospin menyokong pengujaan zarah tunggal dengan tenaga terendah 2Δ (Shtyk & Feigel'man 2016). Sisipan



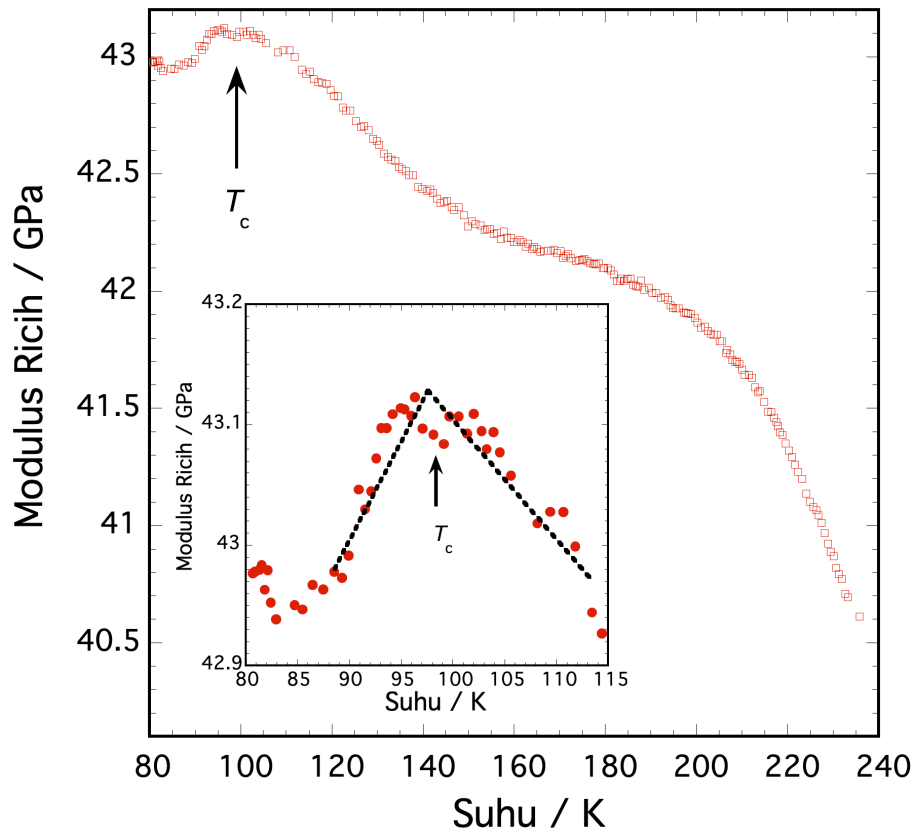
RAJAH 1. Corak pembelauan sinar-X superkonduktor $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$. Puncak ditanda dengan * merujuk kepada fasa Tl-1201



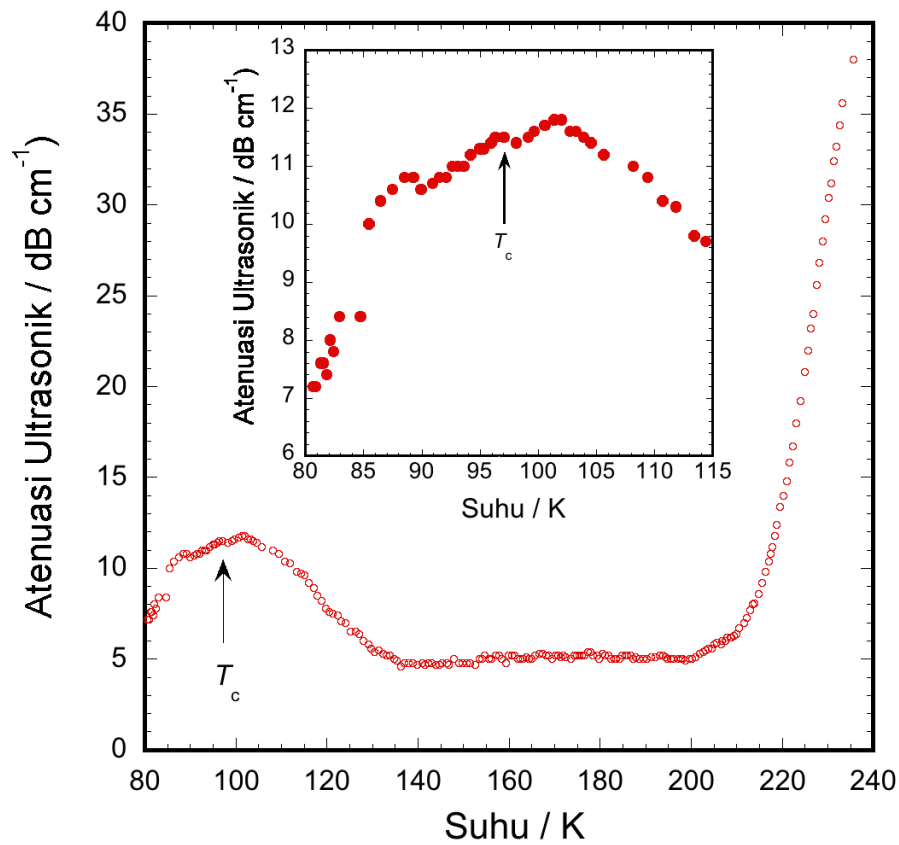
RAJAH 2. Mikrograf SEM superkonduktor $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$



RAJAH 3. Rintangan elektrik lawan suhu bagi $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$, yang menunjukkan profil seperti semi-logam iaitu terdop sederhana



RAJAH 4. Modulus ricih melawan suhu superkonduktor $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$. Graf sisipan menunjukkan modulus ricih berhampiran suhu genting. Garis putus-putus dalam sisipan adalah anggaran kecerunan iaitu dG/dT pada $T < T_c$ dan $T > T_c$



RAJAH 5. Atenuasi ultrasonik melawan suhu superkonduktor $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$. Graf sisipan menunjukkan puncak atenuasi berhampiran suhu genting

pada Rajah 5 tidak menunjukkan penurunan atenuasi yang linear atau eksponen. Ini mungkin kerana atenuasi perlu diukur pada suhu yang lebih rendah daripada 80 K untuk melihat kelakuan penurunan yang jelas.

Puncak atenuasi berhampiran T_c hanya diperhatikan dalam sebilangan kecil superkonduktor berasaskan Tl- dan Hg (Sun et al. 1990; Zhou et al. 1995). Kebanyakan sampel lain tidak menunjukkan puncak atenuasi berhampiran suhu genting. Percanggahan ini mungkin disebabkan oleh aras pengedopan sampel yang diukur. Boleh disimpulkan bahawa sampel terdop optimum tidak mempamerkan puncak atenuasi manakala sampel terdop sederhana menunjukkan puncak pada suhu genting.

KESIMPULAN

Pengukuran modulus ricih dan atenuasi ultrasonik telah dilakukan terhadap superkonduktor terdop sederhana $(\text{Tl}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Sr}_2(\text{Ca}_{0.9}\text{Cr}_{0.1})\text{Cu}_2\text{O}_7$. Bahan terdop sederhana ini tidak menunjukkan histeresis terma dalam modulus ricih dan atenuasi ultrasonik. Histeresis terma selalunya dicerap dalam bahan superkonduktor yang berketumpatan rendah dan saiz butiran yang besar. Histeresis terma atenuasi ultrasonik dan modulus ricih juga bergantung kepada keadaan pengedopan bahan. Hasil kajian ini juga menunjukkan kecenderungan kekisi melembut pada T_c dan ini membantu dalam pembentukan pasangan Cooper dan fasa superkonduktor dalam bahan ini. Keputusan yang menarik ini perlu dikaji lebih lanjut untuk menentukan mengapa tidak semua superkonduktor berasaskan kuprum oksida menunjukkan puncak atenuasi dan anomali modulus ricih pada T_c .

PENGHARGAAN

Penyelidikan ini dibiayai oleh Kementerian Pendidikan Tinggi Malaysia di bawah geran no. FRGS/1/2020/STG07/UKM/01/1.

RUJUKAN

- Abd-Shukor, R. 2018. Ultrasonic and elastic properties of Tl- and Hg-based cuprate superconductors: a review. *Phase Transitions* 91: 48-57.
- Abd-Shukor, R. 1997. Ultrasonic shear velocity anomalies in bulk thallium-1212 high T_c superconductors. *Modern Physics Letters B* 11(8): 359-365.
- Alers, G.A. 1966. The measurement of very small sound velocity changes and their use in the study of solids. In *Physical Acoustics 4A*, edited by Mason, W.P. New York: Academic Press. hlm. 277.
- Bhattacharya, S., Higgins, M.J., Johnston, D.C., Jacobson, A.J., Stokes, J.P., Goshorn, D.P. & Lewandowski, J.T. 1988. Elastic anomalies and phase transitions in high- T_c superconductors. *Physical Review Letters* 60: 1181-1184.
- Klehe, A-K., Looney, C., Schilling, J.S., Takahashi, H., Mori, N., Shimakawa, Y., Kubo, Y., Manako, T., Doyle, S. & Hermann, A.M. 1996. Pressure-induced oxygen ordering phenomena in high- T_c superconductors. *Physica C* 257: 105-116.
- Ledesert, M., Maignan, A., Chardon, J., Martin, C., Rh. Labbe, Hervieu, M. & Raveau, B. 1994. (Tl,Bi)Sr₂CaCu₂O₇ "1212" superconducting single crystal - A structural and magnetic study. *Physica C* 232: 387-395.
- Mamsurova, L.G., Pigalskiy, K.S., Sakun, V.P., Shushin, A.I. & Scherbakova, L.G. 1990. First- and second-order phase transitions and oxygen rearrangement over the Cu1-O4 chains in orthorhombic YBa₂Cu₃O_{6+x} at low temperatures. *Physica C* 167: 11-19.
- Neeleshwar, S., Muralidhar, M., Murakami, M. & Venugopal Reddy, P. 2006. Elastic behavior of oxygen controlled melt growth processed NEG-123 HTSC materials. *International Journal of Modern Physics B* 20: 667-675.
- Shtyk, A.V. & Feigel'man, M.V. 2016. Ultrasonic attenuation in a pseudogapped superconductor. *ArXive. cond-mat.supr-con*. 1609.01683v1.
- Sun, K.J., Winfree, W.P., Xu, M-F., Levy, M., Sarma, B.K., Singh, A.K., Osofsky, M.S. & Le Tournau, V.M. 1990. Enhanced ultrasonic attenuation of Tl-Ca-Ba-Cu-O at the superconducting transition. *Physical Review B* 42(4): 2569-2572.
- Testardi, R.L. 1975. Elastic modulus, thermal expansion and specific heat at the phase transition. *Physical Review B* 12: 3849-3854.
- Toulouse, J., Wang, X.M. & Hong, D.L.J. 1988. Ultrasonic evidence for a structural phase transition at 220 K in YBa₂Cu₃O_{7-δ}. *Physical Review B* 38: 7077-7079.
- Vui, C.T. & Abd-Shukor, R. 2016. Ultrasonic attenuation anomalies of n-type superconductor Pr_{2-x}Ce_xCuO₄. *Modern Physics Letters B* 30: 1650314.
- Yahya, A.K. & Abd-Shukor, R. 1998. Ultrasonic velocity studies on Tl₂Ba₂Ca₂Cu₃O₁₀ superconductor. *Modern Physics Letters B* 12(24): 1029-1037.
- Yusrianto, Y., Jannah, A.N. & Abd-Shukor, R. 2021. Pembentukan fasa dan suhu genting superkonduktor $(\text{Tl}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{Sr}_2\text{Ca}(\text{Cu}_{2-x}\text{Cr}_x)\text{O}_7$, $x = 0 - 0.100$. *Sains Malaysiana* 50(6): 1775-1786.
- Zhang, L., Ying, X.N. & Yuan, Y.H. 2011. Internal friction study on bilayer cuprates Pr(Ba_{1-x}Sr_x)₂Cu₃O_{7-δ}. *Physica C* 471: 62-65.
- Zhou, H.L., Huang, Y.N., Zhu, J.S. & Wang, Y.N. 1995. Internal friction related to carriers in Hg-system superconductors. *Physica Status Solidi (a)* 150(2): 743-748.

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: ras@ukm.edu.my