RBa₂Cu₃O_y (R = Y, Er, Ho, Dy) 超伝導体の内部摩擦†

稲垣 雅彦* 手嶋 豊*
小澤 正邦** 鈴木 傑**

Internal Friction of Superconductor RBa₂Cu₃O_y (R = Y, Er, Ho and Dy)

by

Masahiko INAGAKI*, Yutaka TESHIMA*, Masakuni OZAWA**
and Suguru SUZUKI**

The internal-friction (IF) of superconductor RBa₂Cu₃O_y (R = Y, Er, Ho and Dy) was measured by a torsional vibration method in the frequency range of 0.032 - 10 Hz. IF peaks were observed in the temperature range 410-520 K. The peak-temperatures were influenced by the kind of rare-earth ions in R-site as well as the measured frequencies. The relaxation process was characterized by an average activation enthalpy of $H = 1.17 \pm 0.05$ eV and a pre-exponential factor of $\log(\tau_0) = -13.0 \pm 0.5$ for YBa₂Cu₃O_y, $H = 1.17 \pm 0.05$ eV and $\log(\tau_0) = -13.0 \pm 0.6$ for ErBa₂Cu₃O_y, $H = 1.24 \pm 0.01$ eV and $\log(\tau_0) = -14.2 \pm 0.1$ for HoBa₂Cu₃O_y, $H = 1.17 \pm 0.03$ eV and $\log(\tau_0) = -13.5 \pm 0.3$ for DyBa₂Cu₃O_y, respectively. The relaxation time (τ) decreased with increasing the ionic radius of rare-earth ion in R-site. The activation enthalpy, however, was little affected by the ionic radius of R-site cation in RBa₂Cu₃O_y.

Key words: Oxide superconductor, Internal friction, Anelastic relaxation, Rare earth

1 緒 言

Fig. 1 は YBa₂Cu₃O_y の結晶構造を示す。YBa₂Cu₃O_y の Y のサイト (希土類サイト) を希土類元素で置換した RBa₂Cu₃O_y (R = 希土類元素) は Pr 等の一部の希土類元素を除いて YBa₂Cu₃O_y と同様に超伝導を示す。^{1), 2)} 内部摩擦測定による YBa₂Cu₃O_y の結晶中における酸素緩和の研究が行われており、O (1) - O (5) サイト間の酸素のホッピングに対応する内部摩擦ピークが室温より高い温度において観測されている。^{3)~15)} ReBa₂Cu₃O_y における希土類サイトのイオンの置換は結晶中における酸素の緩和に影響を与えることが予想される。Tallon らは~40kHz の測定周波数での内部摩擦測定において、LaBa₂Cu₃O_y, NdBa₂Cu₃O_y, GdBa₂Cu₃O_y, YBa₂Cu₃O_y の場合、それぞれ 623, 647, 681, 816K に内部摩擦ピークが観測され、希土類元素のイオン半径の増加に伴い内部摩擦ピークが低温側にシフトすることを報告している。¹⁶⁾ しかし、内部摩擦のピーク温度が斜方晶-正方晶 (O-T) 転移温度に近く、酸素緩和と相転移が重なった現象として観測されている。Arzhavitin らは GdBa₂Cu₃O_y, EuBa₂Cu₃O_y, YbBa₂Cu₃O_y, DyBa₂Cu₃O_y に対して~100Hz の測定周波数での内部摩擦測定を報告している。¹⁷⁾ これらの報告は単一の周波数によるもので、緩和時間の温度依存性について十分な検討がなされていない。また、酸素原子のサイト間のホッピングに必要な活性化エンタルピーの値も得られていない。

本研究は内部摩擦測定により一連の RBa₂Cu₃O_y (R = Y, Er, Ho, Dy) について酸素原子の緩和挙動の解析を行うとともに、希土類サイトの希土類元素の置換が結晶中

の酸素の緩和挙動に及ぼす影響を、緩和時間および活性化エンタルピーのデータを検討し、明確にすることを目的とする。

2 実 験

2.1 試料調製

Y₂O₃, Er₂O₃, Ho₂O₃, Dy₂O₃ (信越化学工業, 99.9%), BaCO₃, CuO (和光鋳業, 99.9%) を用い、固相反応法により RBa₂Cu₃O_y (R = Y, Er, Ho, Dy) を合成した。

Fig. 1. Unit cell of YBa₂Cu₃O_y. Adapted from Jorgensen *et al.*²⁰⁾

† 原稿受理 平成9年8月17日 Received Aug. 18, 1997

* 名古屋工業大学セラミックス研究施設 〒507-0071 多治見市旭ヶ丘, Ceramics Res. Lab., Nagoya Inst. of Tech., Asahigaoka, Tajimi, 507-0071

** 正会員 名古屋工業大学セラミックス研究施設 〒507-0071 多治見市旭ヶ丘, Ceramics Res. Lab., Nagoya Inst. of Tech., Asahigaoka, Tajimi, 507-0071

ReBa₂Cu₃O_y に対してパラフィンワックスを 30vol% 添加した粉末を $\sim 200\text{MPa}$ で $1 \times 5 \times 60\text{mm}^3$ に一軸加圧成形した。空気中における 923K, 3h の熱処理によりパラフィンワックスを除いた後、空気中で 1193K, 15h の焼結を行った。試料中に酸素を導入するために、試料を 50ml/min の酸素気流中において 823K, 15h の保持を行い、そのまま炉冷した。内部摩擦測定用の試料は切削加工により、約 $0.6 \times 5 \times 40\text{mm}^3$ の形状に整えた。

2・2 装置

粘弾性測定解析装置 (レオロジ, MR-500) を用い、強制振動型のねじり法により 0.032 $\sim$ 10Hz の測定周波数で内部摩擦測定を行った。測定は空気中において、300 $\sim$ 670K までの昇温中に行った。熱天秤装置 (セイコー電子, TG30) を用い、重量減量法により試料の酸素含有量を決定した。格子定数の測定は粉末X線回折 (XRD) 装置 (理学電気, RINT2000K) を用い、Cu-K α 線, 30kV, 16mA で行った。格子定数の決定は 200, 123, 213, 117 および 026 面の回折ピークを用いた。

2・3 内部摩擦の解析

結晶中の原子や欠陥の動的挙動と擬弾性緩和の関係の理論的な取り扱いには Nowick らの著書に詳細に述べられている。¹⁸⁾ここでは本研究に必要な事項について簡単に述べる。標準線形固体に周期的ひずみを与えた場合の応答関数は式 (1) および式 (2) で示される。

$$M_1(\omega) = M_U - \frac{M_U - M_R}{1 + \tau^2 \omega^2} \quad (1)$$

$$M_2(\omega) = (M_U - M_R) \frac{\tau \omega}{1 + \tau^2 \omega^2} \quad (2)$$

ここで、 M_U は非緩和弾性率、 M_R は緩和弾性率、 τ は緩和時間、 ω は角周波数で測定周波数を f とすると $\omega = 2\pi f$ で表される。これらの式はデバイの式と呼ばれており、複素表記を用いた場合、式 (1) は弾性率の実部の応答、式 (2) は虚部の応答を示している。内部摩擦は $\tan \delta = M_2/M_1$ で示される。式 (1) の左辺の第 2 項が第 1 項に比べて微少の場合、内部摩擦は式 (3) のように近似できる。

$$\tan \delta = \frac{M_U - M_R}{M_U} \cdot \frac{\tau \omega}{1 + \tau^2 \omega^2} \quad (3)$$

本研究において、 $(M_U - M_R)/M_U$ を緩和強度 A とした。一般に原子のサイト間のホッピングに必要な緩和時間は以下のアレニウス型の温度依存性を示す。

$$\tau^{-1} = \tau_0^{-1} e^{-H/kT} \quad (4)$$

H は活性化エンタルピー、 k はボルツマン定数、 T は温度、 τ_0 はプレエクスポネンシャルファクターである。内部摩擦ピーク頂点において $\tau \omega = 1$ であることを利用して測定周波数 f から緩和時間 τ を計算できる。そのときの温度 (ピーク温度 T_p) と緩和時間 τ の関係は式 (4) で表されることから、アレニウスプロットより活性化エンタルピー H を計算できる。また、式 (4) を用いて式 (3) を温度の関数に書き換えることが出来る。その場合はピークの半価幅 $\delta(T^{-1})$ から次式により活性化エンタルピーが計算できる。

$$\delta(T^{-1}) = 2.634k/H_a \quad (5)$$

式 (5) から得られる活性化エンタルピーの値 H_a は、緩和時間に分布がない単一のデバイピークの場合にはアレニウスプロットから得られる値 H と等しい。緩和時間に分布がある場合は H_a は H に比べて小さくなる。

観測された内部摩擦ピークのデータについて、単一のデバイピークとして扱い、 T_p , H_a , A をパラメータとして、最小二乗法によりカーブフィッティングを行った。最適のフィッティングデータからピーク温度 T_p を決定した。また、得られた内部摩擦のピーク温度 T_p の逆数と測定周波数 f から計算される緩和時間 τ を用いてアレニウスプロットを行った。

3 結果

3・1 結晶相と酸素量

Table I は試料の格子定数、結晶系、酸素量、相対密度および 77K における超伝導性の有無を示す。希土類元素のイオン半径の増加に伴い格子定数は単調に増加した。試料の XRD パターンはいずれの組成においても斜方晶を示し、不純物相による回折ピークは観測されなかった。また、それぞれの組成の試料の酸素含有量に顕著な差は見られなかった。

3・2 内部摩擦

Fig. 2 (a)~(d) はそれぞれの組成の試料の内部摩擦と剛性率の温度に対する変化を示す。それぞれの測定周波数において内部摩擦ピークが観測され、その温度付近で剛性率の減少が観測された。Table II は得られた内部摩擦ピークを単一のデバイピークとしてカーブフィッティングを行い得られたピーク温度、活性化エンタルピー (式 (5) による)、緩和強度と測定周波数から計算される緩和時間を示す。観測された内部摩擦のピーク温度は測定周波数 0.032, 0.10, 0.32, 1.0, 3.2, 10 Hz に対して、YBa₂Cu₃O_y では 431, 446, 464, 484, 504, 521K, ErBa₂Cu₃O_y では 428, 444, 463, 481, 501, 517K, HoBa₂Cu₃O_y では 420, 435, 450, 467, 485, 501K, DyBa₂Cu₃O_y では 414, 428, 444, 461, 480, 498K であった。測定周波数の増加に対して内部摩擦ピークが高温側にシフトする、明瞭な周波数依存性を示した。また、同一周波数で比較した場合、希土類サイトのイオン半径の増加に伴い内部摩擦ピークが低温側にシフトする傾向が見られた。

3・3 アレニウスプロット

Fig. 3 は得られた内部摩擦ピークのピーク温度の逆数と測定周波数から計算される緩和時間を用いて行ったアレニウスプロットを示す。各組成とも良好な直線関係を示した。また、希土類サイトのイオン半径の増加に伴い緩和時間が短くなる傾向が見られた。Table III にアレニウスプロットより得られた活性化エンタルピー H とプレエクスポネンシャルファクター τ_0 を示す。組成によらず $H \approx 1.2\text{eV}$ が得られた。また、 τ_0 は $10^{-13} \sim 10^{-15}$ オーダーの値が得られた。

4 考察

YBa₂Cu₃O_y の弾性物性の研究において、周波数依存性を示す、室温以上で観測される内部摩擦ピークは、アレ

Fig. 2. Internal friction and shear modulus plotted against temperature for a $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ specimen at various frequencies. $\circ$ 0.032 Hz; $\diamond$ 0.10 Hz; $\square$ 0.32 Hz; $\triangle$ 1.0 Hz; $+$ 3.2 Hz; ∇ 10 Hz; (a) $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$; (b) $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$; (c) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$; (d) $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$.

ニウスプロットにおいて緩和時間が7桁以上の範囲で良好な直線関係を示し、その活性化エネルギーとして $\sim 1.14\text{eV}$ が得られている。¹⁹⁾さらに、この値は多結晶体における酸素の自己拡散の活性化エネルギー $\sim 0.97\text{eV}$ とほぼ一致していることから、この内部摩擦ピークは酸素の長距離拡散と同一の酸素原子のジャンプによるものであると提唱されており、応力の印加によるO(1)-O(5)サイトの酸素原子のホッピングに帰属されている。¹⁹⁾

本研究で調製した試料はいずれも斜方晶相であった。また、アレニウスプロットはこれまでに報告^{3)~6)}されている $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の酸素の緩和に対するアレニウスプロットと類似している (Fig. 3)。従って、今回観測された内部摩擦ピークは $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の斜方晶におけるO(1)-O(5)サイト間の酸素の緩和に対応する現象と考えられる。観

測された内部摩擦のピーク温度は $420\sim 520\text{K}$ でO-T相転移温度($\sim 940\text{K}$)²⁰⁾より低温側に大きくずれていることから、相転移温度との重なりはないと考えられる。

希土類サイトはO(1)、O(5)サイトから離れており、緩和する酸素原子と直接の結合はない。従って、結果で得られた緩和時間の希土類元素依存性には他の要因があると思われる。希土類サイトのイオンの大きさが変化すると、以下のような影響が考えられる。(1) 格子定数の増加とサイトの変位に伴いサイト間距離が変化し、サイト間の相互作用の大きさが変化する。(2) サイトの変位によりクーロン場の統計的な強度が変化する。

Guillaumeらは中性子回折法を用いて決定された、 10K における $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の格子定数および構造パラメータの系統的なデータを報告している。²¹⁾彼らの報告した

Table I. Lattice parameter, crystal system, oxygen content, relative density and superconductivity at 77 K of specimen.

specimen	lattice parameter (nm)			crystal system	oxygen content (mol^{-1})	relative density	superconductivity at 77K
	a	b	c				
$\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$	0.3819	0.3887	1.1679	orthorhombic	6.92 ± 0.04	0.726	yes
$\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$	0.3825	0.3890	1.1685	orthorhombic	6.89 ± 0.04	0.790	yes
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$	0.3824	0.3892	1.1686	orthorhombic	6.93 ± 0.04	0.791	yes
$\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$	0.3829	0.3893	1.1697	orthorhombic	6.94 ± 0.04	0.808	yes

Table II. Values of fitted parameters for a single Debye peak; Inverse temperature of internal friction peak $1/T$, relaxation time τ , peak temperature T_p , relaxation amplitude A and activation enthalpy H_a .

specimen	measured frequency (Hz)	T_p (K)	A	H_a (eV)	$1/T$ (K ⁻¹)	τ (sec)
ErBa ₂ Cu ₃ O _y	10	517±3	0.075	0.51	1.93×10^{-3}	1.59×10^{-2}
	3.2	501±3	0.088	0.49	2.00×10^{-3}	4.97×10^{-2}
	1.0	481±3	0.099	0.47	2.08×10^{-3}	1.59×10^{-1}
	0.32	463±3	0.104	0.45	2.16×10^{-3}	4.97×10^{-1}
	0.10	444±3	0.109	0.46	2.25×10^{-3}	1.59
	0.032	428±3	0.116	0.49	2.34×10^{-3}	4.97
HoBa ₂ Cu ₃ O _y	10	501±3	0.053	0.45	2.00×10^{-3}	1.59×10^{-2}
	3.2	485±3	0.061	0.44	2.06×10^{-3}	4.97×10^{-2}
	1.0	467±3	0.068	0.44	2.14×10^{-3}	1.59×10^{-1}
	0.32	450±3	0.076	0.45	2.22×10^{-3}	4.97×10^{-1}
	0.10	435±3	0.083	0.47	2.30×10^{-3}	1.59
	0.032	420±3	0.088	0.47	2.38×10^{-3}	4.97
YBa ₂ Cu ₃ O _y	10	521±3	0.066	0.43	1.92×10^{-3}	1.59×10^{-2}
	3.2	504±3	0.077	0.43	1.98×10^{-3}	4.97×10^{-2}
	1.0	484±3	0.088	0.43	2.07×10^{-3}	1.59×10^{-1}
	0.32	464±3	0.097	0.43	2.16×10^{-3}	4.97×10^{-1}
	0.10	446±3	0.105	0.47	2.24×10^{-3}	1.59
	0.032	431±3	0.113	0.48	2.32×10^{-3}	4.97
DyBa ₂ Cu ₃ O _y	10	498±3	0.069	0.54	2.01×10^{-3}	1.59×10^{-2}
	3.2	480±3	0.076	0.49	2.08×10^{-3}	4.97×10^{-2}
	1.0	461±3	0.082	0.48	2.17×10^{-3}	1.59×10^{-1}
	0.32	444±3	0.090	0.51	2.25×10^{-3}	4.97×10^{-1}
	0.10	428±3	0.098	0.52	2.34×10^{-3}	1.59
	0.032	414±3	0.104	0.54	2.42×10^{-3}	4.97

格子定数と構造パラメーターから計算されるイオン間距離を Table IV に示す. 希土類サイトのイオン半径の増加に対して (i) 格子定数の単調な増加により, O (1) - O (5), O (1) - Cu (1), O (5) - Cu (1) のサイトのイオン間距離は増加するが, ErBa₂Cu₃O_y に対する DyBa₂Cu₃O_y の増加は

0.2~0.6% 程度である. (ii) Cu (1) - O (4) の距離は若干減少する. ErBa₂Cu₃O_y に対して DyBa₂Cu₃O_y で 0.6% 程度減少する. (iii) Cu (2) - O (4) の距離が減少する. その大きさは ErBa₂Cu₃O_y に対して DyBa₂Cu₃O_y で 0.9% 程度である. (iv) c 軸に沿った Cu (2) - Cu (2) の距離が増加する. ErBa₂Cu₃O_y に対して DyBa₂Cu₃O_y で 2.6% 程度増加する. 酸素原子が緩和する O (1) と O (5) が結合するサイトの変位に比べ, 希土類サイトに近いサイトが大きく変位する傾向を示している. また, Cu (1) を中心とした酸素のサイトの 8 面体は a-b 軸方向に伸び, c 軸方向が縮む傾向にある. 本研究では希土類サイトのイオン半径の増加に対して活性化エネルギーがほぼ一定であった. これは酸素の緩和するサイト間の距離の増加が活性化エネルギーに影響を与える程度の大きさでなかったためと思われる. また, 希土類サイトのイオン半径の増加に対して緩和時間が減少する傾向が見られた. この様な傾向は Cu (1) を中心とした酸素のサイトの 8 面体構造の変形, 希土類サイトに近接するサイトの大きな変位によるクーロ

Fig. 3. Arrhenius plots of $\log(\tau)$ vs. $1/T$ for internal friction peaks of RBa₂Cu₃O_y. ● ErBa₂Cu₃O_y; ◆ HoBa₂Cu₃O_y; □ YBa₂Cu₃O_y; ▲ DyBa₂Cu₃O_y. The other points refer to data from the literature, respectively: ■ [3], × [4], + [5], ◇ [6].

Table III. Activation enthalpy H and pre-exponential factor τ_0 .

specimen	H (eV)	$\log(\tau_0)$
ErBa ₂ Cu ₃ O _y	1.17 ± 0.05	-13.0 ± 0.6
HoBa ₂ Cu ₃ O _y	1.24 ± 0.01	-14.2 ± 0.1
YBa ₂ Cu ₃ O _y	1.17 ± 0.05	-13.0 ± 0.5
DyBa ₂ Cu ₃ O _y	1.17 ± 0.03	-13.5 ± 0.3

Table IV. Ionic radius of Re-site cation, lattice parameter and interionic distance of $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$.

compound	ionic radius* of Re-site cation (nm)	lattice parameter** (nm)			interionic distance*** (nm)					
		a	b	c	O(1)-O(5)	Cu(1)-O(1)	Cu(1)-O(5)	Cu(1)-O(4)	Cu(2)-O(4)	Cu(2)-Cu(2)
$\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.02}$	0.1	0.3810(1)	0.3879(1)	1.1625(1)	0.2719	0.1940	0.1905	0.1860	0.2289	0.3329
$\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.02}$	0.1015	0.3815(1)	0.3882(1)	1.1635(1)	0.2722	0.1941	0.1908	0.1859	0.2273	0.3329
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.00}$	0.1019	0.3817(1)	0.3883(1)	1.1637(1)	0.2723	0.1942	0.1909	0.1855	0.2267	0.3365
$\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.98}$	0.1027	0.3820(1)	0.3885(1)	1.1646(1)	0.2726	0.1943	0.1910	0.1848	0.2267	0.3416

* Shannon's ionic radius for oxidation number +3 and eight-fold coordination [22].

** From neutron diffraction data at 10 K [21].

*** Calculated from neutron diffraction data at 10 K [21].

ン場の統計的な強度の変化のいずれか, または両方が関与していると思われる。

この他の要因として, 例えば Sm^{3+} や Nd^{3+} などのイオン半径が比較的大きい希土類元素は Ba サイトへ部分的に置換することが報告されている。²³⁾ 本研究ではイオン半径が比較的小さい Y^{3+} に類似した希土類元素を用いているのでこの影響は小さいと考えられる。 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ で提起されているような, 欠陥量の差による緩和への影響^{13), 14)} も考えられるが, 本研究の場合, いずれの組成においても, 試料の酸素量に大きな違いはなく, その影響は少ない。また, 内部摩擦ピークのアレニウスプロットにより求めた活性化エンタルピー H (Table III) を用いてピークの半価幅を見積もると実測値の 1/3 程度になり, 緩和時間の分布が非常に大きいことを示している。これは Cu-O 面における局所構造に大きな分布があることを示唆している。

5 総 括

酸化物超伝導体 $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ($\text{R} = \text{Y, Er, Ho, Dy}$) の酸素原子の緩和挙動を調べた結果, 結晶中の酸素原子のサイト間のホッピングは希土類サイトのイオン半径の増加に対応して緩和時間が短くなる傾向がみられた。また, ホッピングに必要な活性化エンタルピーは組成によらず $\sim 1.2\text{eV}$ で一定であり, 希土類サイトのイオン半径に大きく影響されなかった。

本研究の一部は文部省科学研究費 (重点領域番号 260) の補助により実施した。

(平成 9 年 7 月 15 日 日本材料学会第 85 回セラミック材料部門委員会 (公開) にて講演)

参 考 文 献

- 1) P. H. Hor, R. L. Meng, Y. Q. Wang, L. Gao, Z. J. Huang, J. Bechtold, K. Forster and C. W. Chu, Phys. Rev. Lett., **58**, 1891 (1987).
- 2) J. M. Tarascon, W. R. McKinnon, L. H. Greene, G. W. Hull and E. M. Vogel, Phys. Rev. B, **36**, 226 (1987).
- 3) J. X. Zhang, G. M. Lin, Z. C. Lin, K. F. Liang, P. C. W. Fung and G. G. Siu, J. Phys.: Condens. Matter, **1**, 6939 (1989).
- 4) X. M. Xie, T. G. Chen and Z. L. Wu, Phys. Rev. B, **40**, 4549 (1989).
- 5) J. R. Cost and J. T. Stanley, J. Mater. Res., **6**, 232 (1991).
- 6) J. Woignard, P. Gadaud, A. Rivière and B. Kaya, Materials Science Forum, **119-121**, 719 (1993).
- 7) J. L. Tallon and M. P. Staines, J. Appl. Phys., **68**, 3998 (1990).
- 8) E. Bonetti, E. G. Campari, P. Cammarota, A. Casagrande and S. Mantovani, J. Less-Common Metals, **164 & 165**, 231 (1990).
- 9) E. Bonetti, E. G. Campari and S. Mantovani, Physica C, **196**, 7 (1992).
- 10) G. Cannelli, R. Cantelli, F. Cordero and F. Trequattrini, Supercond. Sic. Technol., **5**, 247 (1992).
- 11) E. Bonetti, E. G. Campari, V. Luprano, S. Mantovani, S. Casagrande and P. Cammarota, Materials Science Forum, **119-121**, 689 (1993).
- 12) Y. Mi, D. Mari, R. Schaller and W. Benoit, Materials Science Forum, **119-121**, 707 (1993).
- 13) P. Gadaud and B. Kaya, J. Alloys Comp., **211/212**, 296 (1994).
- 14) E. Bonetti, E. G. Campari, P. Mattioli and A. Zingaro, J. Alloys Comp., **211/212**, 314 (1994).
- 15) M. Ozawa, M. Inagaki and S. Suzuki, Jpn. J. Appl. Phys., **35**, 1351 (1996).
- 16) J. L. Tallon and B. -E. Mellander, SCIENCE, **258**, 781 (1992).
- 17) V. M. Arzhavtin, Yu. Yu. Razdovskii and V. A. Finkel', Superconductivity, **5**, 86 (1992).
- 18) A. S. Nowick and B. S. Berry, "Anelastic Relaxation in Crystalline Solids" (1972) Academic Press.
- 19) J. L. Routbort and S. J. Rothman, J. Appl. Phys., **76**, 5615 (1994).
- 20) J. D. Jorgensen, M. A. Beno, D. G. Hinks, L. Soderholm, K. J. Volin, R. L. Hitterman, J. D. Grace and I. K. Schuller, Phys. Rev. B, **36**, 3608 (1987).
- 21) M. Guillaume, P. Allenspach, W. Henggeler, J. Mesot, B. Roessli, U. Staub, P. Fischer, A. Furrer and V. Trounov, J. Phys.: Condens. Matter, **6**, 7963 (1994).
- 22) R. D. Shannon, Acta Cryst. A, **32**, 751 (1976).
- 23) S. I. Yoo, M. Murakami, N. Sakai, T. Higuchi and S. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, 1000 (1994).