$\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ ($0.0 \leq x \leq 0.5$) 화합물의 구조 및 전달 특성에 대한 연구

박 중 철*

신라대학교 나노소재 공학과

(2003. 9. 26 접수)

Study on the Structural and Transporting Property of $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ ($0.0 \leq x \leq 0.5$)

Jung-Chul Park*

Department of Nano Material Science and Engineering, Nano Applied Technology Research Center,
Silla University, Busan 617-736, Korea

(Received September 26, 2003)

요 약. 고상반응으로 $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ ($0.0 \leq x \leq 0.5$) 화합물을 합성하였다. X선 회절 분석 결과에 대한 Rietveld 정밀회로부터 합성된 $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ 화합물은 $0 \leq x \leq 0.3$ 의 Cu 치환 범위에서는 모두 단일상의 정방정계 구조를 갖는 K_2NiF_4 형태의 구조를 취하지만, $0.4 \leq x \leq 0.5$ 의 범위에서는 미량의 Sr_2CuO_3 화합물의 회절 피크가 관찰되는 이중상을 갖는 화합물로 존재한다는 사실을 알 수 있었다. Sr_2RuO_4 화합물의 Ru자리에 Cu 이온을 부분적으로 치환할 때의 전이금속 이온인, Ru와 Cu이온의 원자가 상태는 X선 전자 분광법으로 확인하였다. Ru $3p_{3/2}$ 전자와 Cu $2p_{3/2}$ 전자의 결합에너지 측정으로부터 Ru^{4+} , Cu^{2+} 를 갖는 것으로 확인되었다. Sr_2RuO_4 화합물의 Ru 자리에 치환하는 Cu 이온의 농도를 증가할수록 Ru-O₁(×4)와 Ru-O₂(×2)의 결합길이 차이가 $\Delta=0.1329 \text{ \AA}$ (Sr_2RuO_4 경우)에서 $\Delta=0.0383 \text{ \AA}$ ($\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.7}\text{Cu}_{0.3}\text{O}_{4-y}$ 경우)으로 변하며, c/a 역시 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서, Sr_2RuO_4 화합물의 Ru 자리에 Cu 이온을 치환함에 따라 RuO_6 팔면체의 국부 대칭성의 변화에 의해 결정구조가 정방정계로의 변화를 수반하면서, 이에 따른 $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ 의 전달특성이 금속에서 반도체로 변화한다.

주제어: $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$, 국부대칭성의 변화, 전달특성

ABSTRACT. $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ ($0.0 \leq x \leq 0.5$) compounds were prepared using a conventional solid state reaction. Based on the Rietveld refinements of X-ray diffraction results, it is revealed that $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ compounds are the single phases with K_2NiF_4 type tetragonal system in the range of $0 \leq x \leq 0.3$, while the mixed phases of Sr_2RuO_4 and Sr_2CuO_3 in the range of $0.4 \leq x \leq 0.5$. By means of X-ray photoelectron spectroscopy, the valence states of Ru and Cu in $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ have been confirmed to $4+$ and $2+$, respectively. The bond length difference between Ru-O₁ (×4) and Ru-O₂ (×2) in RuO_6 octahedron is gradually decreased with increasing Cu content in $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$, which results in the lower c/a ratio. So, it might be assured that the variation of local symmetry of RuO_6 octahedron is very closely related to the transporting property of $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ compounds. The behavior of resistivity discloses that the metallic property in Sr_2RuO_4 changes into the semiconducting one in proportion to the Cu content in $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$.

Keywords: $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$, The Variation of Local Symmetry, The Transporting Property

서 론

Sr_2RuO_4 화합물은 La_2CuO_4 화합물과 유사한 K_2NiF_4 형태의 구조를 가지는 화합물이다.

Sr 이 La 자리에 부분적으로 치환된 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 화합물은 대략 40 K 이하에서 초전도성을 나타내는 반면에 Sr_2RuO_4 화합물은 대략 1 K 이하에서 초전도성이 나타난다.^{1,2} 따라서 Sr_2RuO_4 화합물은 초전도성이 나타나는 온도는 매우 낮지만 구리 화합물과 동일한 결정구조를 갖기 때문에 초전도상태와 정상상태의 특성을 연구하기에 적합한 화합물로 간주되고 있다. 100 mK과 973 K 사이의 온도영역에서 Sr_2RuO_4 의 결정구조에 대한 연구들이 몇몇 연구그룹들에 의해 수행되었다.³⁻⁵ 중성자 회절 연구에서, Vogt와 Buttrey는 팔면체의 축방향의 $\text{Ru}-\text{O}_2$ 결합길이가 100 K와 150 K에서 비정상적인 것으로 관찰되었다.⁶ 이러한 관찰이 사실이라면, 이것은 금속-비금속의 상전이와 일치하며 구조적인 특성과 전자적 특성 사이에 밀접한 상호연관성이 있다는 것을 시사하고 있는 것이다.

초전도성을 갖는 La_2CuO_4 유사 화합물들의 구조는 다른 금속산화물 형태의 초전도체들보다 훨씬 간단하기 때문에 초전도성의 연구를 위한 화합물로서 La_2CuO_4 유사 화합물들이 널리 이용되고 있는 실정이다. La 원소가 존재하지 않는 Sr_2CuO_3 화합물은 정방정계 K_2NiF_4 구조를 갖는 (혹은 Nd_2CuO_4 구조) Cu 와 O 원소로 구성된 팔면체 배위구조에서 적도자리(equatorial site)의 산소가 규칙적으로 1/2만큼 결핍되어 사각형 배위구조를 갖는 CuO_4 단위들이 사슬처럼 연결되어 있으며 이때 Cu 의 원자가는 +2를 갖는다.^{7,8}

LaSrCuO_4 같은 화합물에서 Cu(III) 를 안정화시키기 위해 산소고압방법을 사용하는 것처럼, Sr_2CuO_3 화합물의 산소고압으로 처리하여 산소이온을 격자대로 유입시켜 70 K 이하에서 초전도성이 나타나는 $\text{Sr}_2\text{CuO}_{3+\delta}$ ($\delta=0.9$) 화합물을 합성하고 있다.^{9,11}

Sr_2RuO_4 화합물과 Sr_2CuO_3 화합물이 동일한 정방정계의 K_2NiF_4 형 구조를 취한다는 결정구조학적 동일성과 Sr_2RuO_4 의 전자구조는 $\text{Ru } 4d$ 와 $\text{O } 2p$ 전자들의 혼성에 의해 결정되며 Sr_2CuO_3 의 전자구조 역시 $\text{Cu } 3d$ 와 $\text{O } 2p$ 전자들에 의해 결정된다는 전자구조 형성의 유사성이 두 화합물에서 나타난다. 또한, 전이금속 원소들인 Cu 와 Ru 의 이온반경을¹² 살펴보면 Cu^{2+} (0.73 Å), Ru^{4+} (0.62 Å)으로 유사한 이온반경을 가지고 있음을 알

수 있다.

따라서, 본 연구에서는 Sr_2RuO_4 와 Sr_2CuO_3 화합물과의 고용체 영역을 결정하여 $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_4$ ($x=0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) 화합물을 합성하여 이들 화합물의 결정구조학적 변화 및 전자구조의 변화에 따른 전달특성의 변화를 고찰하였다.

실험

시료합성. 전형적인 고체반응법을 사용하여 시료를 합성하였다.

SrCO_3 (Aldrich, 99.995%), RuO_2 (Aldrich, 99.9%)와 CuO (Aldrich, 99.99%)를 합성하고자 하는 시료의 몰비로 칭량한 후 잘 갈아준 다음 900 °C로 유지한 전기로에서 18시간 동안 열처리하였다. 위의 시료를 모르타르에서 잘 갈아서 펠렛 성형기로 펠렛을 만들어서 1200 °C에서 18시간동안 열처리하여 시료들을 합성하였다.

분석방법 및 측정기기. 합성된 시료의 결정성과 단일 상으로의 합성여부를 확인하기 위하여 powder X-선 회절분석법을 채택하였으며, 구조에 대한 상세한 정보를 얻기 위한 회절도는 40 KV, 300 mA의 X-선 광원을 갖는 회절기에 장착된 회전 타겟을 이용하였으며 $\text{Cu K}\alpha$ 복사선은 graphite 단색화 장치를 사용하였다. step 넓이가 0.02°, 1초의 step 시간에서 $2\theta=20-100^\circ$ 의 범위에서 자료를 수집하였다. 회절 위치와 세기에 대한 상세한 정보는 Rietveld 분석용 RIETAN¹³ 프로그램을 사용하였으며, 전기저항은 직류 4단자 법으로 측정하였다. 시료의 온도는 밀폐순환형 He 냉동기(APD HC-2)를 이용하여 10 K-300 K구간에서 저온 온도조절기(LakeShore M330)를 이용하여 0.1 K 이내로 조절하였다. 시료의 크기는 $7 \times 1 \times 1$ mm이내로 하고, 전기적 절연에 유의하여 GE varnish로 구리시료 홀더에 부착하였다. 구리선(Gauge #34)을 전극단자로 사용하였고, 단자와 시료간의 접촉은 Ag-paste를 이용하여 유지하였다. 전류는 컴퓨터 컨트롤이 되는 정전류 공급장치(Keithley 224)를 이용하여 자체가열효과가 크게 나타나지 않도록 1 mA 이내의 전류를 시료의 양단에 공급하고 내부 두 전극에서 전위차(V1)를 정밀전압계(Keithley 182)으로 읽었다. 불균일한 전기적 접촉에 기인한 전압 효과를 상쇄하기 위하여 전류의 공급 방향을 반대로 하여 전위차(V2)를 측정한 후 전기저항을 계산하였다.

X-선 광전자 분광법(XPS)은 ESCA Lab 250 모델

(VG Scientific)을 사용하였다. 1486.6 eV의 단색화된 Al-K α 복사선을 사용하였고, 이 때의 분해능은 대략 ± 0.2 eV였으며 15 KV, 150 W에서의 광의 크기는 대략 500 μm 이었다. 주 실의 기본 압력은 대략 2.0×10^{-10} torr로 유지되었으며 모든 결합에너지는 흑연의 C 1s (284.6 eV) 결합에너지로 보정하였다.

결과 및 고찰

X-선 회절 분석. $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 0.5$) 화합물들이 단일상으로 합성되었는지를 여부를 확인하기 위하여 X-선 회절 분석을 수행하였다. x 값이 0.3이하인 시료들은 불순물 피크가 나타나지 않은 순수한 단일상으로 관찰되었으나, x 값이 0.4와 0.5인 화합물인 경우에는 미량의 Sr_2CuO_7 가 혼재되어 있는 것으로 확인되었다. $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 0.3$) 화합물들의 X-선 회절 분석 도는 Fig. 1에 나타내었다.

X-선 회절 분석 결과에 대한 Rietveld 처리로부터 얻은 격자상수들과 결합길이를 Table 1에 수록하였고 X-선 회절 결과로부터, 합성된 $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_4$ 화합물은

Fig. 1. The experimental (top), fitted (middle), and difference (bottom) of X-ray diffraction pattern of $\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.7}\text{Cu}_{0.3}\text{O}_{4-y}$.

Table 1. The structural parameters and bond lengths obtained from the Rietveld data

	Sr_2RuO_4	$\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.9}\text{Cu}_{0.1}\text{O}_{4-y}$	$\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4-y}$	$\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.7}\text{Cu}_{0.3}\text{O}_{4-y}$
$R_{\text{wp}}(\%)$	10.56	10.68	8.54	8.52
$R_1(\%)$	2.36	1.85	1.49	2.21
$R_p(\%)$	7.60	8.03	6.22	6.51
$R_E(\%)$	5.65	4.92	4.52	4.35
a (Å)	3.87211(4)	3.88933(6)	3.91129(4)	3.92146(4)
c (Å)	12.7405(2)	12.6726(3)	12.5830(1)	12.5267(1)
c/a (Å)	3.2903	3.2583	3.2171	3.1944
Ru-O ₁ (x4) (Å)	1.9361(1)	1.9447(1)	1.9556(1)	1.9607(1)
Ru-O ₂ (x2) (Å)	2.069(5)	2.052(6)	2.023(5)	1.999(5)

$0 \leq x \leq 0.3$ 의 Cu 치환 범위에서는 모두 단일상의 정방정계 구조를 갖는 K_2NiF_4 형태의 구조를 취하지만, Cu 이온을 Ru 이온 대신에 치환할 수 있는 농도는 $x=0.3$ 이 최대라는 것을 알 수 있다. 또한, Table 1에서 알 수 있듯이, 치환 시키는 Cu의 농도를 증가할수록 격자상수 a 값은 조금씩 증가하지만 c 값은 달리 격자상수 c 값은 조금씩 감소한다.

Sr_2RuO_4 화합물의 Ru자리에 Cu이온을 치환함에 따라 RuO_6 팔면체 정점과 180° 떨어진 반대쪽 기저부분의 산소(O_2)에서 RuO_2 사각평면의 Ru금속이온 방향으로 눌러 찌그러뜨리는 형태로 변형이 일어난다는 것을 알 수 있다. Ru자리에 Cu이온을 치환함에 따라 나타나는 RuO_6 변형은 Vogt와 Buttrey의 연구결과와 잘 일치한다.⁶ Vogt와 Buttrey는 Sr_2RuO_4 에 대하여 상온에서 초전도성이 나타나는 온도인 295-0.35 K범위에서 중성자 회절 실험을 수행하였다. 정상상태에서 초전도 상태로 전이함에 따라 격자상수 a 값과 c 값이 점점 작아지며 이때의 a 값의 수축정도는 c 값의 수축정도 보다 훨씬 크게 나타났다는 것이다. 격자상수 값들의 변화로부터 계산된 c/a 비율의 온도에 따른 변화에서 알 수 있듯이, Sr_2RuO_4 화합물은 온도가 낮아짐에 따라 전달특성이 정상상태에서 초전도상태로 변하며 c/a 값은 조금씩 커지는 경향을 나타내었다. 이에 비교하여, 본 연구에서 얻은 결과는, Sr_2RuO_4 화합물의 Ru자리에 부분적으로 치환하는 Cu이온의 농도가 증가함에 따라 c/a 값은 점점 작아지는 경향을 나타내고 있으며, $(\text{Ru,Cu})\text{O}_6$ 팔면체의 적도방향과 축방향 길이인 $(\text{Ru,Cu})\text{-O}_1(\times 4)$ 와 $(\text{Ru,Cu})\text{-O}_2(\times 2)$ 의 결합길이의 변화 경향도 Vogt와 Buttrey의 결과와 잘 일치하고 있다. 즉, Cu를 치환함에 따라 $(\text{Ru,Cu})\text{-O}_1(\times 4)$ 와 $(\text{Ru,Cu})\text{-O}_2(\times 2)$ 의 결합길이의 차이가 점점 작아지는, 규칙적인 팔면체로 접근하는 국부 대칭성의 변화를 가진다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향에서 알

Fig. 2. XPS spectra of Ru 3p in RuO_2 (a), Sr_2RuO_4 (b), $\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.9}\text{Cu}_{0.1}\text{O}_{4-y}$ (c), $\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4-y}$ (d), and $\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.7}\text{Cu}_{0.3}\text{O}_{4-y}$ (e).

수 있듯이 Sr_2RuO_4 화합물에 Cu를 Ru대신에 치환할 때의 전달특성은 Cu농도가 증가할수록 저항이 크게 나타난 것으로 예측되며, 이에 대한 결과 및 토론은 후술할 것이다.

X선 광전자 분광 분석. Sr_2RuO_4 화합물의 Ru자리에 Cu이온을 부분적으로 치환할 때의 전이금속이온인, Ru와 Cu이온의 원자가 상태를 규명하기 위하여 X선 전자 분광법을 수행하였다. Fig. 2에는 합성된 시료와 표준물질로 채택한 RuO_2 의 Ru 3p_{3/2} 전자의 결합에너지를 나타내었다. 모든 시료의 Ru 3p_{3/2} 전자의 결합에너지는 대략 462 eV 부근에서 나타나므로 Sr_2RuO_4 화합물의 Ru자리에 Cu를 치환함에 상관없이 Ru의 원자가는 +4를 가진다는 것을 알 수 있다. Fig. 3에는 합성된 시료와 표준물질로 채택한 CuO의 Cu 2p_{3/2} 전자의 결합에너지를 나타내었다. 모든 시료의 Cu 2p_{3/2} 전자의 결합에너지는 대략 932 eV 부근에서 나타나므로 Sr_2RuO_4 화합물의 Ru 자리에 치환된 Cu의 원자가는 +2를 갖는 것을 알 수 있다.

전기저항 측정. 합성된 다결정형 $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ ($0.0 \leq x \leq 0.3$) 화합물의 온도변화에 따른 전기저항의 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 모체 화합물인 Sr_2RuO_4 화합물의 전기저항은 온도변화에 따른 전기저항의 변화가 거의 없는 금속특성을 갖는다는 것을 알 수 있으며 Ru 자리에 Cu를 치환함에 따라 전기저항 값이 증가하는 반도체 특성으로의 변화가 관찰된다. Sr_2RuO_4 화합물의 전

Fig. 3. XPS spectra of Cu 2p in CuO (a), $\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.9}\text{Cu}_{0.1}\text{O}_{4-y}$ (b), $\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}\text{O}_{4-y}$ (c), and $\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.7}\text{Cu}_{0.3}\text{O}_{4-y}$ (d).

Fig. 4. The electrical resistivity of $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ as a function of temperature.

자구조는 Ru 4d와 Cu 2p오비탈의 혼성에 의해 결정되므로 Ru-O의 결합길이와 Ru-O-Ru의 결합각을 포함한 RuO₆ 팔면체의 국부대칭성과 매우 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있다. Sr_2RuO_4 화합물의 Ru 자리에 부분적으로 Cu이온을 치환함에 따라 (Ru, Cu)-O₁(×4)와 (Ru, Cu)-O₂(×2)의 결합길이의 차이가 점점 작아지며 RuO₆ 팔면체들의 변형정도가 줄어들면서 규칙적인 고대칭성을 갖는 팔면체들로 변화한다는 사실을 알 수 있었으며, 이러한 변화양상은 Table 1에 수록된 격자상수의 c/a 비율의 변화로부터 결정구조의 부분적인 변화가 일어났다는 것을 알 수 있다. 즉, Sr_2RuO_4 화합물의 Ru 자리에 치환하는 Cu 이온의 농도를 증가할수록 Ru-O₁(×4)와 Ru-O₂(×2)의 결합길이 차이가 $\Delta=0.1329 \text{ \AA}$

(Sr_2RuO_4 경우)에서 $\Delta=0.0383 \text{ \AA}$ ($\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.7}\text{Cu}_{0.3}\text{O}_{4-y}$ 경우)으로 변하며, c/a 역시 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 경향은 La_2CuO_4 구조를 갖는 초전도체의 경향과 유사하다는 것을 알 수 있다. La_2CuO_4 형 초전도체는 사방정계 구조를 가지며 정방정계 구조로 상전이될 때에는 초전도성을 상실하게 된다.^{14,15} 따라서, Sr_2RuO_4 화합물의 Ru 자리에 Cu 이온을 치환함에 따라 (Ru,Cu)- $\text{O}_1(\times 4)$ 와 (Ru,Cu)- $\text{O}_2(\times 2)$ 의 결합길이의 차이가 점점 작아지며 RuO_6 팔면체들의 변형정도가 줄어들면서 규칙적인 고 대칭성을 갖는 팔면체들로 변화함에 따라 전자구조의 부분적인 변형에 의해 전달특성이 금속에서 반도체로 전이한다고 해석할 수 있을 것이다. 따라서, Fig. 4에 도시된 것처럼 Sr_2RuO_4 화합물의 Ru 자리에 Cu 이온을 치환함에 따라 전기저항이 온도변화에 따라 증가하는 반도체특성을 나타낸다고 할 수 있다.

결 론

고상반응으로 $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ ($0.0 \leq x \leq 0.5$) 화합물을 합성하였다. X-선 회절 분석 결과에 대한 Rietveld 정밀화로부터 합성된 $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ 화합물은 $0 \leq x \leq 0.3$ 의 Cu 치환 범위에서는 모두 단일상의 정방정계 구조를 갖는 K_2NiF_4 형태의 구조를 취하지만, $0.4 \leq x \leq 0.5$ 의 범위에서는 미량의 Sr_2CuO_4 화합물의 회절 피크가 관찰되는 이중상을 갖는 화합물로 존재한다는 사실을 알 수 있었다. Sr_2RuO_4 화합물의 Ru 자리에 Cu 이온을 부분적으로 치환할 때의 전이금속 이온인, Ru와 Cu 이온의 원자가 상태는 X-선 전자 분광법으로 확인하였다. Ru $3p_{3/2}$ 전자와 Cu $2p_{3/2}$ 전자의 결합에너지 측정으로부터 Ru^{4+} , Cu^{2+} 를 갖는 것으로 확인되었다. $\text{Sr}_2\text{Ru}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_{4-y}$ ($0.0 \leq x \leq 0.3$) 화합물의 온도변화에 따른 전기저항 값의 변화는 이 화합물들의 결정구조의 미세변화에 따른 RuO_6 팔면체의 국부 대칭성의 변화와 연관지어 생각할 수 있다. Sr_2RuO_4 화합물의 Ru 자리에 치환하는 Cu 이온의 농도를 증가할수록 Ru- $\text{O}_1(\times 4)$ 와 Ru- $\text{O}_2(\times 2)$ 의 결합길이 차이가 $\Delta=0.1329 \text{ \AA}$ (Sr_2RuO_4 경우)에서 $\Delta=0.0383 \text{ \AA}$ ($\text{Sr}_2\text{Ru}_{0.7}\text{Cu}_{0.3}\text{O}_{4-y}$ 경우)으로 변하며, c/a 역시 감소하는

경향을 나타내고 있다. 이와 같은 경향은 La_2CuO_4 형 초전도체는 사방정계 구조를 가지며 정방정계 구조로 상전이될 때에는 초전도성을 상실하는 경향과 유사하게 나타난다. 따라서, Sr_2RuO_4 화합물의 Ru 자리에 Cu 이온을 치환함에 따라 RuO_6 팔면체의 국부 대칭성의 변화를 수반한 전자구조의 부분적인 변형이 일어나므로 전달특성이 금속에서 반도체로 변화한다.

본 연구는 1998년도 신라대학교 교내 학술 연구비 지원으로 이루어졌기에 감사드립니다.

인 용 문 헌

1. Bednorz, J. G.; Müller, K. A. *Z. Phys. B*, **1986**, *64*, 189.
2. Maeno, Y.; Hashimoto, H.; Yoshida, K.; Nishizaki, S.; Fujita, T.; Bednorz, J. G.; Lichtenberg, F. *Nature*, **1994**, *372*, 532.
3. Gardner, J. S.; Balakrishnan, G.; Paul, D. Mck. *Physica C*, **1995**, *252*, 303.
4. Gardner, J. S.; Balakrishnan, G.; Paul, D. Mck.; Haworth, C. *Physica C*, **1996**, *265*, 251.
5. Braden, M.; Moudden, A. H.; Nishizaki, S.; Maeno, Y.; Fujita, T. *Physica C*, **1997**, *273*, 248.
6. Vogt, T.; Buttrey, D. J. *Phys. Rev. B*, **1995**, *52*, R9843.
7. Teske, C. L.; Müller-Buschbaum, Hk. *Z. Anorg. Allg. Chem.* **1969**, *371*, 325.
8. Weller, M. T.; Lines, D. R. *J. Solid State Chem.* **1989**, *82*, 21.
9. Lobo, R. C.; Berry, F. J.; Greaves, C. *J. Solid State Chem.* **1990**, *88*, 513.
10. Hiroi, Z.; Takano, M.; Azuma, M.; Takeda, Y. *Nature*, **1993**, *364*, 315.
11. Shimakawa, Y.; Jorgensen, J. D.; Mitchell, J. F.; Hunter, B. A.; Shaked, H.; Hinks, D. G.; Hitterman, R. L.; Hiroi, Z.; Takano, M. *Physica C*, **1994**, *228*, 73.
12. Shannon, R. D. *Acta Crystallogr.* **1976**, *32*, 751.
13. Izumi, F.; Murata, H.; Watanabe, N. *J. Appl. Crystallogr.* **1987**, *20*, 411.
14. Goodenough, J. B.; Manthiram, A.; Zhou, J. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **1989**, *156*, 339.
15. Goodenough, J. B. *MRS Bulletin*, **1990**, May, 23.