

機関番号：17701

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：平成 20 年度～平成 22 年度

課題番号：20560305

研究課題名 (和文) 低成長温度 (Cu, C) 系超伝導薄膜材料の多層構造化による
高性能化・新機能発現研究課題名 (英文) Development of High Performances and Novel Functions in Low-Growth
Temperature (Cu, C) Superconducting Film by Controlling Multi-layer
Structure

研究代表者

寺田 教男 (TERADA NORIO)

鹿児島大学・理工学研究科 (工学系)・教授)

研究者番号：20322323

研究成果の概要 (和文)：

超伝導を利用したデバイスは、超高速動作、低消費電力といった高いポテンシャルを持つ、反面、毒性元素の含有、高い形成温度・超伝導異方性などの応用上の問題を持つ高温超伝導体に対して、本研究では毒性元素を含まず、多層化することで超伝導転移温度が向上すると期待されている Cu 系高温超伝導体に注目し、その薄膜材料化を目指した。この系はバルクにおいては高温高压化でのみ成長する準安定層であるが、まず、炭酸基添加と格子ミスフィット率が比較的小さい単結晶基板上でのエピタキシャル成長による構造安定化により、低成長温度 500 から 600 °C において、(Cu, C)-1201 構造の薄膜形成に成功した。この薄膜の表面凹凸が、当初、ユニットセル高さの数倍と、一層の特性向上が見込める多層化への移行が困難であったことから、続いて、基板と薄膜の中間の格子定数・類似の結晶構造を持つ SrCuO₂ をバッファとして挿入する手法を導入した。その結果、超伝導性と多層型に必要な平坦性を合わせ持つ (Cu, C)-1201 の作製条件の確立に成功した。この上に 1201 層と CaCuO₂ 無限層を交互堆積した [CaCuO₂/(Cu, C)-1201]×N 構造を行ったところ、 $T_{c-onset}$: 100K、 $T_{c(\rho=0)}$: 70K 級の高い超伝導特性を持つ超伝導薄膜の作製に成功した。多層構造試料の構造解析結果から、CaCuO₂-(Cu, C)-1201 界面における歪効果が、この超伝導特性の大幅な向上の起源であることが明らかとなった。以上により、人工積層手法による、毒性元素を含まず、高臨界温度を有する高温超伝導薄膜材料の創成という本研究課題の目的を達成したと考える。

研究成果の概要 (英文)：

Thin film process and enhancement of properties of (Cu, C)-system
[(Cu, C)Ba₂Ca_{n-1}Cu_nO_x : (Cu, C)-12(n-1)n] high temperature superconductors have been studied. Contrary to the necessity of high temperature and high pressure for fabrication of bulk ceramics of this system, thin films of (Cu, C)-1201 phase have successfully synthesized by utilizing pulsed laser deposition on SrTiO₃ substrate under CO₂ mixed atmosphere. The (Cu, C)-1201 films show technological merits of the low growth temperature of 500 ~ 600 °C and superconducting critical temperature about 50 K which is sufficient to applications of high-speed digital circuits. Though surface roughness of the 1201 films directly on the substrate exceeded c-axis lattice parameter of this phase, it has been improved up to sub-nano meter level by the insertion of SrCuO₂ buffer with infinite layer structure between the 1201 film and the substrate. The (Cu, C)-1201/SrCuO₂ structures exhibit similar superconducting properties. These results mean that it is satisfied the necessary conditions for the investigation of the effect of multi-stacking of 1201 and related layers on superconducting properties of it. In the present study, remarkable enhancements of critical temperature are achieved in [CaCuO₂/(Cu, C)-1201]×N (N: repetition number of fundamental structure) multi-layered structure. $T_{c-onset}$ and $T_{c(\rho=0)}$ reach ~ 100 K and > 70 K, respectively. It is also noteworthy that the growth temperature of such high- T_c specimens still stays around 500 °C. Structural analysis of the high- T_c specimens has revealed the strain at their hetero-interfaces is the main origin of the enhancement of superconductivity.

The achievements mentioned above shows that the novel superconducting film with

technological merits: high T_c and low growth temperature, without toxic element has developed by adopting the hetero-interface effect to (Cu, C)-1201 layer, which also means the objective of this research is successfully achieved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度			
2007年度			
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電気・電子材料) 半導体、誘電体、磁性体、超誘電体、有機物、絶縁体、超伝導体など)

キーワード：超伝導材料・素子、量子エレクトロニクス、強相関エレクトロニクス、表面・界面物性

1. 研究開始当初の背景

超伝導デバイスはマイクロ波領域での超高速動作素子、量子計算用素子など、その高度且つ独自のポテンシャルから次世代エレクトロニクスにおける基幹的要素の一つと見なされている。低温超伝導回路は上記の高速動作が検証されつつあるが応用には半導体回路との連携が必要であり、両者間の温度・電圧レベルのギャップを埋める回路の導入が望ましいとされている。超伝導臨界温度・エネルギーギャップ等の基礎物性に優れる高温超伝導回路を利用できれば、動作温度、動作周波数の上限の大幅な向上により、応用の高度化、経済的制約の大幅な緩和が期待される。申請者らは高温超伝導層/低温超伝導層界面の電子状態制御による両超伝導層間の高強度超伝導接続、集積化に適する積層型高温超伝導ジョセフソン接合の再現性の良い作成手法を、独自に開発した超伝導膜の高度な作製技術、その積層構造における微視的構造・電子状態の評価・制御手法を活用することにより実現してきた。

しかしながら、現在、高温超伝導応用は限定された分野にとどまっている。その主因は、薄膜形成温度が700~900℃と高いこと、コヒーレンス長が異方的且つ極めて短く、極限的の微細加工が必要なこと、高温で応用可能な材料はHg,Tl等の毒性元素を含んでいることにある。実際、集積回路に適するとされるc軸配向YBa₂Cu₃O₇(YBCO)超伝導層でも700℃を越える成長温度が必要であり、c軸配向YBCOと界面改質バリアを用いた積層型ジョセフソン接合で申請者らが行った実

験でも、単原子レベルのバリア層厚分散が必須であり、また、高い成長温度により超伝導電極間ショートや特性分散が顕著となることが分かっている。これらは本格的回路応用の限定要因となっており、低温成長が可能・高臨界温度のエレクトロニクス用超伝導薄膜材料の開発及び極限的加工無しでデバイス機能の発現が可能な電子状態を有する材料の開発が切望されてきた。

申請者らは、高強度酸素ビーム等を用いた高温超伝導体の電荷供給ブロックの荷電状態の制御技術を開発し、これにより多層構造Tl-1223系において133Kを越える最高レベルの臨界温度を実現して、この制御が超伝導特性向上のための有効な手法であることを実証するとともに、その発展として、電荷供給層にCuイオンを含む無限層構造MCuO₂の多層構造(Cu,M)Ba₂Ca_{n-1}Cu_nO_x [(Cu,M)-12(n-1)n]等が高い臨界温度を有するとともに、電子構造の変調範囲が広く、n>3の相では弱結合無しでも自発生成される非整数量子磁束(バンド間位相差ソリトン)を用いることで接合形成無しに量子磁束デバイスが実現される可能性があることを指摘してきた。

これらの知見に基づく初動研究の結果、正方晶構造、毒性元素を含まない(Cu,C)Ba₂CuO_{2+δ} [(Cu,C)-1201]系パルスレーザー堆積薄膜が、同一装置でのYBCO膜の形成温度~700℃と比較して顕著に低い550℃程度の低温成長(放射温度計及び熱電対による多重計測) as-grown膜で50K以上の超伝導性が得られること²⁾、電荷供給層が単層で低異方性化に適するとともに電子構造変調幅が

極めて大きいことを見出した(図1)。続いて、本提案に先行して科学研究費補助金により実施した研究において(Cu, C)-1201 超伝導薄膜の成長温度下限の極限追求を行い、60 K 級の臨界温度が成長温度 480~500°C で得られること、10 K 程度の臨界温度低下を許容できる場合には成長温度を 450 °C まで低減可能なことを実験的に見出すとともに、第1原理計算により、この系を多層構造化した(Cu,C)-1223,1234 がCu-O 単層の電荷供給層の酸化度制御により非等価な CuO₂ 面が異なる超伝導状態に凝縮する多成分超伝導の実現に適した電子構造を持つことを見出していた。

多層構造への発展性を有する正方対称性を持つ(Cu,C)-Ba-O 単独膜における 50~60 K 級の超伝導発現とその低温成長は当グループが世界に先駆けて得た成果であり、高温超伝導の応用への障害を解消するブレークスルーとなるものである。(Cu,C)-1201 膜の臨界温度はデジタル応用における最低条件を満足しているが、申請者による人工格子に関する予備実験では Ba-Cu-O 層と SrCuO₂ 無限層構造を交互積層した 1212 相に対応する人工格子構造で超伝導開始温度が 10 K 程度上昇することが観測され、経験則及び(Cu,C)系バルク研究からも、1201 相を多層化した(Cu,C)-12(n-1)n 相では 80~120 K への臨界温度の飛躍的上昇、異方性低減、ソリトン発生に適した電子構造の実現が見込まれることを明らかにしていた。

2. 研究の目的

本研究は前述の成果を踏まえて、低成長温度・無毒性(Cu,C)系超伝導薄膜を人工格子法により多層化することにより、高臨界温度化・超伝導波動関数の最適化を図り、次世代超伝導量子エレクトロニクスのための高臨界温度・低成長温度薄膜材料を創成するための有望な出発点を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

まず、複数種の層の精密積層が行えるパルスレーザー堆積装置に高強度原子状酸素ビーム源を併用する独自の手法により、Ba-Cu-O 層と AECuO₂ (AE:アルカリ土類)からなる超格子構造を(Cu,C)-1201 超伝導薄膜で最適化した条件近傍で形成し、Ba-Cu-O ブロックが優先的にホールドーピングされ、これが主要な超伝導ブロックとなる(Cu,C)-12(n-1)n 薄膜を作成して、CuO₂ 層数 n と臨界温度の関係を明らかにする。また各層数毎に、Tl-1223 で実現した臨界温度 133 K の起源となった単位胞内ホール分布の制御を行い、高臨界温度化を図る。併せて、低異方性もたらず電荷供給層の高濃度ドーピングを実施し、異方性の下限

を明らかにする。このとき、膜形成装置と低温・角度分解光電子分光装置(LT-ARPES)、走査プローブ顕微鏡を単一の超高真空中に統合した独自の高度システムを用い、本質的電子構造を明らかにする。

これらにより高温領域動作超伝導デバイス 次世代量子エレクトロニクスに向けた高臨界温度・易合成な薄膜材料の材料科学的基盤・作成プロセスを確立することを目指した。

4. 研究成果

まず、(Cu, C)1201 を基幹とする積層構造・人工格子におけるヘテロ界面精密制御による超伝導特性の極限追求、構成元素同時供給による形成技術を開発した。

(Cu, C)1201 を基幹とする積層構造・人工格子におけるヘテロ界面精密制御による超伝導特性の極限追求、構成元素同時供給による形成技術の開発を中心に研究を進めた。

SrTiO₃ (100)面に直接堆積した c-軸配向(Cu, C)-1201 薄膜はアンダードーピング状態にあるとともに、過大な格子ミスマッチによ

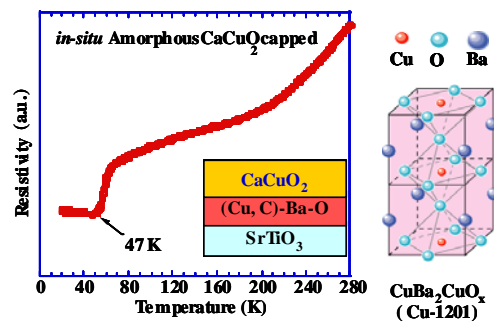
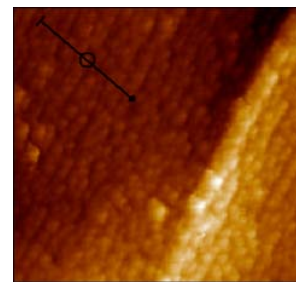
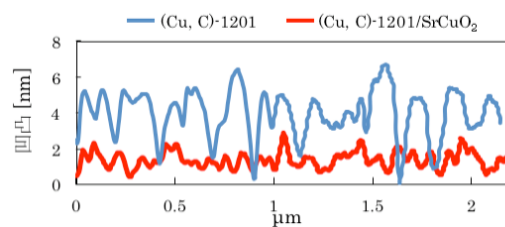


図1 SrTiO₃ 基板に直接、低温成長した(Cu, C)-1201 薄膜の抵抗-温度特性; 非晶質 CaCuO₂ で保護。



(a)



(b)

図2 Buffered (Cu, C)-1201 表面トポグラフィ一像 (a)、そのラインプロファイル(b)。

り基板から数 nm で積層欠陥が発生し T_c は 50 K 級にとどまる (図 1)。一方、 SrTiO_3 と (Cu, C)-1201 相の中間の面内格子定数を持つ無限層構造 SrCuO_2 をバッファ層として挿入した場合、1201 相は厚さ 100 nm 程度まで積層欠陥が発生せず歪格子として原子層オーダーの超平坦性を持ってエピタキシャル成長することが 1201 層内格子定数の層厚依存性等から見出された (図 2 (a)、(b))。 SrCuO_2 層自体も歪格子モードで成長するため、(Cu, C)-1201/ SrCuO_2 界面のミスフィット率は SrCuO_2 層厚により変化する。この実験結果を活用して、(Cu, C)-1201 層に対する界面歪効果を検討した。その結果、図 3 に示すように SrCuO_2 層厚を薄くすることでミスフィット率を増大させた場合、抵抗率-温度特性における超伝導転移が多段となるとともに、 $T_{c\text{-onset}} > 70$ K の成分が混在し始めることが見出された。これは界面歪あるいは歪環境下での成長により

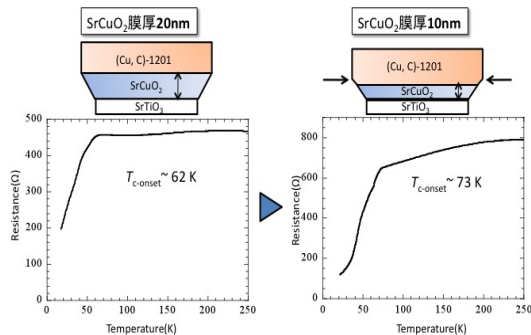


図 3 無限層構造 SrCuO_2 バッファ層/ SrTiO_3 上に成長した (Cu, C)-1201 層の電気抵抗-温度特性と SrCuO_2 層厚の関係；界面歪による $T_{c\text{-onset}}$ の上昇。

1201 層内 CuO_2 面のキャリア濃度上昇または平坦化が促進されることを示している。

以上の結果と超高压でのみ合成が可能な多層型 (Cu, C) 系において Ba-Cu-O ブロック間の構造が、 CaCuO_2 無限層構造をとることを考慮して作成した [(Cu,C)-1201/ CaCuO_2] $_N$ 積層構造 (N: 積層繰返し回数) において、図 4 に示す顕著な超伝導臨界温度の向上を初めて見出した。 SrTiO_3 上に直接成長した 1201 相単層膜と比較して約 30 K の T_c 上昇が見られ、最高値は液体窒素温度と同等となっている。これらは界面歪、歪エピタキシャル成長がこの系の超伝導特性の支配要因であることを示すとともに、N の増大による特性劣化が見られることは高 T_c 領域が基板近傍の界面にする可能性を示唆している。提案時点では界面歪効果の定量的評価・最適化はなされておらず、一部の試料では 80 K 以上の温度で磁気シールド信号が観測されていることを考慮すると図 3 の特性は、この系の超伝導特性の極限に未だ達していないと判断され、1201 層厚変化、挿入層物質による格子ミスフィットの制御による界面効果の最適化、ヘテロエピタキシャル成長のリアルタイム観測に基づく成長方向の歪分布制御による高 T_c 発現領域の広域化が期待できる。また、(Cu, C)-Ba-Ca-O 系薄膜作成において、上記の積層法と全構成元素を同時供給する手法間の主要な際は成長表面/気相の反応にあることが予備実験から分かっており、最適組成決定後には高 T_c 薄膜を単一ターゲットを用いた PLD・スパッタなどの実用的手法で作成する技術の確立が期待できる。

本研究では毒性元素を含まず、多層化する

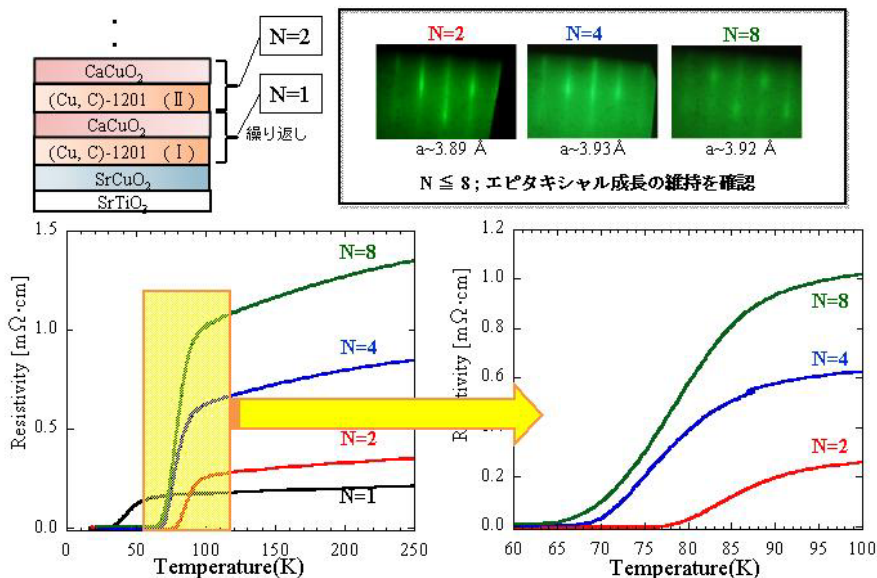


図 4 [(Cu, C)-1201/ CaCuO_2] $_N$ 積層構造 (成長温度 ~ 500 °C) の電気抵抗率-温度特性、RHEED 像、面内格子定数の積層繰返し回数 N 依存性；積層化による超伝導特性の顕著な向上。

ることで超伝導転移温度が向上すると期待されるなど材料科学・応用の両面で注目すべき特徴を持つ Cu 系高温超伝導体に注目し、まず、バルクにおいては高温高压化でのみ成長する(Cu, C)-1201 構造の準安定相を、基板によるエピタキシャル効果と炭酸基添加による構造安定化により低成長温度 500 から 600 °C において薄膜形成に成功した。続いて、基板と薄膜の中間の格子定数・類似の結晶構造を持つ SrCuO₂ をバッファとして挿入する手法を導入した。その結果、超伝導性と多層型に必要な表面凹凸が単位胞高さを十分に下回る、優れた平坦性を持つ(Cu, C)-1201 の作製条件の確立に成功した。この上に 1201 層と CaCuO₂ 無限層を交互堆積した [CaCuO₂/(Cu, C)-1201]×N 構造を行ったところ、 $T_{c-onset}$: 100K、 $T_{c(\rho=0)}$: 70 K 級の高い超伝導特性を持つ超伝導薄膜の作製に成功した。この膜の構造を解析結果から、この超伝導特性の大幅な向上は CaCuO₂-(Cu, C)-1201 界面における歪効果を検討したところ、SuCuO₂ 膜厚に依存する系統的特性変化が見られ、面内歪効果によって、超伝導特性が影響を受けることを確認した。以上、人工積層手法による、毒性元素を含まず、高臨界温度を有する高温超伝導薄膜材料の創成という本研究課題の目的を達成したと考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① T. Fukae, H. Ichiki, H. Kashiwabara, T. Shiota, A. Yamanda, S. Ishizuka, K. Matsubara, S. Niki, Y. Yoshimura and N. Terada, "Characterization of Electronic Structure of Grain Boundaries in CIGS Absorber Layers by Kelvin Probe Force Microscopy", Proc. 26th European Photovoltaic Sci. Engng. Conf., pp.3349-3352 (2010). 査読有
- ② T. Yamamoto, K. Tanaka, A. Yamanaka, T. Okuda, K. Tokiwa, A. Iyo, Y. Tanaka, A. Sundaresan and N. Terada, "Synthesis of Smooth and Superconducting (Cu,C)-Ba-O / CaCuO₂ / (Cu,C)-Ba-O Films using SrCuO₂ Buffer", Physica C vol.470, pp.S71-S72 (2010). 査読有
- ③ K. Kikunaga, T. Yamamoto, Y. Tanaka, N. Kikuchi, T. Tokiwa, T. Watanabe and N. Terada, "In-situ characterization of transport properties of (Cu, C)system thin films", Physica C vol.470, pp.678-681 (2010). 査読有
- ④ Y. Tanaka, A. Crisan, D.D. Shivagan, A. Iyo, P.M. Shirage, K. Tokiwa, T. Watanabe and N. Terada, "Phase diagram of a lattice of pancake vortex molecules", Physica C vol.469, pp.1129-1131 (2009). 査読有
- ⑤ Y. Kondo, I. Yano, I. Shigeta, M. Ito, M. Hiroi, H. Manaka and N. Terada, "Magnetic Properties of the Heusler Alloys (Fe_{1-x}Co_x)₂MnSi", J. Phys.:Conf. Series vol.150, pp.42099-1~4 (2009). 査読有
- ⑥ T. Okuda, Y. Beppu, Y. Fujii, T. Kishimoto, K. Uto, T. Onoe, N. Jufuku, S. Hidaka, N. Terada and S. Miyasaka, "Hole-doping effect on the magnetic state of delafossite oxide CuCrO₂", J. Phys.:Conf. Series vol.150, pp.42157-1~4 (2009). 査読有
- ⑦ H. Manaka, S. Nagata, Y. Watanabe, K. Kikunaga, T. Yamamoto, N. Terada and K. Obara, "Percolated-Induced Ferrimagnetism", J. Phys.:Conf. Series vol.145, pp.12080-1~4 (2009). 査読有
- ⑧ Y. Tanaka, A. Crisan, D.D. Shivagan, A. Iyo, P.M. Shirage, K. Tokiwa, T. Watanabe and N. Terada, "Phase diagram of a lattice of pancake vortex molecules", Physica C, vol.469 pp.1129-1131, (2009). 査読有
- ⑨ K. Kikunaga, T. Yamamoto, M. Mitsunaga, Y. Mahara, Y. Tanaka, N. Kikuchi, K. Tokiwa, T. Watanabe, and N. Terada, "In-situ characterization of transport properties of superconducting (Cu, C)-1201 films, Journal of Physics Conf. Series vol.150 pp.052108-1~4 (2009). 査読有
- ⑩ H. Manaka, Y. Hirai, Y. Hachigo, M. Mitsunaga, M. Ito and N. Terada, "Spin-Liquid State Study of Equilateral Triangle S=3/2 Spin Tubes Formed in CsCrF₄", Journal of the Physical Society of Japan vol. 78, pp.093701-1~4 (2009). 査読有
- ⑪ M. Hiroi, T. Rokkaku, K. Matsuda, T. Hisamatsu, I. Shigeta, M. Ito, T. Sakon, K. Koyama, K. Watanabe, S. Nakamura, T. Nojima, T. Nakano, L. Chen, T. Fujiwara, Y. Uwatoko, H. Manaka and N. Terada, "Ferromagnetism and spin-glass transitions in the Heusler compounds Ru_{2-x}Fe_xCrSi", Phys. Rev. B vol. 79, pp.224423-1~10 (2009). 査読有
- ⑫ T. Yamamoto, K. Kikunaga, M. Mitsunaga, T. Okuda, K. Obara, N. Kikuchi, Y. Tanaka, K. Tokiwa, T. Watanabe and N. Terada, "Synthesis of superconducting (Cu, C)-Ba-O films on SuCuO₂ buffer by pulsed laser deposition", J. Phys. Conf. Series vol.150, pp.52286-1~4 (2009). 査読有
- ⑬ S. Niki, S. Ishizuka, K. Matsubara, K. Tampo,

- H. Komaki, Y. Kamikawa, K. Maejima, T. Yoshiyama, K. Mizukoshi, A. Yamada, H. Nakanishi and N. Terada, "Progress in CIGS solar cell technologies", IEEE Laser Electro-Opt. Soc., pp.95-96 (2008). 査読有
- ⑭ D.D. Shivagana, P.M. Shirage, A. Crisanb, Y. Tanaka, A. Iyo, K. Tokiwa, T. Watanabe and N. Terada, "AC-Susceptibility study on vortex-molecule lattice in supermultilayer cuprate", Physica C vol.468, pp.1281-1286 (2008). 査読有
- ⑮ H. Manaka, Y. Watanabe, K. Kikunaga, T. Yamamoto, N. Terada and K. Obara, "Conversion from transparent antiferromagnet KNiF₃ to transparent ferrimagnets", Appl. Phys. Lett. vol.92, pp.04250-(1)~(3) (2008). 査読有
- ⑯ D. D. Shivagan, P. M. Shirage, A. Crisan, Y. Tanaka, A. Iyo, Y. Kodama, K. Tokiwa, T. Watanabe, N. Terada and N. Hamada, "Vortex melting line and anisotropy of a multilayered superconductor", Supercond.Sci. Technol. vol.21, pp.95002-1~7 (2008). 査読有
- ⑰ T. Okuda, Y. Beppu, Y. Fujii, T. Onoe, N. Terada and S. Miyasaka, "Specific Heat of Delafossite Oxide CuCr_{1-x}Mg_xO₂ for 0 ≤ x ≤ 0.03", Phy. Rev. B 77, pp.134423-1~5 (2008). 査読有
- ⑱ D. D. Shivagan, P. M. Shirage, A. Crisan, Y. Tanaka, A. Iyo, Y. Kodama, K. Tokiwa, T. Watanabe, N. Terada and N. Hamada, "Vortex melting line and dimensional crossover", Physica C vol.468, pp.749-752 (2008). 査読有
- ⑲ T. Yamamoto, K. Kikunaga, K. Takeshita, K. Obara, T. Okuda, N. Kikuchi, Y. Tanaka, K. Tokiwa, T. Watanabe and N. Terada, "Pulsed laser deposition synthesis of superconducting (Cu, C)-Ba-O thin film", Vacuum 83, pp.531-533 (2008). 査読有

[学会発表] (計 3 件)

- ① 25th European Photovoltaic Sci. Engng. Conf., (2010 Valencia, Spain), T. Fukae, H. Ichiki, H. Kashiwabara, T. Shiota, A. Yamanda, S. Ishizuka, K. Matsubara, S. Niki, Y. Yoshimura and N. Terada, "Characterization of Electronic Structure of Grain Boundaries in CIGS Absorber Layers by Kelvin Probe Force Microscopy". (2010.9.7)
- ② 第 57 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム, (平塚市, 2010 年), 寺田 教男, 柏原博豪, 石塚省吾, 桜井啓一郎, 松原浩司, 山田昭政, 中田時夫, 「電子分光法によるバッファ層およびバッファ/CIGS 層界面の電子構造評価」 [招待講演].

(2010.3.17)

- ③ 2008 Spring Meeting of European Materials Research Society (Strasbourg, France), N. Terada, H. Kashiwabara, S. Teshima, K. Funai, T. Okuda, S. Ishizuka, K. Sakurai, A. Yamada, K. Matsubara and S. Niki, "Ga Substitution Ratio Dependence of Electronic Structure at Interfaces between CBD-CdS and CIGS Grown by H₂O-Introduced co-Evaporation" [invited]. (2008.5.30)

[図書] (計 3 件)

- ① 寺田 教男, 「太陽電池の基礎と応用」(日本学術振興会第 175 委員会監修, 小長井誠, 山口 真史, 近藤 道雄 編著), pp.166-168, (培風館) (2010).
- ② 寺田 教男, 「CIGS 薄膜太陽電池の最新技術 (中田 時夫 監修)」, pp.227-240, (シーエムシー出版) (2010).
- ③ 寺田 教男, 「太陽電池 革新的技術全集 2009 年版」, pp.303-316, (技術情報協会) (2009) .

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

- ①名称: "Method of Genaration and Method of Detection of Interband Phase Difference Soliton and Interband Phase Difference Circuit"
発明者: Y. Tanaka, A Iyo, A. Crisan, K. Tokiwa, T. Watanabe and N. Terada
権利者: AIST, Kagoshima Univ. and Science Univ. Tokyo
種類: USA Patent
番号: Application number 11/845420,
取得年月日: 2009 年 1 月許可通知受理
国内外の別: 国外

[その他]

受賞: "Award: JPSJ Papers of Editors' Choice", H. Manka, Y. Hirai, Y. Hachigo, M. Mitsunaga M. Ito and N. Terada, "Spin-Liquid State Study of Equilateral Triangle S=3/2 Spin Tubes Formed in CsCrF₄", (2009).

6. 研究組織

(1)研究代表者

寺田 教男 (TERADA Norio)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 20322323

(2)研究分担者

奥田 哲治 (OKUDA Testuji)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 20347082

小原幸三 (OBARA Kozo)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 10094129