

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420275

研究課題名(和文)(Cu, C)系レアアースレス超伝導薄膜材料の高Ic化・実用形成技術の開発

研究課題名(英文) Development of Practical Technology for Ic-Enhancement in (Cu, C)-system  
Rare-Earth Less Superconducting Thin Films

研究代表者

寺田 教男 (TERADA, Norio)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：20322323

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：低成長温度・レアアースレス等の工学的特徴を有するが、当初、機能発現部位が局限されていた高温超伝導(Cu, C)-1201相を基幹とする積層構造において、超平坦バッファの作成条件の確立とその導入により当該構造の超伝導発現の起源である界面歪み効果を広域で発現させることで超伝導発現部位を積層構造の上部領域への拡張を達成するとともに、併せて、超伝導臨界温度の飛躍的上昇に成功した。また、単一ターゲットからの形成された薄膜においても超伝導性の発現に成功し、当該構造の幅当たりの臨界電流向上、レアアース・レス超伝導薄膜の実用的作成法開発のための基盤的手法の開発を達成した。

研究成果の概要(英文)：The key technologies for expanding superconducting region of (Cu, C)-1201 based artificial stack structure which is represented with interfacial strain assisted superconductivity, rare-earth less feature, low growth temperature and Tc about 50 K, and for practical fabrication technique have been investigated. Introducing of the atomically flat SrCuO<sub>2</sub> buffer layer between the 1201 layer and substrate expands the regions where the interfacial stress effect takes places. It leads an increase of the volume fraction of superconducting regions in the structure, an increase of critical current per unit sample-width and jump up of superconducting transition temperature. Moreover, in the PLD synthesis using single compound target, growth conditions for the superconducting (Cu, C)-films are established. These results mean the objectives of this research are successfully achieved.

研究分野：超伝導材料・素子、太陽電池、電子分光

キーワード：超伝導材料 表面・界面物性 薄膜 レアアース・レス

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導デバイスは超高選択比フィルタ、超高速論理素子、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の基幹デバイスの一つと見なされている。低温超伝導回路では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  $T_c$ ・エネルギーギャップ等の基礎物性に優れる高温超伝導材料を利用できれば、動作温度・周波数の上限の大幅な向上等により、応用の高度化、経済的制約の大幅な緩和が期待される。報告者らは高温超伝導層 / 低温超伝導層の高強度超伝導接続手法、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製手法を、独自の超伝導膜の高度な作製技術、界面構造・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、本研究を構想した時点において高温超伝導応用は限定された分野にとどまっていた。その主因は、薄膜形成温度が 700~900 °C と高いこと、高温で応用可能な材料は Hg、Tl 等の毒性元素あるいはレアアース・レアメタルを含み社会的受容性・資源確保の面で懸念材料があることにあった。このため高い  $T_c$ 、有するとともに、低温成長が可能で、レアアースの超伝導薄膜材料の開発が切望されてきた。

本研究の実施者のグループは、多層構造高温超伝導体における単位胞内キャリア分布制御手法を開発することで Tl-1223 系において 133 K を越える最高レベルの臨界温度を実現するとともに、この系と同型構造で電荷供給層 C-12(n-1)n] 等が高い臨界温度を有することを指摘してきた。

これらの知見に基づき実施した先行研究において、1) 単結晶基板に成長した (Cu, C)Ba<sub>2</sub>CuO<sub>2±d</sub> [(Cu, C)-1201] を含む積層構造膜が 1) 500 °C 程度と高温超伝導膜として顕著に低い成長温度・as-grown で、単位胞内に CuO<sub>2</sub> 面を 1 層のみ含む系として最高レベルの  $T_c$  が得られること、2) 試料内のヘテロ界面における界面歪がその超伝導発現のための鍵の一つであることを明らかにしてきた。一方、研究開始時点では超伝導性を有する領域が積層構造においては基板との界面近傍、多層型薄膜においては微小・不連続なドメインに局在しており、超伝導特性、特に応用上重要な単位幅当たりの臨界電流  $I_c$  が十分ではなかったが、界面歪み効果の精密制御により超伝導性の均一発現を達成し、高  $I_c$ ・高  $T_c$  化、実用的作製法の開発を行うことでブレークスルーが得られると考えられた。

### 2. 研究の目的

先行研究見出してきた (Cu, C)Ba<sub>2</sub>CuO<sub>2</sub> [(Cu, C)-1201] 高温超伝導薄膜・積層構造に関する成果、同材料の多くの優れた特徴・ポテンシ

ヤルを踏まえて、(Cu, C)系薄膜を基幹とする人工積層構造・多層型結晶層に周期的界面歪膜試料成長過程の高度制御により導入することで、研究開始時点で局在している超伝導領域を膜全域にわたり発現させ、高  $T_c$  且つ応用上重要な試料の単位幅当たりの臨界電流を飛躍的に高めた、実用的レアアースレス・高性能超伝導薄膜材料を実現するための基盤的手法の確立を目指す。まず、1)  $T_c$  向上の起源である (Cu, C)/パフア積層構造における界面歪効果を詳細に解明し、極限特性発現のための格子不整合率を明らかにする。次に、2) 1 の繰り返しのみでは歪効果が上層に達しないことが予備実験で判明していることに鑑み、高特性化した 1201 層上にミスフィット転移を導入しつつエピタキシャル成長する別種の挿入層を導入することで下層と同等な状態を再現し、続いて歪み誘起パフアと (Cu, C)-1201 層を堆積することにより上部 (Cu, C)-1201 層の高  $T_c$  化を図る。これにより試料単位幅当たりの臨界電流が極大となる条件を明らかにする。併せて 3) 構成元素同時供給法による c-軸配向膜成長時における CO<sub>2</sub> ガス濃度を Cu-O-CO<sub>3</sub> 面成長と同期変調することにより 1、2 で得られる最適構造実現のための条件を明らかにし単一ターゲットを用いた実用的手法による高  $T_c$ (Cu, C)系薄膜の形成法を確立する。

以上、高  $T_c$ 、低い成長温度、レアアース且つ高い単位幅当たりの超伝導新臨界電流を有する、優れた特徴を有する高温超伝導薄膜材料を創成のための基盤的手法を確立することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究の中核的課題はレアアース・レス、高温超伝導膜として著しく低い約 500 °C の成長温度、CuO<sub>2</sub> 面 1 層系として最高レベルの  $T_c$  を有する (Cu, C)Ba<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> [(Cu, C)-1201] 積層構造について界面歪み効果の最適化により、この系の特性の極限を実現すること、繰返し積層構造の上層でも界面効果を持続させる成長手法を開発して高特性発現領域を広域化することで応用上重要な単位幅当たりの臨界電流密度  $I_c$  の増大させるための手法を見出すこと、単一ターゲットを用いた実用的作製法を開発することにある。これらのため下記 1~3 の項目を実施した。

1) (Cu, C)-1201 層の極限特性追及；格子定数の連続制御が可能な歪みエピタキシャル成長 SrCuO<sub>2</sub> パフア、(Cu, C)-1201 層厚制御を導入し、最適ミスマッチ率・層厚比を明らかにし、極限特性の実現を試みた。

2) 高特性発現部位の広域化・高  $I_c$  化；有効な界面歪み効果を上層でも発現させるため、高特性化した 1201 層直上にエピタキシャル成長する別種層を導入することで、単結晶基板と等価な状態を再現し、続いて界面歪み効果を有する挿入層を成長させることにより、全ての積層単位での高特性発現を実現し、単位

幅当たりの臨界電流  $I_c$  の飛躍的向上を図った。  
 3) 実用的形成手法の開発；多層型 (Cu, C)-12(n-1)n 内超伝導ブロックへの歪が Cu-CO<sub>3</sub>-O 面の Cu 欠損・CO<sub>3</sub> 基量で制御可能なことを踏まえ、構成元素同時供給による c-軸配向膜成長時の CO<sub>2</sub> ガス分圧を Cu-O-CO<sub>3</sub> 面成長と同期変調する周期的アニオンドープ等により最適構造実現のための条件を明らかにし、加えて単一ターゲットを用いたパルスレーザー堆積等の実用的 (Cu,C)系高  $T_c$  膜形成技術を研究した。

#### 4. 研究成果

基幹とする (Cu, C)-1201 層の第一層目の高品質化に取り組み、次に 1201 層を含む積層構造・人工格子における上部 1201 層の行動電荷・超伝導化を試み、これらと並行して構成元素同時供給による (Cu, C)系超伝導薄膜形成技術の検討を中心に研究を進めた。

(Cu, C)-1201 相の超伝導は積層構造内のヘテロ界面で発生させた圧縮性界面歪みにアシストされたものであるため、1201 相の高品質化には、まず極薄・超平坦な同層の形成技術を過靴する必要がある。先行研究で SrTiO<sub>3</sub> (001)基板と 1201 層間に無限層構造 SrCuO<sub>2</sub> 層をバッファとして挿入することにより、直上に成長させた 1201 層の平坦性が劇的に改善されることを見出していたが、本研究開始時点では平坦性が複数回積層構造作成のためには十分ではなく、1201 層上部では貫通転移により凹凸が顕著となり上部界面での界面歪み効果の発現が難しいことを見出された。これは実用上重要な試料幅当たりの臨界電流  $I_c$  の向上に直結する 1201 層の複数積層構造全体での超伝導発現に SrCuO<sub>2</sub> バッファ層の超平坦化が必要なことを示唆している。貫通転移の起源が基板表面のキックなどの欠陥と膜成長時の島発生にあることに鑑み、基板表面平坦性の極限追求と SrCuO<sub>2</sub> 層の成長条件の精密な最適化を併用することにより SrCuO<sub>2</sub> 層のステップフローモードでの成長、超平坦化を試みた。図 1 に基板の研磨面と結晶面との傾斜を 1°以下とするとともに傾斜方向を [100] 方位に並行とした SrTiO<sub>3</sub> (001) 面基板の原子間力顕微鏡 AFM 像を示す。ほぼ直線のステップのみで表面構造が形成されており、貫通転移・島成長の核となる欠陥の面密度が極小となっていることが分かる。ま

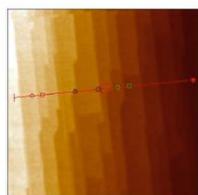


図 1 (001)結晶面に対する研磨面の傾斜を 1°以下、傾斜方向を [100] 方位とした SrTiO<sub>3</sub> (001)基板の AFM 像(視野：1 × 1 μm)。

た、各ステップの高さが SrTiO<sub>3</sub> の格子定数である 0.4 nm となっており、この表面は欠陥密度、平坦性共に実現可能な極限に達したものであった。

図 2 に、超平坦化した基板に成長させた SrCuO<sub>2</sub> バッファ層の AFM 像と成長温度の関係を示す。成長温度 490 °C まで、最も平坦且つ高品質な結晶が成長するステップフローモードが実現していることが分かる。表面粗さが最小となる成長温度は、表 1 に示すように、490 °C であり、最大高低差 Rz が約 0.6 nm と基板材料の格子定数の 1.5 倍程度まで抑制された。この値は、基板表面のステップの一部がバンチングしていることを考慮すると、ほぼ完全な二次元成長が実現したことを意味している。図 3 に 490 °C で成長した SrCuO<sub>2</sub> 層の (103) 回折線ポールフィギュアを示す。面内角 90°毎に鋭い回折が観測され、平坦性に加えて優れた結晶配向性がガッタ制されたことが分かる。以上により、1201 相を上部までエピタキシャル成長させるための超平坦・高

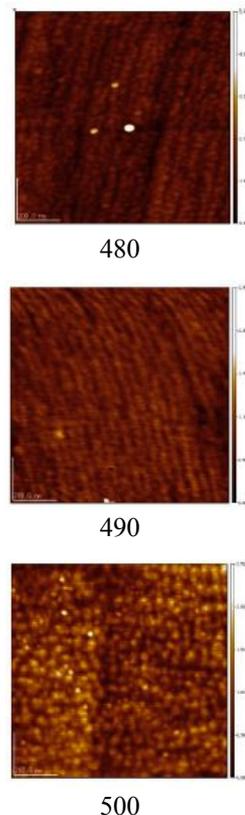


図 2 超平坦化した SrTiO<sub>3</sub> (001)基板に成長した SrCuO<sub>2</sub> 層の AFM 像と成長温度の関係 (視野：1 × 1 μm)。

表 1 超平坦化した SrTiO<sub>3</sub> (001)基板に成長した SrCuO<sub>2</sub> 層の表面粗さと成長温度の関係。

基板温度 [°C]	平均粗さ Ra [nm]	最大高低差 Rz [nm]
480	0.229	1.12
490	0.107	0.646
500	0.210	1.13

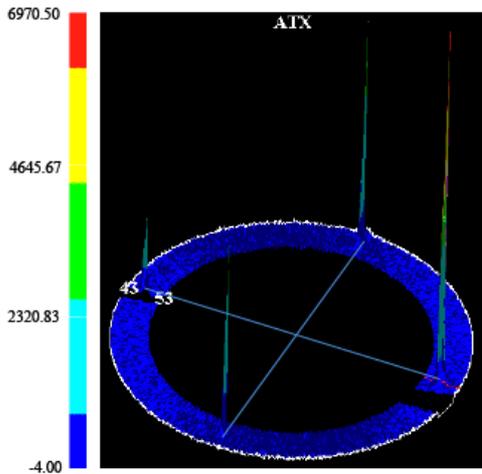


図3 超平坦化した SrTiO<sub>3</sub> (001)基板上に 490 で成長した SrCuO<sub>2</sub> 層の(103) X線回折線ポルフィギュア。

品質バッファの成長手法を確立した。

図4に最適化された SrCuO<sub>2</sub> バッファ上に成長した厚さ 5.2 nm の(Cu, C)CuO<sub>2</sub> [1201]層の電気抵抗率-温度特性と SrCuO<sub>2</sub> 層厚の関係を示す。SrTiO<sub>3</sub> 基板上に直接(Cu, C)-1201 層を成長させた場合、抵抗温度特性は半導体的となった。これは 1201 層の成長が三次元的となり界面歪み効果が発現せず、(Cu, C)-1201 層のシート抵抗が、超伝導 - 絶縁体転移の境目となる量子抵抗  $h / (2e)^2 \sim 6.45 \text{ k}\Omega$  を上回ったため超伝導が発現しなかったと考えられる。一方、SrCuO<sub>2</sub> バッファ層を挿入した場合、1201 層厚が非常に薄いにも拘らず超伝導が発現し界面電気抵抗温度特性とバッファ層厚の間に歪み効果で説明できる以下のような系統的關係が見出された。バッファ層厚 4.2 nm のとき、(Cu, C)-1201 の抵抗温度特性はフラットとなり、25 K 付近で  $T_{c\text{-onset}}$  の発現が観測された。バッファ層を挿入することによって、下地との格子不整合度が緩和され、ミスフィット転位が減少したため、抵抗温度係数が負から正へクロスオーバーしたと考

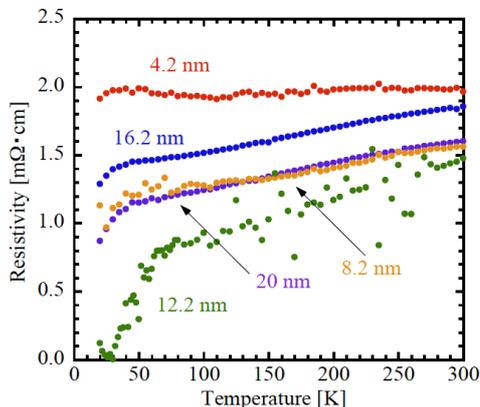


図4 最適化された SrCuO<sub>2</sub> バッファ上に成長した(Cu, C)CuO<sub>2</sub> [1201]層: 厚さ 5.2 nm の電気抵抗率-温度特性と SrCuO<sub>2</sub> 層厚の関係 (*in-situ* 測定)。

えられる。バッファ層厚を 8.2 nm のとき、抵抗温度係数が増大し、 $T_{c\text{-onset}}$  が上昇した。SrCuO<sub>2</sub> バッファ層はやや格子定数の小さい SrTiO<sub>3</sub> 基板上に歪み格子として成長しているため、層厚を大きくするにしたがって、SrCuO<sub>2</sub> 表面の面内格子定数が増大してゆくと考えられるため、SrCuO<sub>2</sub> / (Cu, C)-1201 界面の格子不整合が小さくなる。これにより界面付近でのキャリアの再結合が抑制され、伝導特性が向上したと考えられる。層厚を 12.2 nm まで増大させたとき、 $T_{c(\rho=0)}$  が 30 K に上昇した。この時のバッファ層厚が SrCuO<sub>2</sub> / (Cu, C)-1201 界面のミスフィット転位を最小にし、下地が(Cu, C)-1201 層に与える圧縮性の歪みが最適値になると考えられる。この圧縮性の歪みが(Cu, C)-1201 界面付近のキャリア濃度を増大させると考えられる。バッファ層厚を 14.2 nm にしたとき、 $T_{c(\rho=0)}$  が減少し、常伝導領域の抵抗温度係数が小さくなることがわかった。この結果は SrCuO<sub>2</sub> バッファの超平坦化により界面歪み効果発現条件の確立・再現性の向上が達成されたことを示している。

また、バッファの平坦化は直上に成長した (Cu, C)-1201 層の表面形態も改善することが見出された。図5に超平坦化前、後のバッファ上に成長した 1201 層表面の AFM 像を示す。平坦化されていないバッファ上の 1201 層では三次元成長への移行が始まっていることが分かる。一方、超平坦化バッファ上の 1201 層表面には基板のステップ&テラス構造を反映した構造が見られ、基板の持つ極限的平坦性がほぼ維持されていることが分かる。積層構造の上層部における界面で歪み効果を発現させるには上部層においても優れた平坦性・二次元成長を維持する必要があるが、

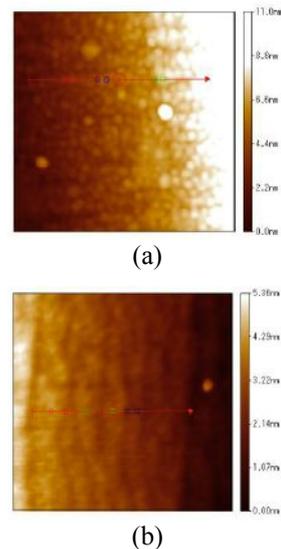


図5 (Cu, C)-1201/SrCuO<sub>2</sub>/SrTiO<sub>3</sub> 構造の 1201 層表面の AFM 像の SrCuO<sub>2</sub> バッファ構造との関係 ; (a) S 平坦化されていない SrCuO<sub>2</sub> バッファ、(b) 超平坦化 SrCuO<sub>2</sub> バッファ。

図5の結果はバッファ超平坦化によりこの要請が達成されたことを示している。

図6に超平坦化バッファを用い、格子定数の短い無限層構造  $\text{CaCuO}_2$  層を圧縮性界面歪み発生のために1201層間に挿入した

$[(\text{Cu}, \text{C})\text{-}1201/\text{CaCuO}_2]_n/\text{SrCuO}_2/\text{SrTiO}_3$  構造の電気抵抗-温度特性と  $\text{CaCuO}_2$  挿入ブロックの繰り返し数  $n$  の関係を示す。1201層のみでは約40 Kであったゼロ抵抗温度が  $\text{CaCuO}_2$  層1層の挿入:  $n=1$  により50 K程度まで上昇し、これを繰り返した  $n>2$  では70 K以上まで大幅に上昇している。これは前述した界面歪み効果にアシストされた超伝導が積層構造で発現していることに加え、 $(\text{Cu}, \text{C})\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_x$ 、 $\text{TlBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_x$  多層型高温超伝導体等で報告者グループが見出した  $\text{CuO}_2$  面間でのホールキャリアの再分布によるものと考えられる。後者では特定の  $\text{CuO}_2$  面のホール濃度が最適値に近づくことにより超伝導臨界温度の上昇が生じ、全ての  $\text{CuO}_2$  面のホール濃度が最適値に一致したときに130 Kを越える常圧化での最高値が発現する。本研究で得られた人工積層構造のゼロ抵抗温度は対応する多層系  $(\text{Cu}, \text{C})$  パルクの値を下回っており、ホール濃度の均一性について改善の余地が残されているものと考えられる。

$(\text{Cu}, \text{C})\text{-}1201$  層を基幹とする超伝導積層構造は本研究開始時点においては超伝導を発現する部位がバッファ層上に成長した1層目の1201層に局限されていたが、以上の結果は作製条件の精密制御により2層目以降の部位でも超伝導が発現すること、また、飛躍

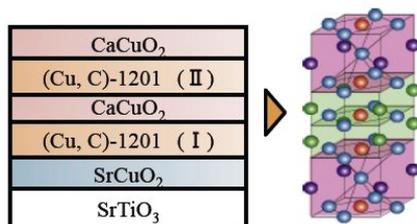
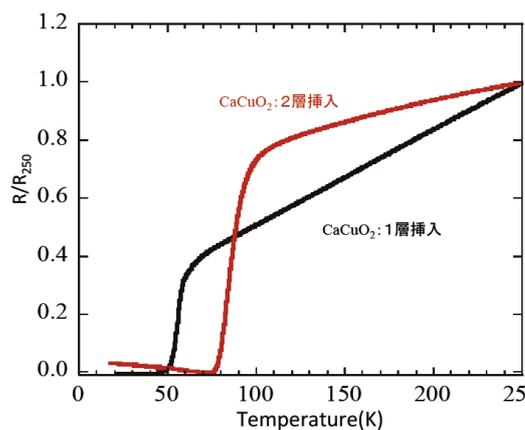


図6 最適化された  $\text{SrCuO}_2$  バッファ上に成長した  $(\text{Cu}, \text{C})\text{CuO}_2\text{-}[1201]$ /無限層  $\text{CaCuO}_2$  層 人工積層構造の電気抵抗-温度特性と  $\text{CaCuO}_2$  層挿入数の関係。

的な特性改善が得られることを示しており、本研究の実施により、当初の目的である試料幅当たりの臨界電流の向上のための基盤的手法の確立に加えて臨界温度の飛躍的上昇が達成された。

また、単一ターゲットからの  $(\text{Cu}, \text{C})$  系薄膜の作製においては、超伝導発現のために重要な要素が電荷供給層となる  $(\text{Cu}, \text{C})$  ブロックの制御にあること、そのためにはターゲット組成における  $\text{Cu}$  欠損率と薄膜成長時の  $\text{CO}_2$  分圧・成長温度を同時に最適化する必要があることを見出した。これにより  $\text{CaCuO}_2$  層の挿入を行わない  $(\text{Cu}, \text{C})\text{-}1201/\text{SrCuO}_2$  積層構造と同等超伝導特性の発現に成功し、レアアース・レス超伝導薄膜の実用的作成法開発のための端緒を開くことに成功した。

## 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7件)

T. Nagai, Y. Udaka, S. Takaki, K. Isowaki, S. Kawamura, K. Kawasaki, H. Tampo, K. M. Kim, S. Kim, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki and N. Terada, “Electronic structures of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  surface and  $\text{CdS}/\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  heterointerface”, Jpn. J. Appl. Phys. vol.**56**, pp.065701-1-5 (2017). 査読有

Y. Udaka, S. Takaki, K. Isowaki, T. Nagai, K. M. Kim, S. Kim, H. Tampo, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Sakai, T. Kato, H. Sugimoto and N. Terada, “Electronic structure of  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$  surface and  $\text{CdS}/\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$  interface”, Phys. Stat. Solid. C (in press) (2017). 査読有

M. Hiroi, H. Sano, T. Tazoko, I. Shigeta, M. Ito, K. Koyama, H. Manaka, N. Terada, M. Fujii, A. Kondo, K. Kindo, “Magnetic and electrical properties of Heusler compounds  $\text{Ru}_2\text{Cr}_{1-x}\text{X}_x\text{Si}$  ( $\text{X} = \text{V}, \text{Ti}$ )”, J. Alloys and Compounds (2016), doi: 10.1016/j.jallcom.2016.09.276. 査読有

N. Terada, S. Yoshimoto, K. Chochi, T. Fukuyama, M. Mitsunaga, H. Tampo, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Sakai, T. Kato and H. Sugimoto, “Characterization of electronic structure of  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$  absorber layer and  $\text{CdS}/\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$  interfaces by *in-situ* photoemission and inverse photoemission spectroscopies”, Thin Solid Films vol.**582**, pp.166–170 (2015). 査読有

N. Terada, H. Morita, K. Chochi, S. Yoshimoto, M. Mitsunaga, S. Ishizuka, H. Shibata, A. Yamada, K. Matsubara and S. Niki, “Characterization of electronic structure of oxysulfide buffers and band

alignment at buffer/absorber interfaces in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-based solar cells”, Jpn. J. Appl. Phys. vol.53, pp.05FW09-1 – 05FW09-cis5 (2014). 査読有

M. Hiroi, T. Higashiuchi, T. Ogawa, I. Shigeta, M. Ito, H. Manaka, N. Terada, “Substitution Effects in the Antiferromagnetic Heusler Compound Ru<sub>2</sub>CrSi”, J. PS Conf. Proc. vol.3, pp.014024-1 – 014024-6 (2014). 査読有

H. Suwa, S. Nishi, K. Koseki, I. Shigeta, M. Ito, M. Hiroi, H. Manaka and N. Terada, “Study on the half-Heusler compounds Co<sub>1+d</sub>TiSb with excess cobalt”, JPS Conference Proceedings 3, pp. 017017(1)-(6) (2014). 査読有

〔学会発表〕(計8件)

第77回応用物理学会秋季学術講演会「2016年9月14日、朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)」、磯脇啓輔、川村末洋、川崎健太、島村拓也、雨崎洋樹、加藤拓也、杉本広紀、寺田教男、「Cu(In,Ga)(S,Se)表面、CdS/Cu(In,Ga)(S,Se)界面の電子構造評価」。

第77回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム、「2016年9月13日、朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)」、寺田教男「正・逆光電子分光法による多元化合物・デバイスの評価」.[招待講演]

20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds, 8<sup>th</sup> of Sept., 2016, Halle (Germany), Y. Udaka, S. Takaki, K. Isowaki, T. Nagai, H. Tampo, K.M. Kim, S. Kim, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Sakai, T. Kato, H. Sugimoto and N. Terada, “Electronic Structure of Cu<sub>2</sub>ZnSn(S<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>)<sub>4</sub> Surface and CdS/Cu<sub>2</sub>ZnSn(S<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>)<sub>4</sub> Interface”.

20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds 8<sup>th</sup> of Sept., 2016, Halle (Germany), T. Nagai, Y. Udaka, S. Takaki, K. Isowaki, S. Kawamura, K. Kawasaki, H. Tampo, K. M. Kim, S. Kim, H. Shibata, N. Terada, K. Matsubara and S. Niki, “ Electronic Structure of CdS/Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> Interface”.

2016 Spring Meeting European Materials Research Society, 3<sup>rd</sup> of May, 2016, Lille (France), T. Isowaki,, T. Fukuyama, S. Kawamura 1, K. Kawasaki, T. Umehar, A. Yamada, and N. Terada, “ Characterization of electronic structure of Ag(In, Ga)Se<sub>2</sub> surface and CdS/Ag(In, Ga)Se<sub>2</sub> interface”.

19th International Conference on Ternary and Multinary Compounds, 4<sup>th</sup> of Sept., 2014, 「 Toki-Messe, (Niigata Perf., Niigata-shi)」, T. Fukuyama, K. Chochi, S. Yoshimoto, M. Mitsunaga, F. Yamanaka, T.

Ohgoh, T. Kawano, K. Moriwaki, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki and N. Terada, “Surface electronic structure of CIGS films grown on polymer substrate”.

19th International Conference on Ternary and Multinary Compounds, 2<sup>nd</sup> of Sept. 2014, 「 Toki-Messe, (Niigata Perf., Niigata-shi)」, N. Terada, K. Chochi, S. Yoshimoto and M. Mitsunaga, “Characterization of materials for solar cells by direct and inverse photoemission spectroscopy”. [招待講演] 2014 Spring Meeting European Materials Research Society, 29<sup>th</sup> of May, 2014, Lille (France), N. Terada, S. Yoshimoto K. Chochi, M. Mitsunaga, H.Tampo, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Sakai, T. Kato and H. Sugimoto, “Characterization of Electronic Structure of CZTSSe Absorber Layer and CdS/CZTSSe Interfaces by *in-situ* PES/IPES”. [招待講演]

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

該当無し

6. 研究組織

(1)研究代表者

寺田 教男 (TERADA Norio)  
鹿児島大学 理工学域工学系 教授  
研究者番号: 20322323

(2)研究分担者

小原 幸三 (OBARA Kozo)  
鹿児島大学 理工学域工学系 教授  
研究者番号: 10094129

奥田 哲治 (OKUDA Tetsuji)  
鹿児島大学 理工学域工学系 准教授  
研究者番号: 20347082