

宮野 健次郎

東京大学先端科学技術研究センター・教授

電子相関による光と電子の双方向制御の実現

## §1. 研究実施の概要

○ 研究のねらい: 本研究の目標は、光と電子系の相互作用を最適・最大化し、光が電子系全体の秩序を遷移させる、あるいは電子系が光の状態を変化させる、という双方向の制御関係が単一の界面や結晶格子一層によっても実現できることを強相関材料を用いて実証することである。

○ これまでの研究の概要: 光励起によって強相関系に生じる金属・絶縁体転移、電荷密度波・モット絶縁体・金属の三相間転移など様々な相転移現象を見出してきた。また、絶縁体の接合面に生じる金属相、反強磁性体の接合面に生じる強磁性相など電子相間の不連続性やフラストレーションがもたらす局在相、光キャリアドーピングによる高度に制御された 2 次元電子ガスなど、新規な物質相を開拓してきた。実験手法的にも 10 フェムト秒クラスの超短パルス光ポンプ・プローブ分光、数十ミリ K の極低温での光励起輸送測定、強磁場・低温での偏光非線形光学測定などを確立し、これらによってのみ観測可能な現象を次々に明らかにして来た。光誘起現象の典型例については理解され、また界面エンジニアリングがもたらすいくつかの著しい例示をすることができた。

○ 今後の見通し: 種々の光誘起相転移や界面相の出現などの微視的な機構を体系的に明らかにする。これは単に科学的興味だけではなく、物理の基礎を理解することが新たな試料構造・デバイス開発へ資すると考えるからである。光と強相関系が素過程のレベルでどのように影響しあうかということ、分光学的に理解して電子相関の階層構造の完全な描像を得ることを試みる。さらに、意識的にフラストレーションを導入した試料、光誘起電荷移動方向を指定できるような構造を持った層状薄膜試料などを作るなどにより、強い光・電子相互作用を持つデバイスの実現を目指す。

## §2. 研究実施体制

(1) 「宮野」グループ(東大)

① 研究分担グループ長: 宮野 健次郎 (東京大学先端科学技術研究センター、教授)

	氏名	所属	役職	参加時期
○	宮野 健次郎	東京大学大学先端科学 技術研究センター	教授	H18.10～

② 研究項目

- ・界面非線形光学測定系の構築とこれを用いた界面電子状態の解明
- ・光・電子相互作用の局所的測定。特に非線形光学効果による局所対称性の同定
- ・光と強く相互作用する電子状態をもつ界面をデザインし薄膜の接合として実現すること

(2)「岡本・ファン」グループ(東大)

- ① 研究分担グループ長:岡本 博(東京大学大学院新領域創成科学研究科、教授)

	氏名	所属	役職	参加時期
○	岡本 博	東京大学大学院新領域 創成科学研究科	教授	H18.10～
○	Harold Y. Hwang	東京大学大学院新領域 創成科学研究科	教授 特任教授	H18.10～H22.8 H22.9～H23.8

② 研究項目

- ・超高速分光測定系の構築
- ・超高速遷移ダイナミクスの検出と機構解明
- ・新規光誘起相転移・光スイッチング現象の開拓
- ・酸化物ヘテロ構造における光励起一電荷注入相制御技術の開発
- ・酸化物ヘテロ界面におけるナノスケール伝導性制御
- ・酸化物を用いた熱電子トランジスタの開発

(3)「岡本」グループ(産総研)

- ① 研究分担グループ長:岡本 博(東京大学大学院新領域創成科学研究科、教授)

	氏名	所属	役職	参加時期
○	岡本 博	独立行政法人産業技術 総合研究所	第5号契約職員 (招聘研究員)	H20.4～H22.3

② 研究項目

- ・超高速分光測定系の構築
- ・超高速遷移ダイナミクスの検出と機構解明
- ・新規光誘起相転移・光スイッチング現象の開拓
- ・酸化物ヘテロ構造における光励起一電荷注入相制御技術の開発

### §3. 研究実施内容

「宮野」グループ(東大)

○光誘起相転移の時間分解 X 線構造解析

これまで光誘起金属・絶縁体転移を実現してきたが、それらは電気・磁気的な性質の変化として観測されたものであった。22年度はさらに構造的な変化を捉えることに成功した。構造解析実験は高エネルギー加速器研究機構の放射光科学研究施設(RF-AR)に東工大腰原教授のグループが建設したパルス X 線装置を用いて行われた。試料は  $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ (NSMO)を  $\text{SrTiO}_3(110)$ 基板上に作製したものであり、160 K 以下で電荷・軌道秩序(COO)した絶縁体になる。

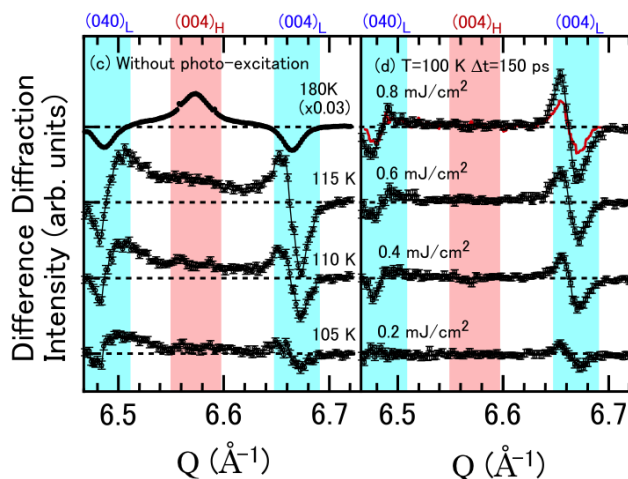


図 1

NSMO は高温では擬立方晶であり、(004)と(040)回折ピークは重なっているが COO 相では b 軸と c 軸が非等価になり、分裂する。相転移より十分低温の 100 K で回折ピークを取得し、これから昇温したときの回折ピークの差分を図 1(左)に示す。180 K では擬立方晶の赤いピークが出現し、青い COO 相のピークが消失する。注意すべきは、昇温に伴い低温ピーク強度が減少・幅広になると共に、中央が盛り上がることから擬立方晶が共存してかつその割合が増えることである。一方、図 1(右)は光励起後 150ps における構造変化を見た場合である。ここでは、低温相のピークがわずかにシフトするが、温度上昇を特徴づける高温相のピークの増加は全くない。反射と透過を同時に測定することによって得られる吸収スペクトルにはこの時間スケールで、エネルギーギャップが縮小すると同時に吸収端が先鋭化するのが見られた。すなわち、光励起によって温度が上昇するのではなく、COO 秩序がより安定化するという一見常識に反する結果になった。このような変化は従来の電子相図には見られなかったものであり、光励起によって”hidden state”があらわになった最初の例である。光誘起相転移を追求する主要な目的は、大きなエネルギー量子を使う事によって熱平衡過程では出現しない状態に到達することであり、本プロジェクトの当初の目標の一つが達成された。[原著論文発表番号:18]

○界面エンジニアリング:バルクでは存在しない対称性の創出

・単位胞内の非等価なサイトによる界面固有対称性の出現

六方晶  $\text{YMnO}_3$ は強誘電性・反強磁性を同時に示すマルチフェロイック物質の典型である。その結晶は回映対称性をもつ二枚の三回対称面より成り、全体として六方対称であるが、基板上に極薄膜として作製した場合には非常に強い三回対称性を発現し、その構造コヒーレンスは膜全面に

及ぶ巨大なものになることを光第二高調波発生(SHG)法により見いだした。図 2 に  $z$  軸方向反射配置における SHG 強度の偏光依存性を示す。これは六方晶系では禁制であり、バルク結晶中で非等価な三回対称面の一方だけが界面に強く拘束されている事によって強調されていることを示している。[原著論文発表番号:8]

・軌道・電荷秩序条件を同時に制御することのできる界面の創出

本プロジェクト開始以前から、(110)基板上に作製した薄膜は必ず変形を伴う強い一次相転移を許容することによって、バルク結晶と同等の明確な相挙動をする事を見いだしていた。この基板に、バルクでは相容れない対称性を持つ二種類の酸化物の接合を作製すると、膜厚が薄い時には界面のフラストレーションが系のエネルギーを支配するようになる。

$\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3/\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  接合を一例として図 3 に示す。系が均一でかつ「柔らかい=responsive」このような超巨大磁気抵抗効果はバルク単結晶においても実現困難な性質である。22 年度は COO 秩序をさらに安定化させ、室温動作する光誘起現象を見いだす事を目的とし、(210)基板を用いた精密な薄膜作製を開始した。予備実験においても既に従来の薄膜に見られない物性が観測されており、今後の展開が期待される。[原著論文発表番号:6]

○SHG データの詳細な解析と汎用性の確立へ向けて

様々な薄膜からの SHG データが蓄積されるに従って、当初想定していたよりも遥かに多彩な対称性が強い SHG 活性を示すことが明らかになりつつある。前項の  $\text{YMnO}_3$  はその一例であるが、従来見過ごされて来た磁気も含めた対称性についての系統的な理解を本プロジェクト終了までに得て、将来のレファレンスとなる形に集大成することを新たな目標に据えて研究を進めている。一例として、 $\text{Pr}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$  の強磁性・反強磁性転移に伴う SHG によって可視化された反強磁性ドメインを図 4 に示す(明るく見えている部分が反強磁性相。見やすくするために一部を白線で縁取りした。)。[論文準備中]

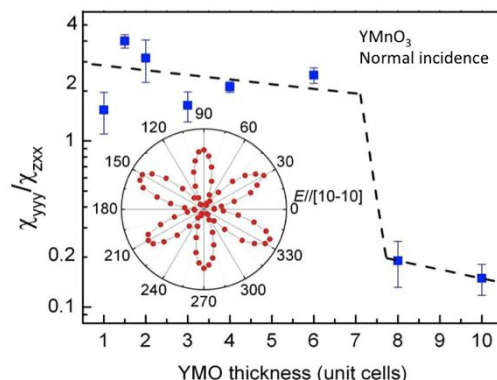


図 2

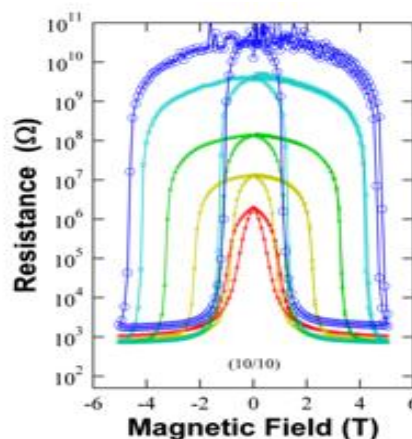


図 3

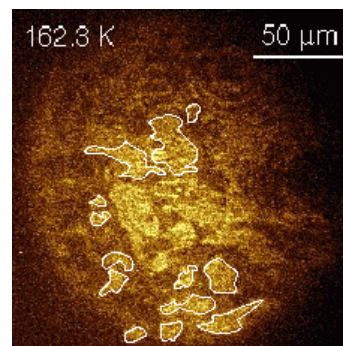


図 4

「岡本」グループ(東大、産総研)

○超高速分光測定系の開発

21年度までに、当初目標である15フェムト秒パルスを用いた時間分解能20フェムト秒の分光測定系の構築が完了し、高時間分解能かつ高感度のポンププローブ分光測定が可能となった。そこで、本年度は、新たに10フェムトパルスを発生するための非同軸オプティカルパラメトリックアンプの構築に着手した。その結果、可視領域(1.7 eV~2.4 eV)において、時間幅約8フェムト秒のパルスを得ることに成功した。強度は、約500 nJ/パルスである。10フェムト秒以下のパルスを用いれば、遷移金属酸化物の光誘起相転移における電荷ダイナミクスを実時間観測できる可能性がある。今後、出力の安定化と強度の増強を試み、23年度内にそれを用いたポンププローブ分光測定の実現を目指す。

○バナジウム酸化物における新規光誘起相転移の探索

ペロブスカイト型遷移金属酸化物では、光照射による電荷秩序や軌道秩序の融解、あるいは、電荷秩序相から強磁性金属相への相転移は観測されている。しかしながら、異なる電荷秩序相あるいは軌道秩序相の間で光誘起相転移を起こす系はない。異なる秩序相間の高速かつ高効率の光誘起相転移が実現できれば、二つの光パルスを使った高速スイッチング素子への展開も期待できる。バナジウム酸化物( $\text{YVO}_3$ )は、77K以下でC-type軌道秩序相を、77K~200KでG-type軌道秩序相をとる。そこで、良質な単結晶試料を作成し、C-typeとG-typeの軌道秩序相間の光誘起相転移の可能性を調べた。

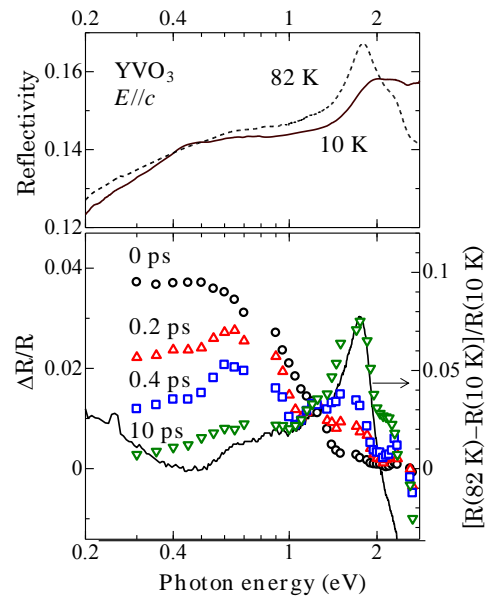


図 5

図 5 上は、C-type 軌道秩序相(10 K)とG-type 軌道秩序相(82 K)における反射スペクトル、下は、C-type 軌道秩序相(10 K)を光照射した場合の反

射率変化である。低エネルギー側の反射率の増加は光キャリアの生成によるものであり、それに引き続き1 ps 以内にG-type 軌道秩序相への相転移が生じることがわかる。今後、相転移のダイナミクスとその励起光強度依存性を詳細に測定し、相転移機構を解明するとともに、2パルス励起によるスイッチングの可能性を検討する予定である。

○酸化物ヘテロ構造における光励起/電荷注入相制御技術の開発

強相関電子系(単結晶あるいは薄膜試料)への光照射では、正負両極性のキャリアが生じるため、光強度の増加に伴い高速のキャリア再結合が生じ、多くの場合効率的キャリア注入が困難と

なる。また、キャリア注入効果と温度効果を判別することも容易でない。これらの問題を解決する手法として、ペロブスカイト型遷移金属酸化物ヘテロ接合界面でのキャリア移動に注目し、キャリア生成層と強相関酸化物層からなるヘテロ構造を用いた光励起/電荷注入相制御技術の開発を目指してきた。本年度は、まずフェムト秒分光測定により、チタン酸化物単膜の光応答について詳細な測定を行い、チタン酸化物層内でのキャリアダイナミクスを明らかにした。次に、これまでに進めてきたマンガン酸化物とSrTiO<sub>3</sub>(STO)からなる二種類のヘテロ接合Nd<sub>0.52</sub>Sr<sub>0.48</sub>MnO<sub>3</sub>/STOおよびLa<sub>0.9</sub>Sr<sub>0.1</sub>MnO<sub>3</sub>/STOについて、光照射後の電荷ダイナミクスとスピンドイナミクスの温度依存性を測定した。また、マンガン酸化物Nd<sub>0.52</sub>Sr<sub>0.48</sub>MnO<sub>3</sub>およびLa<sub>0.9</sub>Sr<sub>0.1</sub>MnO<sub>3</sub>の単膜について同様な測定を行い、それらの結果をヘテロ接合の結果と比較することによって、ヘテロ接合におけるキャリア注入効果を精密に評価した。[H. Yada *et al.*, Phys. Rev. B, in press 及び投稿中。]

図6に、10KにおけるNSMO単膜およびNd<sub>0.52</sub>Sr<sub>0.48</sub>MnO<sub>3</sub>(NSMO)/STOのキャリアダイナミクス [(a-c)および(g-i)] と磁化ダイナミクス [(d-f)および(j-l)] を示す。NSMO単膜では、光キャリアは高速の再結合 (<< 1ps) を起こす。キャリア注入による直接の磁化の変化は生じず、100 ps までの時間領域でスピン系の温度上昇による磁化の増加のみが現れる。ヘテロ接合では、時間分解能(200フェムト秒)と同程度の時間スケールでSTOからNSMOへホールが注入されるが、ホールの寿命が単膜に比べ増加するため、光照射直後にホール注入による磁化の増加 [図(i)中 fast] が現れる。その後、500 ps までの時間領域で、キャリアの再結合とスピン系の温度上昇による磁化の増加 [図(i)中 slow] が生じるが、この過程は単膜 [図(f)] に比べて明らかに遅れている。以上の結果から、高速のホール注入およびホール注入による非熱的な磁化変化と、キャリアの再結合による熱的な磁化変化のダイナミクスの全容が明らかとなった。

銅酸化物については、Nd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>において、時間分解能 40 fs の過渡吸収分光によって、キャリア注入量に対する金属相の生成量を定量的に評価した。[原著論文発表番号:9, 22]

さらに、La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> (LCO)とアナターゼTiO<sub>2</sub>のヘテロ接合においてTiO<sub>2</sub>の膜厚を変えた様々な接合を作成し、TiO<sub>2</sub>を光照射することによるLCOへのホール注入量を測定することによって、ヘテロ界面におけるバンドベンディングの評価に成功した。この結果から、強相関酸化物層へのキャリア注入に最適なTiO<sub>2</sub>層厚を決定することができる。[論文準備中]

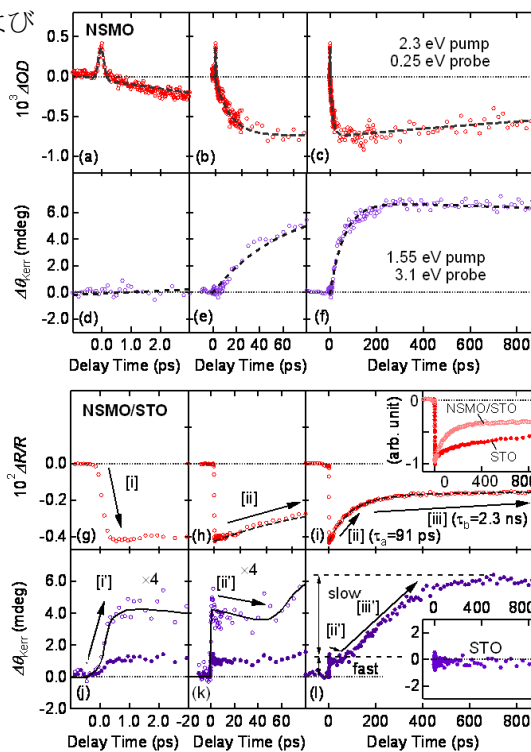


図 6

「ファン」グループ(東大)

○伝導性 LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> 界面における局所電界効果

2つの異なる絶縁体 LaAlO<sub>3</sub>と SrTiO<sub>3</sub> からなる界面では、LaAlO<sub>3</sub> 薄膜の膜厚が 4 原子層以上の場合にのみ界面近傍数 nm 領域において二次元電子ガスが形成される。この系に背面(SrTiO<sub>3</sub> 基板)から電圧印加して、界面の電子濃度を変調することが可能なことを過去に報告してきた\*1。本年度は、厚さ 3 原子層の LaAlO<sub>3</sub> 薄膜表面側より原子間力顕微鏡(AFM)探針にて電圧を印加し、界面電子濃度の変調を試みた。正の電圧を印加した場合と負の電圧を印加した場合とで、AFM の位相コントラストが明瞭に異なることから、LaAlO<sub>3</sub> 表面に蓄積された電荷量が印加電圧によって再現よく制御できることが読み取れる[図 7(a)-(d)]。電圧印加後の電気測定から、表面に印加された電圧によって界面伝導率を変調されていることが確認できた[図 1(e)]。さらに、LaAlO<sub>3</sub> 薄膜の膜厚を変化させた系において同様の実験を行ったところ、図 8 にみられるように界面から数 10nm 程度離れた表面の電圧変調によっても界面の伝導率が変化することを見出した。これらの結果は、LaAlO<sub>3</sub> 薄膜表面と界面が十原子層程度離れていても強い相互作用を示すことを示唆する結果である。[原著論文発表番号: 1]

\*1C. Bell *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 226802:1-4 (2009).

\*2C. Cen *et al.*, *Nature Mater.* **7**, 298-302 (2008).

○マンガン酸化物を用いた金属ベーストランジスタの作製

酸化物半導体 Nb:SrTiO<sub>3</sub> と金属 (La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>、LSMO) からなる Schottky 接合の界面組成を原子レベルで制御することで Schottky 障壁高さを 0.5 V 程度変化させられる技術\*3 を応用し、2つの Schottky 接合から構成される金属ベーストランジスタの作製を行った。本トランジスタの動作は、エミッタからベース層へ注入された電子の大部分がコレクタで捕獲されることに基づく。よって、ベースからコレクタへ流れる大きなリーク電流はデバイス動作の大きな妨げとなる。図 9 に示す

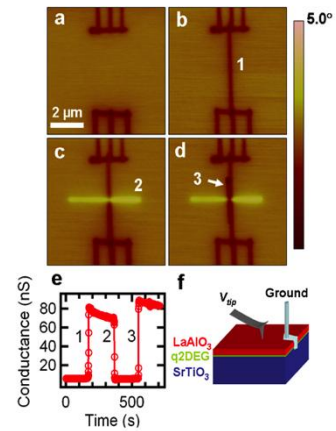


図 7 (a)-(d) LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> 構造の AFM 位相像。(e) 表面印加電圧後の界面伝導層の導電率及び(f)その測定模式図。

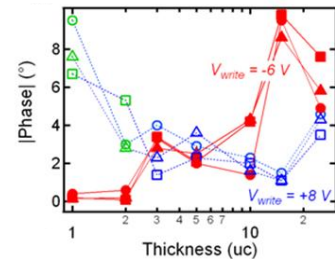


図 8 LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> 構造の電圧印加後の位相の LaAlO<sub>3</sub> 膜厚依存性。

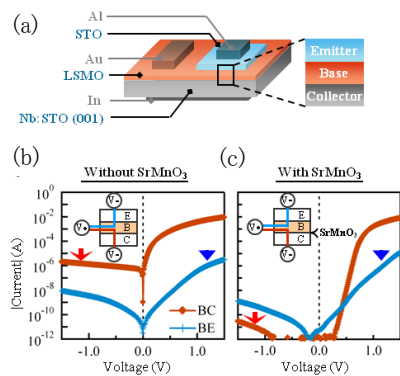


図 9 (a) 作製したトランジスタの構造。エミッター-ベース間に SrMnO<sub>3</sub> (1 原子層) 挿入(b)した場合、(c)しない場合の電流電圧特性。

ように、LSMO (ベース)と Nb:SrTiO<sub>3</sub> (コレクタ) 界面に1原子層の SrMnO<sub>3</sub> を挿入することによって、ベース-コレクタ間のリーク電流を4桁抑制することに成功し、増幅率~200のトランジスタ動作を達成した(図10)。酸化物を用いたトランジスタの作製は、面内チャネルを利用した電界効果型に集中しているが、今回実現した界面に垂直方向の強い内部電場を利用したトランジスタは、ベース層の材料に強磁性体や、超格子構造を用いることで多くの機能開拓が期待されるデバイス構造であり、今回の結果はその土台となるものであると言える。[原著論文発表番号: 14]

\*3Y. Hikita *et al.*, *Phys. Rev. B* **79**, 073101 (2009).

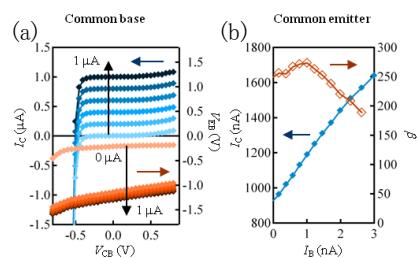


図10 トランジスタの(a)ベース接地出力特性と電圧帰還特性。(b)エミッタ接地出力特性と増幅率。



## §4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ●論文詳細情報

1. Y. W. Xie, C. Bell, T. Yajima, Y. Hikita, and H. Y. Hwang, “Charge writing at the  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$  surface”, *Nano Lett.* **10**, 2588-2591 (2010) (DOI: 10.1021/nl1012695).
2. H. Uemura, H. Matsuzaki, Y. Takahashi, T. Hasegawa and H. Okamoto, “Ultrafast charge dynamics in organic one-dimensional Mott insulators”, *Physica B: Condensed Matter* **405**, S357-S359 (2010) (DOI:10.1016/j.physb.2009.11.080).
3. Y. Kozuka, Y. Hikita, C. Bell, and H. Y. Hwang, “Dramatic Mobility Enhancements in Doped  $\text{SrTiO}_3$  Thin Films by Defect Management”, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 012107:1-3 (2010) (DOI: 10.1063/1.3457994).
4. J. A. Mundy, L. Fitting-Kourkoutis, Y. Hikita, T. Hidaka, H. Y. Hwang, and D. A. Muller, “Charge Transfer at  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$  Interfaces Probed by Spectroscopic Imaging in an Aberration-Corrected STEM”, *Microscopy and Microanalysis* **16**, 1398-1399 (2010) (DOI: 10.1017/S1431927610060332).
5. L. Fitting-Kourkoutis, J. H. Lee, J. H. Song, H. Y. Hwang, D. G. Schlom, and D. A. Muller, “2D Mapping of Bonding Changes at Perovskite Oxide Interfaces and Around Defects”, *Microscopy and Microanalysis* **16**, 1400-1401 (2010) (DOI: 10.1017/S1431927610060460).
6. Y. Ogimoto, M. Nakamura, N. Harada, N. Ogawa, and K. Miyano, “The essentials for the control of charge-orbital ordering in thin films of perovskite manganites”, *Mater. Sci. Eng. B* **173**, 51-56 (2010) (DOI:10.1016/j.mseb.2010.02.009).
7. Y. Wakabayashi, H. Sawa, N. Takubo, M. Nakamura, Y. Ogimoto, and K. Miyano, “Little volume change in orbital ordering transition in manganite thin films”, *J. Phys. Conf. Ser.* **211**, 012004 (2010) (DOI:10.1088/1742-6596/211/1/012004).
8. Z. Sheng, N. Ogawa, Y. Ogimoto and K. Miyano, “Multiple Stable States with

- In-Plane Anisotropy in Ultrathin YMnO<sub>3</sub> Films”, *Adv. Mater.* **22**, 5507-5511 (2010). (DOI:10.1002/adma.201002743).
9. H. Okamoto, T. Miyagoe, K. Kobayashi, H. Uemura, H. Nishioka, H. Matsuzaki, A. Sawa, and Y. Tokura, “Ultrafast charge dynamics in photoexcited Nd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> and La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> cuprate compounds investigated by femtosecond absorption spectroscopy”, *Phys. Rev. B* **82**, 060513(R):1-4 (2010) (DOI:10.1103/PhysRevB.82.060513).
  10. L. Fitting Kourkoutis, H. L. Xin, T. Higuchi, Y. Hotta, J. H. Lee, Y. Hikita, D. G. Schlom, H. Y. Hwang, and D. A. Muller, “Atomic-Resolution Spectroscopic Imaging of Oxide Interfaces”, *Phil. Mag.* **90**, 4731-4749 (2010) (DOI: 10.1080/14786435.2010.518983).
  11. L. Fitting Kourkoutis, J. H. Song, H. Y. Hwang, and D. A. Muller, “Microscopic Origins for Stabilizing Room Temperature Ferromagnetism in Ultrathin Manganite Layers”, *Proc. Nat. Acad. Sci.* **107**, 11682-11685 (2010) (DOI: 10.1073/pnas.1006620107).
  12. Y. Kozuka, M. Kim, H. Ohta, Y. Hikita, C. Bell, and H. Y. Hwang, “Enhancing the electron mobility via delta-doping in SrTiO<sub>3</sub>”, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 222115:1-3 (2010) (DOI: 10.1063/1.3524198).
  13. G. Singh-Bhalla, C. Bell, J. Ravichandran, W. Siemons, Y. Hikita, S. Salahuddin, A. F. Hebard, H. Y. Hwang, and R. Ramesh, “Built-in and induced polarization across LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> heterojunctions”, *Nature Phys.* **7**, 80-86 (2010) (DOI:10.1038/NPHYS1814).
  14. T. Yajima, Y. Hikita, and H. Y. Hwang, “A heteroepitaxial perovskite metal-base transistor”, *Nature Mater.* **10**, 198-201 (2011) (DOI:10.1038/nmat2946).
  15. H. Uemura and H. Okamoto, "Direct Detection of the Ultrafast Response of Charges and Molecules in the Photoinduced Neutral-to-Ionic Transition of the Organic Tetrathiafulvalene-p-Chloranil Solid", *Phys. Rev. Lett.* **105**, 258302:1-4, (2010) (DOI:10.1103/PhysRevLett.105.258302).
  16. H. Okamoto, T. Miyagoe, K. Kobayashi, H. Uemura, H. Nishioka, H. Matsuzaki, A.

- Sawa, and Y. Tokura, “Photoinduced transition from Mott insulator to metal in undoped cuprates  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$  and  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ ,” *Phys. Rev. B* **82**, 060513(R):1-4 (2010). (DOI:10.1103/PhysRevB.82.060513)
17. S. Wall, D. Brida, S. R. Clark, H. P. Ehrke, D. Jaksch, A. Ardavan, S. Bonora, H. Uemura, Y. Takahashi, T. Hasegawa, H. Okamoto, G. Cerullo, and A. Cavalleri, “Quantum interference between charge excitation paths in a solid-state Mott insulator”, *Nature Phys.*, **7**, 114-118 (2011). (DOI:10.1038/nphys1831).
  18. H. Ichikawa, S. Nozawa, T. Sato, A. Tomita, K. Ichiyanagi, M. Chollet, L. Guerin, N. Dean, A. Cavalleri, S. Adachi, T. Arima, H. Sawa, Y. Ogimoto, M. Nakamura, R. Tamaki, K. Miyano and S. Koshihara, “Transient photoinduced ‘hidden’ phase in a manganite”, *Nature Mater.* **10**, 101-105 (2011). (DOI:10.1038/NMAT2929).
  19. T. Higuchi, Y. Hotta, Y. Hikita, S. Maruyama, Y. Hayamizu, H. Akiyama, H. Wadati, D. G. Hawthorn, T. Z. Regier, R. I. R. Blyth, G. A. Sawatzky and H. Y. Hwang, “ $\text{LaVO}_4\text{:Eu}$  Phosphor Films with Enhanced Eu Solubility”, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 071902:1-3 (2011) (DOI:10.1063/1.3554749).
  20. Y. W. Xie, C. Bell, Y. Hikita, and H. Y. Hwang, “Tuning the Electron Gas at an Oxide Heterointerface via Free Surface Charges”, *Adv. Mater.*, Early View (2011) (DOI: 10.1002/adma.201004673).
  21. S. Tao, H. Matsuzaki, H. Uemura, H. Yada, T. Uemura, J. Takeya, T. Hasegawa, and H. Okamoto, “Optical pump-probe spectroscopy of photocarriers in rubrene single crystals”, *Phys.Rev. B* **83**, 057204:1-9 (2011). (DOI:10.1103/PhysRevB.83.075204)
  22. H. Okamoto, T. Miyagoe, K. Kobayashi, H. Uemura, H. Nishioka, H. Matsuzaki, A. Sawa, and Y. Tokura, “Photoinduced transition from Mott insulator to metal in the undoped cuprates  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$  and  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ ”, *Phys. Rev.* **B83**, 125102:1-10 (2011).
  23. H. Yada, M. Matsubara, H. Yamada, A. Sawa, H. Matsuzaki, and H. Okamoto, “Ultrafast control of magnetization by photocarrier injection in  $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$  heterostructures”, *Phys. Rev. B*, (2011). in press

24. K. Otsubo, Y. Wakabayashi, J. Ohara, S. Yamamoto, H. Matsuzaki, H. Okamoto, K. Nitta, T. Uruga, and H. Kitagawa, “Bottom-up realization of a porous metal-organic nanotubular assembly”, *Nature Mater.*, (2011). in press

(4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 0 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)