

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420705

研究課題名(和文) Rydberg状態希ガスを内包する物質の設計と電子励起蓄電池への応用

研究課題名(英文) Materials design for a crystal containing rare gas in Rydberg state and its application to electronic excitation battery

研究代表者

中村 吉伸 (NAKAMURA, YOSHINOBU)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：30198254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：Rydberg状態の水素原子を構造に取り込むホスト-ゲスト物質系を設計し、その高エネルギー励起状態による巨大起電力が期待される革新的電池系の設計を試みた。大きな格子間空隙をもつ遷移金属Antiperovskite窒化物 $Mn_3Cu_{1-x}Ge_xN$ においてDC水素プラズマ処理により、結晶格子は不可逆的に膨張することを発見し、この原因が結晶格子内に取り込まれた水素が $1s2$ の $H^-$ の状態をとることによると結論した。光物性および電気物性評価から、この $Mn_3Cu_{1-x}Ge_xN$ 系は水素による格子の膨張に伴い金属からワイドギャップ半導体に転移することを示したが、そのRydberg状態の確認には至らなかった。

研究成果の概要(英文)：We designed a host-guest system which will incorporate hydrogen atoms in the Rydberg state into its interstitial spaces and tried to apply it to an innovative battery system having huge electromotive force due to its high energy excited state. The crystal lattice of a metallic perovskite,  $Mn_3Cu_{1-x}Ge_xN$  was greatly and irreversibly expanded after the DC hydrogen plasma treatment and its origin is suggested to be hydride ions ( $H^-$ ) incorporated into the interstitial space surrounded by Mn-Cu(Ge) octahedral coordination cages. From the result of optical and electrical characterizations, it was concluded that this  $Mn_3Cu_{1-x}Ge_xN$  system showed a metal to a wide gap semiconductor transition accompanied by the huge lattice expansion due to the interstitial hydride ions. Unfortunately we cannot confirm the Rydberg state of this system even under the deep UV light irradiation.

研究分野：物性物理化学

キーワード：Rydberg状態 水素 ホスト-ゲスト Antiperovskite 金属絶縁体転移 プラズマ処理 マンガン テロ接合講師

## 1. 研究開始当初の背景

希ガス元素はその安定な電子配置から反応性に乏しく、その安定さゆえ、基底状態 - 励起状態間のエネルギー差が大きいことは周知の事実である。また、水素原子も原子核に近接した 1s 電子が基底状態のため、励起状態 (2s 軌道) とのエネルギー差が 10.2eV と大きい。この希ガス、水素の一種共通した性質はもし希ガスや水素原子を含有する物質をエネルギー材料として応用展開するのであれば、巨大エネルギーの獲得・放出が得られる可能性を意味する。

例えば希ガス元素を電池の活物質として見た場合、その安定さゆえ酸化還元により得られるエネルギーは実用 2 次電池 Li/Li<sup>+</sup>系に比較しても遥かに大きいはずである。イオン化エネルギー (最もイオン化が容易な Xe で 12.13eV、He、Ne では 20eV 以上) から類推しても 10V 以上の巨大な起電力が予想できるが、問題は果たして希ガスの酸化還元系構築が可能かという点であり、従来技術の延長線上で「希ガス 2 次電池」などの蓄エネルギー材料を模索すればその目標達成には困難を極める。化学反応レベルでは反応性に乏しい希ガスにあっては Li イオン 2 次電池に代表される化学的プロセスによる起電力発生は全く期待できないのが現実である。

一方で、水素原子や希ガス原子は高周波電場や光励起といったエネルギー源があれば比較的容易に励起状態することができる。従って、もし水素もしくは希ガス元素の励起状態が安定化できれば、基底状態 - 励起状態間、もしくは励起状態間同士のエネルギー差を起電力とする新構想の電池・蓄エネルギー材料が構築しうる可能性がある。希ガスは種々の電子励起の手段により外殻電子が基底状態より主量子数の大きい原子軌道に入った水素様原子状態 (Rydberg 状態) を取りうるということが知られており、水素原子も含めてその励起状態は類似している。ただし、孤立原子の励起寿命は最も長い Ne であっても 20 ns 程度と蓄電材料へ応用できるレベルにはない。また、孤立原子やファンデルワース凝集状態ではデバイス応用に適さないことは言うまでもない。外場による励起状態が安定ならば原子の膨張と引き換えに高エネルギー状態が実現できるはずである。

## 2. 研究の目的

本研究においては潜在的には蓄エネルギー

材料としての高いポテンシャルを秘めた水素原子、もしくは希ガス原子をインターカレートした固相系を創成し、その電子励起によりインターカレート原子 (イオン) の Rydberg 状態を実現し、基底状態 - Rydberg 状態間のエネルギー差を起電力とする蓄エネルギー材料の可能性を追求する。

理論においては古くからその存在が予測されていた Rydberg 原子ではあるが、実験的検証ができるようになったのは波長可変のレーザーが開発されて以降の比較的最近であり、固体内のように周囲に相互作用のある原子が存在した場合、その状態・寿命がどう影響をうけるかなどの基礎的研究も未だ創成期である。固体ケージ内への希ガス原子の閉じ込めは、フラーレンなどの中空分子の結晶やコーデライトなどの鉱物で実現されているが、その報告例は未だ少ない。本研究は先ず、固体内に希ガス元素の閉じ込めの手法を確立するところから開始することが妥当と考えた。

まずは固体内の水素原子あるいは希ガス原子の Rydberg 状態の実現とその長寿命化のための固体マトリックスの選定その設計指針の確立を最初の目標として研究に取り組むことから開始する。以降、課題目標を一つ一つ達成してゆきながら、着実に最終目標に近づいてゆく戦略をたてた。

Step 1: 希ガス原子のホスト固体内への閉じ込め (インターカレーション) の試み、そのためのホスト物質の選定。化学的に安定な希ガスインターカレート化合物の創成。

Step 2: インターカレートされた希ガス原子の励起手段の確立。

Step 3: 蓄エネルギー物質としての設計、実現した系を念頭にエネルギー取り出しのための接合系デバイス (2 次電池系) の考案。

本研究の独創性は、その化学的安定性の利用以外に応用分野が見いだされることのない希ガスおよびその関連化合物が潜在的に有する“電子励起状態における高エネルギー吸収・放出能”に着目し、高密度蓄エネルギー材料として応用展開を試みる着想にある。原発事故に端を発した電力エネルギー危機が叫ばれる中、2 次電池あるいはキャパシターによる蓄電技術が改めて注目されている。しかしながら化学プロセス

(活物質の酸化還元)による既存の2次電池にあっては、その蓄積・放出エネルギーはたかだか数 eV のオーダーであり、動力などハイパワーデバイスへの電力供給などに対してはいかに非力である。本研究で提案する希ガス元素の電子励起による蓄エネルギー技術“電子励起蓄電池”は、物質系の設計如何では十数 eV オーダーと化学電池の数倍のエネルギー蓄積が可能となるはずである。固相内での希ガス励起状態が安定化・長寿命化されれば、その励起エネルギー大ききゆえ、無限小時間で基底状態への電子遷移をおこすことで強力な爆薬(電子励起爆薬)への応用展開も見えてくる。原子の Rydberg 状態の実験的観測はまだ若い分野であることから、基礎科学的側面からも本研究が分野の発展に貢献する可能性も高い。Rydberg 状態とそれを取り巻くケージ電子系との相互作用は興味をもたれる研究テーマであるが、現時点で Rydberg 状態を安定化させる固相ケージ内の電子状態の描像は仮説の段階でしかない。本研究成果による情報発信が、固体内 Rydberg 電子状態の基礎研究に少しでもフィードバックできればと考えている。

### 3. 研究の方法

本研究はまず、

固体内に水素の閉じ込めの手法を確立するところからスタートし、光励起などの物理的手段により、インターカレート希ガス原子の Rydberg 状態の実現を目指す。

エネルギー取り出しのためには接合デバイスの設計も必要となり、応用の側面から水素をインターカレートした物質を基にした接合デバイスの設計・創成を行う。

当初の研究計画によれば“電子励起蓄電池”の実現を目指し、その活物質となりうる希ガス内包物質を、巨大ケージ、トンネル、2次元層間を有する宿主物質への希ガスプラズマのインターカレーションにより合成を行ない、その光励起によるゲスト希ガスの Rydberg 状態を実現することとした。ゲスト希ガスの Rydberg 状態は UV 吸収スペクトルにより評価し、また内包物質の導電率などの基礎物性の評価も併せて行う。開発に成功した水素あるいは希ガス内包物質はその空隙の構造により分類し、それぞれのケース(ケージ、トンネル、層内)での電子状態とインターカレート希ガスの状態との相関関係を基礎物性の実験データ解析および量子化学計算などの手法を駆使して

明らかにする。長寿命 Rydberg 状態が期待される系においては接合デバイスの構築を目指す、その全段階として、水素あるいは希ガスインターカレーションの骨格となり得る系(すなわち気相からの水素、希ガス取りこみのための必須元素をふくむ)接合デバイスの設計・構築、その基礎物性の評価を行うこととした。具体的に行った手法は以下に示す。

Rydberg 状態発現を目指した、水素(希ガス)インターカレート物質の設計・合成  
電荷をもたない希ガス原子をいかにして宿主物質内にインターカレートするかを検討することで始まる。希ガスを挿入する宿主化合物の条件として、以下の仮説を提案しその条件を満たす物質を探索した。

(1) 希ガス Rydberg 状態には電子が主量子数  $n$  の大きな軌道を占めるため、原子が膨張状態になる。固体内に膨張原子が収まる十分な空隙をもつこと。また、膨張状態の原子の挿入で大きな体積変化をおこすため、原子膨張による破壊を宿主化合物のマトリックスには金属結合のごとき結合の柔軟性を有すること。

(2) 励起状態の電子が安定となるように空隙の内面が電荷中性の共有結合性状態あるいは電子供与性が強く、励起電子が正電荷で安定化されない状況にあること。

(3) 蓄電デバイスとしての応用を念頭におくため、できれば宿主には導電性が付与されること。

この条件を満たす候補物質として Chevrel 化合物 ( $M_x Mo_6 S_8$  など) や  $Mo_9 Se_{11}$  など共有結合性の強いクラスター化合物、 $TaS_2$  などの層間に大きな原子・分子がインターカレートできる層状化合物、トンネル構造を有し、しかも電子吸引性の強い Oxyfluoride イオンを含む  $Sn_2 F_2 O$  などが宿主化合物、また気体分子を透過しにくい PET などの高分子材料もプラズマ処理により水素や酸素を吸蔵する可能性があるため候補の一つとなった。試行錯誤の結果、最終的には、結合の柔軟度が高く、単位格子内には体積の大きいアニオンのインターカレートが可能サイトを有する Mn-系アンチペロプスカイト化合物 ( $Mn_3 AN$ ,  $A=Cu, Ge, Ag, Zn, Ni \dots$ ) を選択する。

宿主化合物に高密度で水素(希ガス)を導入する手法として、プラズマ処理を採

用し、その装置系の設計・開発を行った。当初は高周波電源装置と Xe などの希少ガスを効率的に利用するという観点からガス閉鎖循環装置を基に装置の構築を行ない25年度前半で完成させる計画でいた。しかしながら、初期に設計した高周波プラズマ発生装置は生成プラズマの密度が低いことが判明したため、途中から直流電界印加によるプラズマ発生装置として再設計した。

正イオン化状態でホスト内に挿入された水素（希ガス）原子は、ホスト化合物に内在する空隙ケージにとどまり、周囲を電子より奪って中性原子（基底状態）となって安定化すると考えられ、インターカレート可否は X 線回折の結果より判断される。光励起による Rydberg 状態生成は深紫外吸光分光装置、紫外発光分析（共通施設として利用が可能）により確認する。また試料の導電率などの基礎物性は現有の物理特性評価装置（PPMS）を用いて評価を行った。

#### Rydberg 状態原子による蓄電デバイス構築のため基礎研究

水素あるいは希ガスをインターカレートし、照射による励起状態（Rydberg 状態）が安定できたとしても、そのエネルギーの取り出し、利用するプロセスが必要である、一つの可能性として、接合デバイスによる蓄エネルギーがある。

本研究においては ZnO のようなワイドギャップ半導体と水素吸蔵が期待される Mn 化合物との接合を形成し、その輸送特性や Mn の局所磁気構造評価などのキャラクターゼーションを行い、基礎特性を通じての蓄エネルギー接合デバイスの設計指針を得ることを試みた。局所スピンアラインメントの評価には ESR を用いた。

#### 4. 研究成果

水素は電子構造が単純で理論的考察も比較的容易であったことから、ゲスト物質として最適と考え、Rydberg 電子（電子励起状態）とそれを取り囲むホスト物質の金属イオンケージの電子系との相互作用をホスト物質の結晶化学的・構造化学的特徴に従って電子論的な考察を行ない、Rydberg 状態の実現に取り組んだ。結晶学的考察より水素原子ゲストを取り込むホストとしては、電子供与性の高い前期遷移元素やアルカリ土類金属が適と考え、格子間に安定かつ大きなサイズの金属イオンケージ構造が存在する物質系として Antiperovskite 型窒化物を選択した。この物質系に効率的に水素原子を導入する手法の開発を行った結果、気相中からの水素の熱拡散に加えて、DC 放

電による水素プラズマ処理の手法を開拓し、そのための装置開発を併せて行った。

#### (1)-□Antiperovskite Manganese Nitride における水素吸蔵特性の発見

Antiperovskite 化合物は、Metallic perovskite とも呼称される金属間化合物群であり、組成式は  $B_3AX$  : A,B=金属元素、X=C,N,O であり、基本構造は  $AB_3A$  の fcc 合金の体心に X 元素が挿入された構造をとる (Fig.1)。この一連の化合物群の中で、Manganese Copper Nitride ( $Mn_3CuN$ ) は、窒化物としてはヤング率: E が 90 GP と非常に小さく、巨大な磁歪効果を示すなど“柔軟な”結晶である。この特性は水素などをインターカレートさせた場合、構造の変化を伴わずに結晶が膨張収縮をおこすことが可能であることを意味しており、またインターカレート水素が励起状態となり、さらに原子がさらなる膨張をおこした場合においてもホストの Antiperovskite 骨格の可逆的変形が可能となる。本系を水素原子吸蔵のホストの候補とするにあたり、その結晶を意図的に伸縮させるとことができないかを検討した。

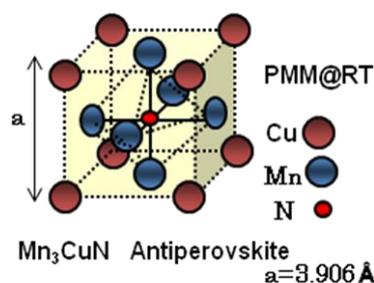
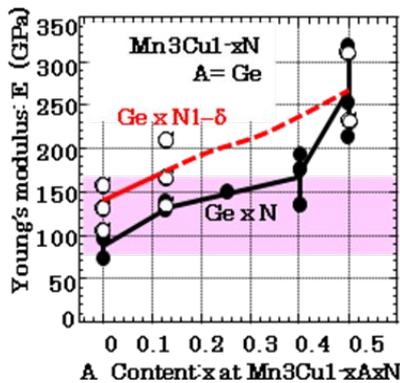


Fig.1 The crystal structures of Antiperovskite manganese nitride:  $Mn_3CuN$ .

#### (1)- Antiperovskite Manganese Nitride の物性に与える格子欠陥の影響

結晶における結合長を意図的に伸縮させるためには、valence electron 数 ( $n_v$ ) を増減させることで可能であると考えており、この仮説は  $Mn_3CuN$  の Cu サイトを Ge で一部置換した系において実証した。Cu における  $n_v$  は最外殻の電子配置が  $4s^1$  のため  $n_v=1$ 、Ge の場合では  $4s^2 4p^2$  のため  $n_v=4$  である。Fig.2 に  $Mn_3CuN$  の Cu の部分置換系である  $Mn_3Cu_{1-x}Ge_xN$  における Ge 組成とヤング率: E との関係を示す。Ge のドーパ量の増加に伴う  $n_v$  が増加することを反映し、結晶の格子定数は Ge 濃度に比例して減少し、それにもなってヤング率が増加、すなわち化学結合の強化が見取れる。Fig.2 には窒素欠損導入により結晶のヤング率が上昇することをも示している。窒素欠損の生成は単位体積当たりの Mn-N 結合数を減少させるが、それを上回る  $n_v$  上昇の効果が、ヤング率の上昇の原因にな

っているものと推察される。(1)- 項に示す水素のインターカレーションおよびその Rydberg 状態の実現には、格子間水素導入とその膨張のため、ゲスト物質内の金属イオンケージが elastic である必要があり、その程度は化学結合強度に逆比例するものと予想され、事実 Ge の導入で結晶が硬くなると水素導入によるバンドギャップの値が低エネルギーにシフトする。

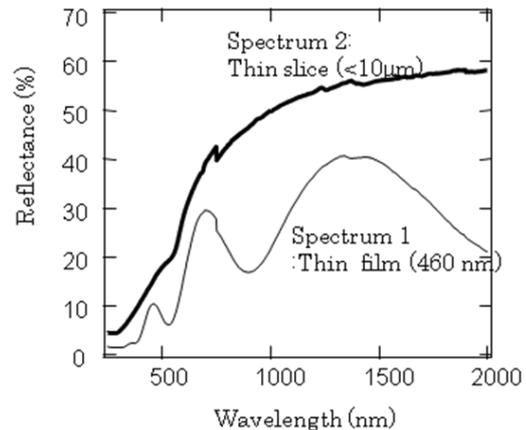


**Fig.2** The effect of Ge substitution and nitrogen deficiency introduction the Young's modulus of Mn<sub>3</sub>Cu<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>N<sub>1-d</sub> ceramics.

(1)- Antiperovskite Manganese Nitride における水素吸蔵

結晶化学的な考察により、ゲストの原子を安定に取り込める構造として、Fig.1 の Antiperovskite 構造 (Mn<sub>3</sub>AN) に着目した。Antiperovskite の B サイトは電子供与性の強いアルカリ土類金属や遷移金属のなかでも電気陰性度の小さい Mn などが許容される。本研究では Mn を主成分とする金属導電性の Antiperovskite 型窒化物として、Mn<sub>3</sub>CuN, Mn<sub>3</sub>GeN およびそれらの混晶系 (Mn<sub>3</sub>Cu<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>N) に対する水素のインターカレーションを試みた。この構造は単位胞の稜線の中点に Mn 4 個 (A=Cu, or Ge) 2 個で囲われた八面体空間が存在するため、電気陰性度の大きい (すなわちアニオンになり易い) 元素ならこのサイトに安定して存在しうる。Mn<sub>3</sub>CuN の構成元素の Pauling の電気陰性度は Mn:1.5, Cu:1.9, N:3.0 であるから水素原子における電気陰性度は 2.20 であることを考慮すると、Cu, Mn で囲まれた空間にもし H が存在できるとすると、s 電子を余計に持つヒドライドイオン (H<sup>-</sup>) であり、2s 励起状態電子は 10 eV 以上の巨大エネルギーを有することが期待できる。Mn<sub>3</sub>CuN への水素のインターカレーションは、□水素気流中での熱処理、□DC 高電界下での水素プラズマ処理により行なった。□の手法によると格子定数は著しく増大し水素の吸蔵はみとめられ、金属光沢の消失、電気伝導度の約 9 桁にわたる増大が認められた。しかしながら一部酸素の混入が認められ、純粋な水素侵入 Mn<sub>3</sub>Cu<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>N は

得られなかった。一方で、DC 水素プラズマ処理の条件を再液化することで行った結果、結晶の表面から 1 μm 以下の領域で結晶格子が著しく膨張し、金属状態からワイドギャップの半導体に転移することがわかった。Fig.3 に水素プラズマ処理を行った Mn<sub>3</sub>CuN<sub>0.5</sub> セラミックスの反射スペクトルを示す。Mn<sub>3</sub>CuN は近赤外~紫外域で Drude 反射により光を反射するが、水素を吸蔵することで表面から約 500 nm にわたって透明化し、スペクトルに干渉効果によるスペクトルの振動が観測された (Fig.3 の Spectrum 1)。試料を薄片化することで干渉縞は消失し (Spectrum 2)、反射率の立ち上がり波長より推定するバンドギャップが約 4.2 eV であった。バンドギャップはプラズマ条件および Ge 組成比 x に依存して E<sub>g</sub>=3.7~4.5 eV で制御が可能であった。導入した水素は H-(1s<sup>2</sup>) 状態であることが示唆されたが、光物性の評価からはその Rydberg 状態の確認には至らなかった。



**Fig.3** The reflectance spectra of hydrogen incorporated Mn<sub>3</sub>CuN<sub>0.5</sub> ceramics. Spectrum 1: Mn<sub>3</sub>CuN<sub>0.5</sub>H<sub>x</sub> thin layer over the Mn<sub>3</sub>CuN<sub>0.5</sub> polycrystalline. Spectrum 2: Thin slice of Mn<sub>3</sub>CuN<sub>0.5</sub> polycrystalline.

(2) 水素吸蔵物質による光電池構成のための半導体ヘテロ接合の設計・試作

光電池への応用を視野に、結晶学的考察から水素のインターカレーションの可能性が期待された Mn-Ba 含有のペロブスカイト酸化物 (La<sub>1-x</sub>Ba<sub>x</sub>)MnO<sub>3</sub> によるヘテロ接合素子を作製し、その電気特性、磁気特性の評価も併せて行った。フォトリソグラフィによるパターンニングと、エンチングの併用により、接合界面が雰囲気中に露出した構造のアレー型ヘテロ接合 (パターン幅: 10~25 μm) を作製し、界面への水素ガスインターカレーションを可能とした接合素子構造を確立した。また、Antiperovskite 同

様に電子供与性の強い、Mn,Ba で構成された (La<sub>1-x</sub>Ba<sub>x</sub>) MnO<sub>3</sub> と ZnO とのヘテロ接合素子の界面特性を評価した結果、電圧印加による界面抵抗スイッチング現象が見いだされ、その機構の推定を行ない、磁気相分離の可能性が示唆された。水素吸蔵能の確認と界面電場によるインターカレート水素の Rydberg 状態維持、安定化は今後の課題である。

## 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 5 件)

Composite engineering –Direct bonding of PET films by Plasma Irradiation, *Procedia Eng.*, 査読有, 171, 88-103 (2017), T.Endo, L.Reddy, H.Nishikawa, S.Kaneko, Y.Nakamura, and K.Endo

ESR Study of (La,Ba)MnO<sub>3</sub>/ZnO Nanostructure for Resistive Switching Device, *Nanoscale Res. Lett.*, 査読有, 12, 180 (2017), T.Polek, M.Semen'ko, T.Endo, Y.Nakamura, G.S.Lotey, and A.Tovstolytkin

Evolution of I-V Characteristics and Photo Effect of Heterojunction LBMO/ZnO Prepared by IBS, *Solid State Phenomena*, 査読有, 230, 19-27 (2015) T.Mori, M.Yokura, M.Matsui, S.L.Reddy, R.Philip, R.John, H.Nishikawa, N.Iwata, Y.Nakamura, S.Kaneko, and T.Endo

Bonding Effect of Plasma-irradiated PET Films can be Preserved after Soaking in Various Liquid Reagents, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, 53, 05FB21 (2014) M.Yokura, K.Uehara, K.Hanada, Y.Nakamura, H.Nishikawa, T.Tsuchiya, S.L.Reddy, R.Philip, Y. Izumi, S.Tomita T. Endo

Photo-assisted VOC Sensing Sensing by p-NiO/n-ZnO Transparent Heterojunction Sensor Element, *Sensors and Actuators B*, 査読有, 187, 578-85 (2013) Y.Nakamura, Y.Ishikura, Y.Morita, H.Takagi, and S.Fujitsu,

[学会発表](計 7 件)

Plasma Enhanced Bonding of Polymer Plastic Films, T.Endo, L.Reddy S.Kaneko, H.Nishikawa, Y.Nakamura, P.Mele, K.Endo, Z.Zhou, and D.Hui, 25<sup>th</sup> International Conference of Composites and Nano-Engineerings (Invited), Sanya (China), 2016.7

Exotic Properties derived from Lattice Defects in the Antiperovskite Nitride, Y.Nakamura, K.Takenaka, A.Kishimoto, and H.Takagi, The 16<sup>th</sup> Japan-Korea-Taiwan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems, 東京大学 (東京都・文京区) 2016.2

Detection and Recognition of Single Molecule by an Oxide Semiconductor Tunnel Junction,

Y.Nakamura and M.Miyayama, 11<sup>th</sup> International Symposium for Energy and Environmental Applications, Vancouver (Canada), 2015.6

Defects Induced Hardening and Toughening in Mn<sub>3</sub>Cu<sub>1-x</sub>GexN Metallic Perovskite, Y.Nakamura, K.Takenaka, A.Kishimoto, and H.Takagi, The 15<sup>th</sup> Japan-Korea-Taiwan Workshop on Strongly Correlated Electron Systems, Hsinchu (Taiwan), 2015.3

Plasma Irradiation Technology for Direct Bonding of Various Plastic Films, M.Yokura, K.Hanada, K.Uehara, H.Nishikawa, Y.Nakamura, S.L.Reddy, M.Nagashima, and T.Endo, 応用物理学会 2014 学術講演会 “Flexible Electronics Symposium”(invited), 青山学院大学 (神奈川県・相模原市), 2014.3

M.Yokura, K.Uehara, K.Hanada, Y.Nakamura, H.Nishikawa, T.Tsuchiya, S.T.Reddy, R.Philip, And T.Endo, 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Symposium A, 同志社大学 (京都府・京田辺市), 2013.9

Interface Resistance Switching Phenomena in the Transition Metal Oxide Junction Devices, Y.Nakamura, Y.Okabe, R.Matsumoto, T.Nemoto, K.Fijiwara, and H.Takagi, 22<sup>th</sup> International Conference of Composites and Nano-Engineerings (Invited), Tenerife (Spain), 2013.7

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

中村 吉伸 (NAKAMURA, Yoshinobu)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号 : 30198254

(2)研究協力者

與倉 三好 (YOKURA, Miyoshi)  
元三重大学・大学院工学研究科・研究員

遠藤 民生 (ENDO, Tamio)  
さがみはら表面技術研究所・客員研究員

S. L. Reddy  
S.V.D. College, India ・教授

A. Tovstolytkin  
Institute of Magnetism, Ukraine ・研究員