

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：71301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360295

研究課題名(和文) ワンステップ成膜法による量子化複合構造薄膜創製と光電機能発現

研究課題名(英文) Development of composite thin films exhibiting quantum confinement effects prepared by one-step synthesis method and their photovoltaic characteristic

研究代表者

阿部 世嗣 (Seishi, Abe)

公益財団法人電磁材料研究所・光材料グループ・主席研究員

研究者番号：20202666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、独自のワンステップ成膜法を用いた複合構造薄膜の創製と光電機能の発現を目的とした。その結果、15nmサイズのInSbナノ粒子が、TiO₂とIn₂O₃の混合相マトリクス中に分散したナノ複合構造薄膜を見出した。また、PbTeナノ粒子がZnTeマトリクス中に分散したナノ複合構造薄膜を見出し、両者はヘテロ界面において明瞭に相分離することを見出した。さらに、p型Si基板上にワンステップ成膜したGe添加TiO₂複合構造薄膜は、300-1200nmの波長領域において光電流を生成する。したがって、ワンステップ成膜法により作製された薄膜はナノ複合構造を形成し、光電特性を発現することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This research project focuses on developing a new nanocomposite thin film by one-step synthesis method and exhibiting its photovoltaic characteristic. Specifically, we have found a nanocomposite thin film with isolated InSb nanocrystals with a grain size of 15nm embedded in phase-mixture matrix containing TiO₂ and In₂O₃. PbTe-added ZnTe thin film forms nanocomposite with PbTe nanoparticles embedded in ZnTe matrix, phase-separating at a hetero-interface between the both. Furthermore, Ge-added TiO₂ thin film deposited on a p-type Si substrate produces photocurrent at wavelength ranges of 300nm to 1200nm. It is therefore found that the thin films prepared by one-step synthesis method form nanocomposite structure and exhibits photovoltaic characteristic.

研究分野：工学

キーワード：複合構造薄膜 量子サイズ効果 太陽電池 ナノ粒子 無機

1. 研究開始当初の背景

近年、石油資源の価格高騰や地球温暖化への懸念、さらに震災に伴う放射能災害から、自然エネルギーを利用した発電に注目が集まっている。特に、太陽光を利用した発電は Si 系材料において既に広く利用され、変換効率は 14.5% (アモルファス Si)、16% (薄膜多結晶 Si) および 24.7% (単結晶 Si) となっている。この Si 系太陽電池の理論変換効率は 26.5% であることから、技術的にはほぼ理論限界に達しており、一層の高効率化は困難である。そこで、次世代太陽電池用材料として、1. 化合物半導体系、2. 有機色素系、3. 半導体ナノ粒子系の材料が研究されている。すなわち、化合物半導体系材料では、GaAs において比較的高い 26% の変換効率が得られているが、Si と比較して高コストであることから、耐放射線性能を生かした宇宙空間での利用など特殊用途に限られる。また、有機色素増感型は低コスト化が可能であるが、変換効率は未だ 11% であり Si よりも劣る。そこで、本研究では、半導体ナノ粒子系薄膜材料に着目した。この材料は、半導体ナノ粒子とマトリクス相から構成され、“量子ドット増感型材料”と呼ばれている。その特長として、半導体ナノ粒子サイズを調整することにより、太陽光スペクトルの最大照射エネルギーを効率的に光吸収できる。光吸収した 1 個の光子に対して 2 つの電子-正孔対を生成させることが可能である、等が挙げられる。その結果、他の材料系を凌駕する 50% 超の高い変換効率が理論予測されている。

従来、量子ドット増感型材料研究として、物理的成膜法による半導体ナノ粒子自己組織成長材料、化学的成膜法による半導体ナノ粒子担持材料が報告されている。前者は、基板(あるいは下地層)とナノ粒子用半導体の格子ひずみを利用したナノ粒子成長法で、比較的均一なサイズのナノ粒子を作製することができる。しかし、基板として GaAs 等の化合物半導体基板を用いることから、前述の化合物半導体材料系と同様に高コストであることが課題である。一方、化学的成膜法は、マトリクス層である TiO_2 電極を溶液中に浸漬することにより、簡便に半導体ナノ粒子を担持することができる。しかし、素子に電解液を用いることから液漏れが懸念されること、および光触媒特性を有する TiO_2 が太陽光を吸収してナノ粒子用半導体を分解すること等が課題となっている。

これらのことから、当研究グループでは、量子ドット増感型次世代太陽電池の超高効率の変換効率を有しつつ、安価ガラス基板等に成膜され、大気中で長期間安定して稼働する材料の開発研究を行っている。

その結果、先の研究課題において、RF スパッタリング法を用いた、生成熱離散型の材料設計に基づく酸化物系複合材料の合成を中心に推進し、 $\text{Ge/Nb}_2\text{O}_5$ 材料等を新たに見出した。他方、比較的高い平衡蒸気圧を有

する化合物半導体系複合材料合成の予備実験を開始した結果、非固溶型の材料設計に基づく材料の組み合わせにおいて、明瞭な相分離複合構造を形成することが明らかになった。したがって、材料の蒸気圧に応じて生成熱離散型および非固溶型の材料設計を用いることにより、複合構造を一括して成膜する極めて簡便な方法として、ワンステップ物理合成法が確立し、より広範な材料合成が可能になった。

2. 研究の目的

そこで、本研究課題では、先の研究課題を進展させ、独自のワンステップ物理合成法を用いた固体量子ドット増感型太陽電池用材料に着目し、酸化物、窒化物およびセレン化物等広範な材料合成を行う。特に、太陽光スペクトルの光電変換に優れるエネルギー 1.4eV 付近の光吸収性を有する自己組織化半導体ナノ粒子と紫外光吸収性マトリクスから構成される、広帯域光吸収型複合構造薄膜材料を光電変換層とするヘテロ構造化と光電変換機能発現を目的とする。

3. 研究の方法

成膜法として、高周波スパッタリング装置およびホットウォールデポジション(HWD)装置を用いた。この際、前者では、マトリクス用材料の 4 インチ TiO_2 ターゲット上に $5 \times 5 \text{mm}^2$ サイズの InSb または Ge チップを配置した複合ターゲットとした。後者では、市販の PbTe および ZnTe 固体蒸発源を用いた。基板として、Corning 社製ガラス板を用いた。

作製された薄膜について、構造評価を X 線回折(XRD)法および高分解能透過型電子顕微鏡により行い、光学的評価を紫外-可視-赤外分光光度計により行い、光電的評価を光量一定型分光感度測定装置により行った。この内、分光感度測定装置の拡張として、光量一定型制御装置およびハロゲンランプを本研究課題において購入した。他の装置については現有設備である。

4. 研究成果

ワンステップ成膜法では、比較的蒸気圧の低い酸化物から比較的蒸気圧の高いカルコゲナイド化合物まで広範な複合構造薄膜の合成を行った。この際、比較的蒸気圧の低い酸化物は RF スパッタリング法により合成し、比較的蒸気圧の高いカルコゲナイドはホットウォールデポジション法により合成を行った。

(1) InSb 添加 TiO_2 薄膜

元素半導体、または化合物半導体を酸化物マトリクス中に分散させた複合構造薄膜を作製する場合、RF スパッタリング法が用いられる。この際、成膜および熱処理を通じて、ナノ粒子とマトリクスは相分離することが不可欠であり、半導体の酸化物形成に要する

反応の自由エネルギーは、 TiO_2 のそれよりも小さいことが望まれる。実際、 InSb の酸化物である InSbO_4 の反応の自由エネルギーの値は TiO_2 のそれよりも小さいことから、 InSb は TiO_2 マトリクス中で安定的に存在することが可能である。

図 1 は、アルゴン雰囲気中において成膜された InSb 添加 TiO_2 薄膜の成膜状態における光透過スペクトルを示す。各 InSb 濃度はターゲット上に配置したチップ数を変化させることにより制御を行った。0at.%(In+Sb)では、 TiO_2 の光吸収端が約 400nm において観測される。また、光透過率は紫外から近赤外に亘って比較的低い光透過率が観測される。この低透過率は TiO_2 の酸素欠損に起因すると考えられる。1at.% 添加では同様なスペクトルが観測されるが、5at.% 以上の添加量では透過率が改善していることがわかる。これは、 InSb 添加により酸素と Ti の組成比が 1.94(0at.%) から 2 以上の値に上昇したことに起因すると考えられる。すなわち、 InSb 添加により TiO_2 の組成比が改善することを示唆する。さらに、光吸収端は InSb 添加量の増加と共に長波長側にシフトすることがわかる。

図 2 は、 InSb 添加 TiO_2 薄膜の XRD パターンを示す。この際、薄膜はアルゴン雰囲気中で成膜され、その後、723K で熱処理を施した。 In および Sb 濃度は熱処理により減少し、例えば添加濃度 25at.% は 18at.% に減少する。XRD パターン中では、三元および四元化合物に起因する回折ピークは観測されなかった。添加濃度が 0 および 1at.% では、 TiO_2 のルチル構造のみが観測される。5at.% では、これに加えて Sb に起因するピークが観測され、8at.% では In_2O_3 に起因するピークも観測される。さらに、12at.% 添加では Sb のピークが消失する。実験では、二種類の化合物 InSb および TiO_2 がターゲットとして用いられ、 Sb や In_2O_3 は用いていない。さらに、広帯域に亘って比較的高い光透過率を示すことから、5at.% 以上の比較的高添加濃度では、試料中の残留 In および Sb は無視できるほど小さいと考えられる。

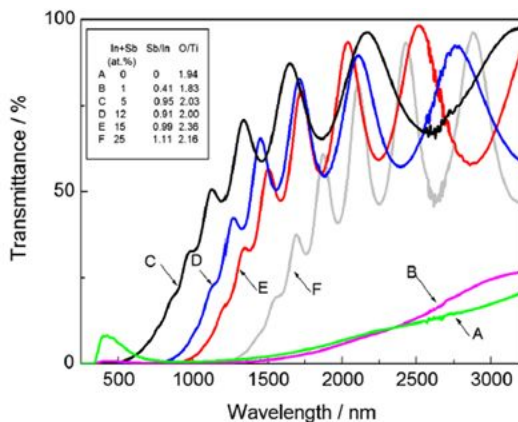


図 1. InSb 添加 TiO_2 薄膜の光透過スペクトル

このように InSb の添加量に応じて出現相をまとめた結果を図 3 に示す。なお、熱処理温度は 723K とし、 InSb を添加した際の TiO_2 の化学量論的組成を点線により示す。 TiO_2 単相は、比較的低 InSb 濃度において出現する。特に、 InSb 無添加では酸素欠損が生じていることがわかる。この酸素欠損が図 1 における低光透過率の原因であると考えられる。他方、 InSb 添加では酸素過剰な組成を生じる傾向を有することがわかる。この結果は図 1 における光透過率の改善の結果と良好に一致する。 InSb は 8at.% において出現し、12at.% では In_2O_3 も出現する。成膜状態では InSb はほぼ化学量論的組成であり、 Sb と In の比が 0.9 から 1.2 の間で変化する。これに対し、熱処理により Sb の昇華が生じ、図中、緑色、赤色および黄色の順に組成比が減少することがわかる。このような Sb 欠損は In_2O_3 が出現する組成領域のみならず、 Sb 相が出現する組成領域においても生じる。すなわち、比較的高い酸素濃度の場合、 Sb 結晶であっても Sb 相が出現する、これは、 In-Sb-O 系状態図から得られる知見と良好に一致する。残留 Sb は光透過率を低下させるとから混入を避けることが望ましい。それゆえ、酸素濃度を比較的低くすることにより Sb 相の混入を避けることができる。本研究では、酸化物として TiO_2 および In_2O_3 の混合相を形成する。しかしながら、 TiO_2 および In_2O_3 混合相の移動度は純 TiO_2 のそれよりも大きいことが報告されている。したがって、 In_2O_3 相の混入は本研究の目的に対し有効であると考えられる。

図 4a は、 InSb 添加 TiO_2 薄膜の典型的な高分解能電子顕微鏡観察像を示す。ここで、 InSb 濃度は 18at.% であり、酸化物として TiO_2 および In_2O_3 を含む。図より、若干暗いコントラストの 15nm サイズの粒状のナノ結晶が観測される。破線で囲んだ領域を図 4b に示す。ナノ結晶において明瞭な格子縞が観測される。図 4c は FFT 解析結果を示し、 InSb で指数付される。ここで、FFT 解析は図 4b における円で囲んだ領域において行った。これより、ラベル A, B および C は、それぞれ InSb の格子面 (110), (1-10) および (200) に対応す

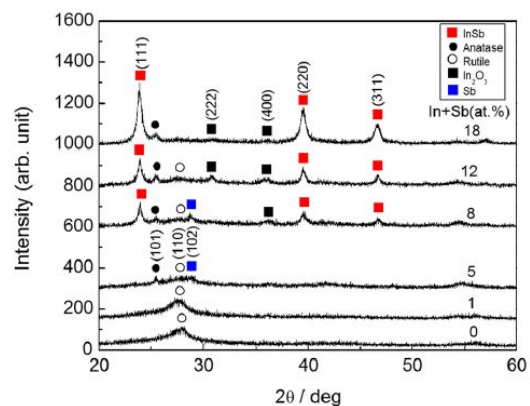


図 2. InSb 添加 TiO_2 薄膜の XRD パターン

る．すなわち，観察されたナノ結晶は InSb であることがわかる．したがって，InSb 添加 TiO₂ 薄膜は InSb ナノ結晶が TiO₂ と In₂O₃ 混合層マトリクス中に分散したナノ複合構造を形成することがわかる．

(2) PbTe 添加 ZnTe 薄膜

PbTe と ZnTe の組み合わせによる複合薄膜を作製する場合，ホットウォールデポジション法が用いられる．当該手法は抵抗加熱による昇華を通じて行われることから，成膜中の基板は放射熱にさらされる．このため，ナノ粒子とマトリクスの相分離を実現するためには，非固溶型の材料の組み合わせを用いることが不可欠である．実際，バルクにおける状態図では，1160K 以下の温度において相分離することが報告されている．したがって，添加された PbTe は ZnTe 中において安定的に存在することが可能である．薄膜は，PbTe および ZnTe バルク結晶を蒸発源とし，それぞれを独立の温度に制御することにより同時に昇華させた．

図5は作製された薄膜の透過型電子顕微鏡観察像を示す．ここで，添加した PbTe 濃度は 3.6at.% であった．図5aより，若干黒色のナノ粒子が膜中に分散していることがわかる．点線で囲んだナノ粒子の拡大図を図中に示す．ナノ粒子は多角形状のファセットを形成する．点線で囲んだヘテロ界面の高分解能透過型電子顕微鏡観察像を図5bに示す．図より，ナノ粒子相およびマトリクス相共に明瞭な格子縞が観測され，両相共に結晶化していることがわかる．また，ファセット面に形成されたヘテロ界面が明瞭に観察され，ナノ粒子相およびマトリクス相は固溶体を形成することなく相分離する．また，両相の高速フーリエ変換(FFT)解析から，比較的黒色の相は PbTe であり，比較的明色の相は ZnTe であることが確認された．したがって，ワンステップ成膜した PbTe 添加 ZnTe 薄膜は明瞭に相分離する複合構造を形成する．

(3) Ge 添加 TiO₂ 薄膜の光電特性

酸化物からカルコゲナイドに亘る広帯域の蒸気圧を有する物質を用いたナノ複合構造薄膜をワンステップで合成することが可能であることを明らかにした．次に，このように作製した薄膜の光電特性評価を行った．材料の組み合わせとして Ge 添加 TiO₂ 薄膜 (Ge/ TiO₂) を用いた．また，基板として，p 型 Si(100) を用い，成膜法として RF スパッタリング法を用いた．また，Ge 添加濃度は 16at.% とし，873K で 1 時間，真空中で熱処理を施すことにより Ge および TiO₂ 相を結晶化させた．透過型電子顕微鏡観察において添加された Ge はナノ粒子を形成することが確認された．薄膜は TiO₂ バッファー層およびキャップ層で Ge/ TiO₂ ナノ複合構造薄膜を挟む構造とし，最表面に ITO 透明電極を成膜して光電特性評価用の試料とした．図7に規

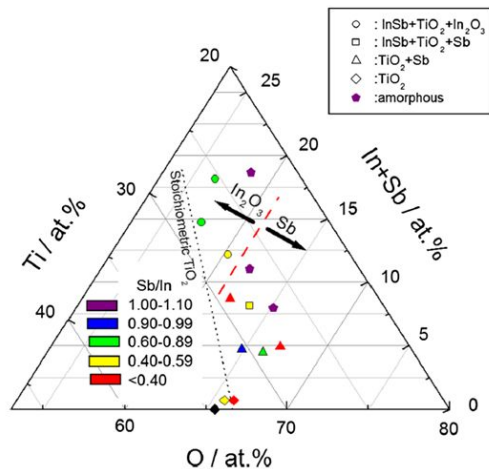


図3. InSb 添加 TiO₂ 薄膜の組成図

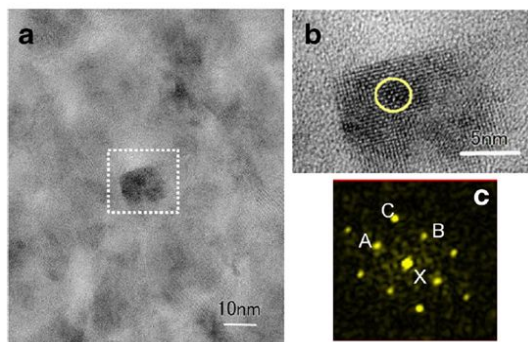


図4. InSb 添加 TiO₂ 薄膜の透過型電子顕微鏡観察像

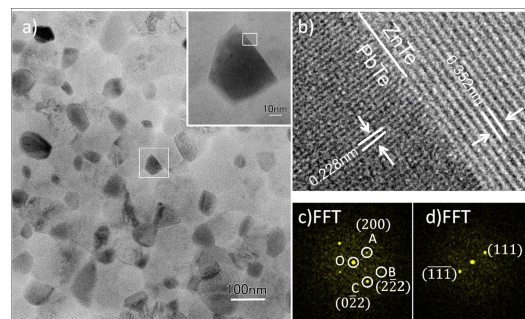


図5. PbTe 添加 ZnTe 薄膜の透過電子顕微鏡観察像

格化された光電流スペクトルを示す．スペクトルはブロードであり，Si 基板および当該ナノ複合構造からの寄与により構成されていると考えられる．すなわち，比較的長波長側の光電流は禁制帯幅の比較的小さい Si からの寄与，および比較的短波長側の光電流は Ge/ TiO₂ ナノ複合構造薄膜からの寄与であると考えられる．したがって，ワンステップ成膜された Ge/ TiO₂ ナノ複合構造薄膜は光電特性を発現することが確認された．

(4) 鉄酸化物薄膜

ありふれた元素である鉄を用いた酸化物による機能性材料は，低コスト化および環境負荷の観点から重要である．特に，可視光領域に光吸収端を有するヘマタイト ($\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

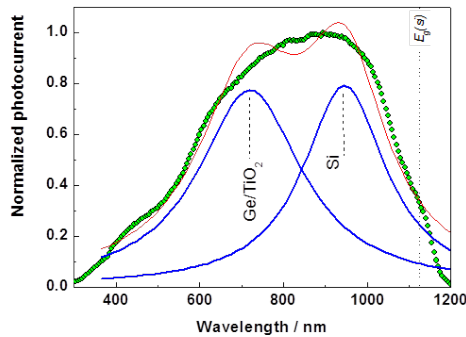


図 6. Ge 添加 TiO₂ 薄膜の光電流スペクトル

やマグヘマイト (α -Fe₂O₃) は太陽電池用材料として候補材料である。マグヘマイトは準安定相であることから、従来、酸化加熱を用いた合成が一般的であった、これに対し、本研究では、出発相としてヘマタイトに微量の Mg 片を配置した複合ターゲットを用いてスパッタリング成膜することにより、純アルゴン雰囲気中で、かつ、水冷基板にマグヘマイトをワンステップ成膜することが可能であることを見出した。

(5) まとめと今後の課題

本研究課題では、ワンステップ成膜法により、InSb 添加 TiO₂ 薄膜および PbTe 添加 ZnTe 薄膜を量子ドット増感型次世代太陽電池用材料として新規に提案し、また、Ge 添加 TiO₂ 薄膜の光電特性評価を行った。成膜法として、酸化物をマトリクスとする際は RF スパッタリング法により成膜し、テルル化物をマトリクスとする際は HWD 法により成膜した。すなわち、材料の蒸気圧に応じて異なる成膜法と材料設計によりワンステップでナノ複合構造薄膜を作製可能であることを明らかにした。次に、p 型 Si 基板にナノ複合構造薄膜を作製し、ヘテロ構造化による光電流を発現することを明らかにした。

今後の課題として、光電変換効率の向上およびガラス基板上へのヘテロ構造化による光電機能発現が挙げられる。すなわち、作製されたヘテロ構造の光電変換特性は従来の太陽電池と比較して低い値であり、熱処理温度の最適化や欠陥制御等の高品質化が必要である。また、低コスト化を考慮するとガラス基板を用いた光電機能の発現が望ましい。

本研究で用いた独自のワンステップ成膜法は、用いる基板に制約がなく、かつ、ワンステップでナノ複合構造薄膜を作製できることから太陽電池の低コスト化に寄与すると考えられる。

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 7 件)

M. Watanabe and S. Abe, J. Nanoscience and Nanotechnology (in press), Out-of-plane magnetic moment and lattice distortion in sputtered Ge added Fe₃O₄ thin film. 査読有

Y. Oba, S. Abe, M. Ohnuma, N. Sato, and M. Sugiyama, J. Physics D: Appl. Phys. 47 (2014) 435102 1-6, Temperature dependence of nanostructure in PbSe-ZnSe composite thin film. 査読有,

DOI: 10.1088/0022-3727/47/43/435102

S. Abe, M. Watanabe, Materials Research Express 1(2014)026108 1-8, Mg-induced phase-transformation from hematite to maghemite. 査読有,

DOI: 10.1088/2053-1591/1/2/026108.

S. Abe, Y. Adachi, K. Matsuda, and M. Nose, Thin Solid Films 562(2014) 104-108, Single-phase anatase structure and dominant metallic Ge in Fe/ TiO₂ multi-layer films using a differential pumping co-sputtering system. 査読有,

DOI: 10.1016/j.tsf.2014.03.080.

S. Abe, Nanoscale Research Letters 8(2013)2691 1-6, InSb-added TiO₂ nanocomposite thin films by RF sputtering. 査読有, DOI: 10.1186/1556-276X-8-269.

S. Abe, Nanoscale Research Letters 7(2012) 341 1-6, Formation of Nb₂O₅ matrix and vis-NIR absorption in Nb-Ge-O thin films. DOI: 10.1186/1556-276X-7-341, 査読有.

S. Abe, D.H. Ping, S. Nakamura, M. Ohnuma, and S. Ohnuma, Journal of Nanoscience and Nanotechnology 12 (2012) 5087-5090, Metal-Doped Magnetite Thin Films, 査読有, DOI: 10.1166/jnn.2012.4900.

〔学会発表〕(計 17 件)

阿部世嗣, 星信夫、日本金属学会春期大会、ワンステップ成膜による相分離性 PbTe-ZnTe 複相薄膜の作製、2015 年 3 月 18 日、東京大学(東京都)。

後藤慎弥, 足立佳亮, 阿部世嗣, 松田健二, 野瀬正照, 日本金属学会春期大会、複合ターゲットを用いて作製した TiO₂ 膜の構造に及ぼす製膜条件の影響、2015 年 3 月 18 日 東京大学(東京都)。

阿部世嗣、日本金属学会秋期大会、基調講演、複相薄膜のワンステップ成膜：機能発現と選択生成、2014 年 9 月 26 日 名古屋大学(愛知県)。

足立佳亮, 阿部世嗣, 松田健二, 野瀬正照, 日本金属学会秋期大会、Ge/ TiO₂ ナノ複相構造膜の微細組織観察、2014 年 9 月 26 日、名古屋大学(愛知県)。

後藤慎弥, 足立佳亮, 阿部世嗣, 松田健二, 野瀬正照, 日本金属学会秋期大会, 反

応性スパッタリング法により作製した TiO₂ 膜の構造と特性に及ぼすターゲット材料の影響, 2014 年 9 月 26 日, 名古屋大学(愛知県).

阿部世嗣, 渡邊雅人, 星信夫, 日本金属学会春期大会, Mg 添加によるマグヘマイト薄膜の作製, 2014 年 3 月 22 日, 東京工業大学(東京都).

足立佳亮, 佐藤誉将, 阿部世嗣, 松田健二, 野瀬正照, 日本金属学会春期大会, Ge/ TiO₂ ナノ積層膜の微細組織観察, 2014 年 3 月 22 日, 東京工業大学(東京都).

大場洋次郎, 杉山正明, 阿部世嗣, 大沼正人, 日本金属学会春期大会, X 線小角散乱法による PbSe/ZnSe ナノ複相構造薄膜中のナノ構造の解析, 2014 年 3 月 22 日, 東京工業大学(東京都).

阿部世嗣, 星信夫, 日本金属学会秋期大会, PbTe および ZnSe ソース HWD 法による複相構造薄膜のワンステップ成膜, 2013 年 9 月 19 日, 金沢大学(石川県).

足立佳亮, 佐藤誉将, 阿部世嗣, 松田健二, 野瀬正照, 日本金属学会秋期大会, 差動型同時成膜法により作製した Ge/ TiO₂ 複相構造膜の微細構造, 2014 年 3 月 22 日, 東京工業大学(東京都).

阿部世嗣, 星信夫, 日本金属学会春期大会, Ge/ TiO₂ 複相構造薄膜の光電特性, 2013 年 3 月 29 日, 東京理科大学(東京都).

足立佳亮, 佐藤誉将, 阿部世嗣, 松田健二, 野瀬正照, 日本金属学会春期大会, 差動型同時成膜法による Ge/ TiO₂ 複相構造薄膜の作製, 2013 年 3 月 29 日, 東京理科大学(東京都).

足立佳亮, 佐藤誉将, 阿部世嗣, 松田健二, 野瀬正照, 日本金属学会北陸信越支部講演会, 差動型同時成膜法により作製した Ge/ TiO₂ 複相構造薄膜の光吸収特性, 2012 年 12 月 8 日, 福井工業大学(福井県).

阿部世嗣, 星信夫, 佐藤幸博, 日本金属学会秋期大会, スパッタリング法による可視光吸収性 InSb 添加 TiO₂ 薄膜の作製, 2012 年 9 月 19 日, 愛媛大学(愛媛県).

阿部世嗣, 星信夫, 佐藤幸博, 日本金属学会秋期大会, PbSe/ZnSe ナノ複相構造薄膜の光電特性

Seishi Abe, Energy Materials Nanotechnology (EMN) fall meeting 2013, Orlando, USA, Dec./9/2014, Physical deposition of nanocomposite thin film containing semiconductor nanocrystals (invited).

Seishi Abe, 5th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma 2013), Jan./29/2013, Nagoya University, Japan.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 2 件)

名称: 鉄酸化物薄膜およびその製造方法

発明者: 阿部世嗣

権利者: (公財)電磁材料研究所

種類: 特許権

番号: 特願 2014-025533

出願年月日: 2014 年 2 月 13 日

国内外の別: 国内

名称: 複相構造薄膜材料

発明者: 阿部世嗣

権利者: (公財)電磁材料研究所

種類: 特許権

番号: 特願 2012-188539

出願年月日: 2012 年 8 月 29 日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.denjiken.or.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 世嗣 (ABE SEISHI)

公益財団法人電磁材料研究所・光材料グループ・主席研究員

研究者番号: 20202666

(2) 研究分担者

大場 洋次郎 (OBA YOJIRO)

国立大学法人京都大学・原子炉実験所・助教

研究者番号: 60566793

平 徳海 (PING DE HAI)

独立行政法人物質・材料研究機構・構造機能

融合材料グループ・主任研究員

研究者番号: 80354207