

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560290

研究課題名（和文）光照射エッチングによる平坦、大面積多孔質シリコン膜の作製とデバイスへの応用

研究課題名（英文）Synthesis of flat and large-area porous silicon films by photoetching and their application to devices

研究代表者

安達 定雄 (ADACHI SADAŌ)

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10202631

研究成果の概要（和文）：

本研究によって得られた成果をまとめると、(1) Xe光照射フッ酸(HF)/KIO₃混合液中で作製した多孔質Si (PSi)は、強い黄色発光する。(2) Xe光照射HF/I₂混合液中で作製したPSiで、注入型タイプのPSi発光デバイスを作製した。(3) PSiに各種波長の光を照射することでPSiに光酸化が起きることを明らかにした。(4) HF/MnO₂混合液中で作製した陽極化成PSiは、室温で緑色発光することを明らかにした。(5) PSiの発光機構として、量子閉込め及び音子が関与した機構の存在を明らかにした。(6) Si基板や珪素ガラスとHF/KMnO₄混合液から、K₂SiF₆:Mn⁴⁺赤色蛍光体の作製に成功した。(7) Si基板とHF/K₂Cr₂O₇混合液から、新しいK₂SiF₆:Mn²⁺黄色蛍光体を作製した。(8) 垂直に配向したSiナノワイヤ作製のための新しい化学エッチング液Ag₂CrO₄/HF/H₂Oを開発した。

研究成果の概要（英文）：

The main results obtained in this study were:

(1) Strong yellowish emission was observed when porous silicon (PSi) is formed under Xe light illumination and in the HF/KIO₃ mixed solution. (2) Injection-type light-emitting porous silicon diode was obtained by using PSi layer synthesized in an HF/I₂ mixed solution under Xe light illumination. (3) The photo-oxidation occurs under light illumination at various wavelengths. (4) The anodic PSi layers formed in HF/MnO₂ mixed solution showed light emission in the green spectral region at room temperature. (5) There are two different emission mechanisms in the PSi layers that are based on the quantum-confinement effect and the phonon-related effect. (6) K₂SiF₆:Mn⁴⁺ red phosphors were synthesized from Si wafer and silica glasses in HF/KMnO₄ mixed solutions. (7) K₂SiF₆:Mn²⁺ yellow phosphor was synthesized from Si wafer in HF/K₂Cr₂O₇ mixed solution. (8) A Ag₂CrO₄/HF/H₂O etchant system was developed for fabricating vertically well-aligned Si nanowire arrays.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：材料科学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：多孔質 Si、陽極化成、光エッチング、蛍光体、LED、ポーラス

1. 研究開始当初の背景

多孔質 Si は、20 年ほど前の可視発光の観測以来、さまざまな分野への応用に興味をもたれている。しかし、当時の多孔質 Si の作製法は、フッ酸電解液中に浸漬させた Pt 電極を一方の電極、Si 基板の裏面を他方の電極として、通電することで作製する方法、いわゆる陽極化成法が研究の主流であった。この方法での長所として、①ポーラス膜の性質の制御が電氣的（電流密度）に簡単にできる、②厚いポーラス膜（~十数 μm ）の作製が容易、が上げられる。一方、短所として、①試料表面の平坦性が悪い（表面が荒れる）②100 cm^2 以上の大面積試料では、面内の均一性が悪い（試料表面の電界分布が不均一のため）、③ Si の裏面に電極（通常は Al 電極）を作る必要があり、Pt 電極や直流電源も必要、④絶縁基板上の Si 表面でのポーラス膜の形成が不可能等、が上げられる。すなわち、陽極化成法は、特に長所②のごとく厚いポーラス Si 膜の作製が容易であるが、薄い均一な膜の作製が困難という短所にもなっていた。

また、発光波長に関して言えば、多孔質 Si からの発光は、半値幅が約 0.5 eV の非常にブロードな赤色、橙色発光がほとんど全てであった。

さらに、使われていた電解液としては、フッ酸あるいはフッ酸/アルコール混液だけと言っても過言ではなかった。

2. 研究の目的

陽極化成やステインエッチングとは異なるポーラス Si の形成方法として、フッ酸を用いた光照射エッチング法がある。この方法は、外部電源の代わりに Si 表面にレーザー光を照射し、これによって生成される正孔が化学エッチングを促進させることで、表面にポーラス Si を形成する方法である。この方法だと外部電源や裏面電極等が不用になる。しかし、レーザーの強度分布を反映して、不均一なポーラス膜が生成され、広い面積のポーラス膜が望めない。そこで本研究では、上記欠点を無くすべく、光照射フォトエッチング法により

(1) 極めて平坦な表面を有するポーラス Si の実現と膜質のコントロール

(2) 光照射による大面積かつ均一な膜質分布を有するポーラス Si の作製

(3) ガラス基板上のポーラス Si 膜からの可視&紫外発光

(4) 平坦かつ極めて薄いポーラス Si 膜を用いた複合デバイスの試作

さらに、K 系酸化剤添加フッ酸水溶液によるポーラス Si の作製過程で、赤色蛍光体の作製が可能であることを見出したので、この研究にも傾注する。具体的には

(1) 赤色蛍光体の生成機構と物性解明

(2) CO₂削減を目指した赤色蛍光体利用による白色発光ダイオードの実用化のための研究

3. 研究の方法

(1) ポーラス Si の膜厚制御と反応機構

HF 水溶液に適切な酸化剤を添加することで、光照射された表面が極めて短時間に、かつ非常に平坦な多孔質 Si (PSi) 膜が作製できる。本研究では、まず Si/電解液界面における電気化学反応の詳細な解明を試み、次に均一膜厚の PSi を目指した。このテーマに用いた評価手段は、フォトルミネッセンス (PL) や光電子分光解析 (XPS)、原子間力顕微鏡 (AFM) 観測などである。

(2) 光照射 PSi 膜の大面積化

均質で大面積なポーラス Si 研究のモチベーションは、大学研究者には学術的好奇心が大きい、企業サイトではフラットパネル光源など実用的に重要である。レーザー光照射による点状の PSi の作製例がある。ここでは、Xe ランプを光源とした光照射化学エッチング法で、大面積かつ均質な PSi 膜の作製を目指した。試料の評価手段は、先の (1) とほぼ同じである。

(3) 新機能 PSi の開発

PSi の発光スペクトルは、大体が約 2.0 eV の赤色で、半値幅も約 0.5 eV と非常にブロードである。このテーマでは、フッ酸に添加する酸化剤を種々試すことで、発光波長の短波長化だけでなく、新奇な発光体・蛍光体及び新奇構造体の作製を目指した。試料の評価手段としては、上記 (1)、(2) 以外に、発光励起スペクトルや電子顕微鏡観察、X 線回折 (XRD)、X 線励起スペクトル (XPS) などを用いた。

4. 研究成果

(1) 均質な PSi の作製と大面積化

図 1 に、今回作製した、Xe ランプ照射光エッチング装置を示す。Xe ランプからの光の熱成分を光フィルターで除去し、HF/酸化剤混合液の温度上昇を避けている。しかし、光フィルターが相当温度上昇し、頻繁に破損したため、これの冷却に苦心した。なお、Xe ランプは 150 W の出力である。

図 2 は、図 1 の装置を用い、HF/I₂ (ヨウ素) 混合液中で作製した PSi の発光スペクトルである。図中には Xe ランプではなく、He-Ne レーザ励起で作製した点状 PSi からの PL スペクトルも示してある。HF だけで作製した PSi の発光はピーク波長が 1.85 eV の赤色を呈するが、HF/I₂ 混合液で作製した PSi はオレンジ色で発光する。この方法により、最大 5 cm \times 5 cm の Si ウェファーで PSi を作製し、良好な

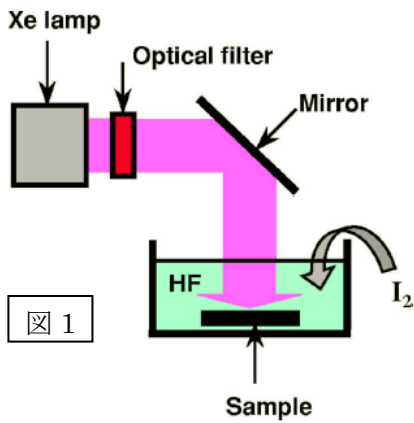


図 1

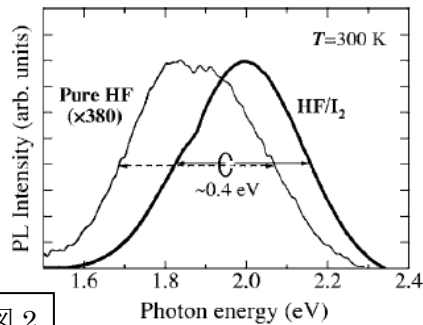


図 2

結果を得た。

強いレーザー光源を使わず、Xe ランプで PSi の作製が可能になるキープポイントは、酸化剤の添加による redox 電位の制御にある。図 3 には、この原理を模式的に示した。I₂ の添加により光照射で生成された正孔が Si/電解液界面に移動し、電気化学反応が効率的に起こることで、高品質の PSi が容易に作製可能となる。本研究では、I₂、H₂O₂、KIO₃、FeCl₃ などの酸化剤の違いの影響も、詳細に検討した。

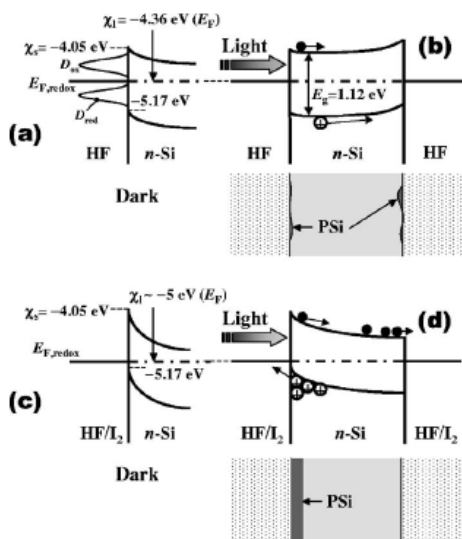


図 3

(2) PSi 発光の短波長化

HF に MnO₂ を添加した混合液で Si ウェハをステインエッチすることにより、緑色発光する PSi の作製に成功した。また、このような緑色発光する PSi 試料は、陽極化成法でより短時間に作製できることも発見した。図 4 は、電流をパラメータにして 40 分間陽極化成して作製した試料の緑色発光スペクトルである。本研究では、緑色発光 PSi 試料の空气中、アルコール中あるいは酸性溶液中での時間安定性が複雑に異なることも明らかにした。

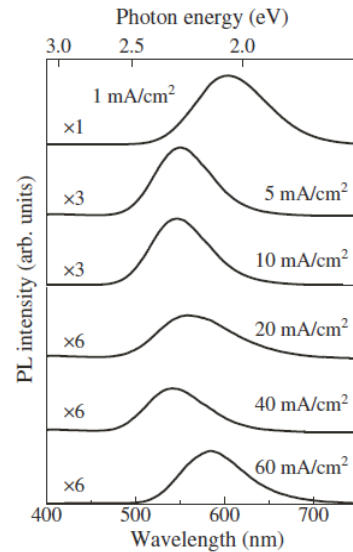


図 4

(3) Si ベース蛍光体

より高品質な PSi の作製を目指して、HF に様々な酸化剤を添加した実験を、系統的に検討していた。あるとき、KMnO₄ を添加した試料の PL 測定を行なったところ、通常の PSi とは全く異なるスペクトルを観測した。この結果を図 5 に示す。図中の破線は、通常観測される PSi の典型的な赤色発光スペクトルである。一方、実線は KMnO₄ 添加で作製した試料 (粉末) の PL スペクトルである。後者の試料は、He-Cd レーザで励起すると非常に強い真っ赤な発光を呈した。そこでこの試料の XRD や XPS 測定を行なったところ、Mn⁴⁺ が賦活された赤色蛍光体 K₂SiF₆·Mn⁴⁺ が生成されていることが分かった。図 6 はこの蛍光体の XRD

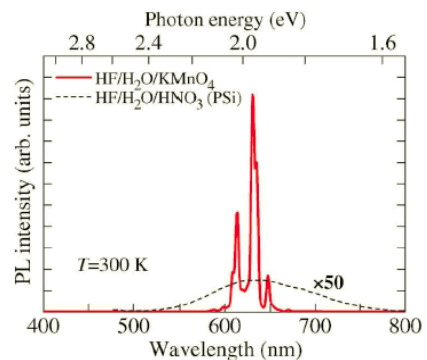


図 5

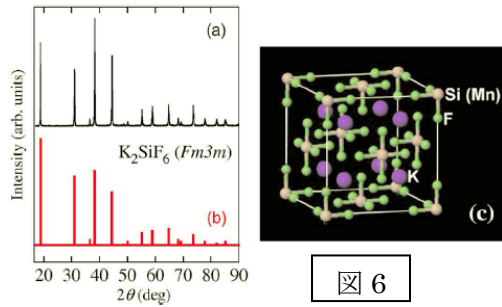


図 6

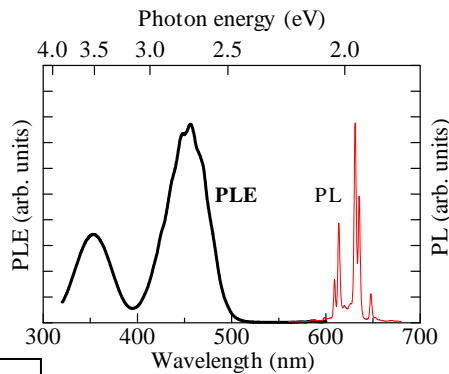


図 7

測定データと結晶構造図である。また、図 7 は PL 及び PL 励起 (PLE) スペクトルである。赤色発光は、波長約 460 nm の青色励起で最も効率よく発光し、将来の高演色白色 LED への応用に期待が持て、非常に注目されつつある。PSi の研究に端を発した思わぬ副産物の発見に至ったと言える。

(4) Si ナノワイヤの製作

HF/Ag₂CrO₄混合液に Si ウェファーを浸漬させることにより、非常に見事な Si ナノワイヤが作製された。図 8 に示すごとく、このナノワイヤは最長約 70 μm、ワイヤ幅は約 100 nm であった。(3) での蛍光体発見と同じく、HF/酸化剤混合液の魅力的な可能性を実証することができた。

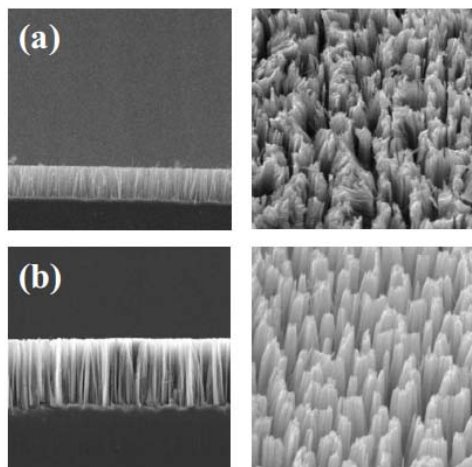


図 8

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 26 件)

- ① Y. Arai and S. Adachi, Optical properties of K₂SnF₆·H₂O:Mn⁴⁺ hydrate phosphor, J. Electrochem. Soc., 査読有, 158, pp. J81-J85 (2011)
- ② R. Kasa, Y. Arai, T. Takahashi, and S. Adachi, Photoluminescent properties of cubic K₂MnF₆ particles synthesized in metal immersed HF/KMnO₄ solutions, J. Appl. Phys., 査読有, 108, pp. 113503-1-6 (2010)
- ③ T. Nakamura, N. Hosoya, B. P. Tiwari, and S. Adachi, Properties of silver/porous-silicon nanocomposite powders prepared by metal assisted electroless chemical etching, J. Appl. Phys., 査読有, 108, pp. 104315-1-6 (2010)
- ④ T. Arai, Y. Arai, T. Takahashi, and S. Adachi, A yellow phosphor K₂SiF₆ activated by Mn²⁺ ions, J. Appl. Phys., 査読有, 108, pp. 063506-1-7 (2010)
- ⑤ Y. Kobayashi and S. Adachi, Structural and optical properties of Si nanowires synthesized by galvanic cell reaction, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 49, pp. 075002-1-7 (2010)
- ⑥ Y. K. Xu and S. Adachi, Multiple-peak structure in porous Si photoluminescence, J. Appl. Phys., 査読有, 107, pp. 123520-1-8 (2010)
- ⑦ H. Rokugawa and S. Adachi, An Etchant System, Ag₂CrO₄-HF-H₂O, for Highly Aligned Si Nanowire Fabrication, J. Electrochem. Soc., 査読有, 157, pp. K157-K161 (2010)
- ⑧ Y. Arai, T. Takahashi, and S. Adachi, Photoluminescent properties of K₂SnF₆·H₂O:Mn⁴⁺ red phosphor, Opt. Mater., 査読有, 32, pp. 1095-1101 (2010)
- ⑨ T. Nakamura, T. Takahashi, and S. Adachi, Temperature dependence of GaAs random laser characteristics, Phys. Rev. B, 査読有, 81, pp. 125324-1-6 (2010)
- ⑩ T. Nakamura, T. Ogawa, N. Hosoya, and S. Adachi, Effects of thermal oxidation on the photoluminescence properties of porous silicon, J. Lumin., 査読有, 130, pp. 682-687 (2010)
- ⑪ Y. K. Xu and S. Adachi, Photoluminescence properties of anodic Si layers formed in HF/oxidant electrolytes, J. Electrochem. Soc., 査読有, 157, pp. H44-H49 (2010)
- ⑫ T. Takahashi, T. Nakamura, and S. Adachi, Blue-light emitting ZnSe random laser, Opt. Lett., 査読有, 34, pp. 3923-3925 (2009)
- ⑬ T. Tamura, A. Aisyah, and S. Adachi, Anodic current and temperature dependence of

- light-emitting porous Si properties, J. Electrochem. Soc., 査読有, 156, pp. K173-K179 (2009)
- ⑭ S. Adachi and T. Takahashi, Photoluminescent properties of $K_2GeF_6:Mn^{4+}$ red phosphor synthesized from aqueous HF/ $KMnO_4$ solution, J. Appl. Phys., 査読有, 106, pp. 013516-1-6 (2009)
- ⑮ T. Takahashi and S. Adachi, Synthesis of $K_2SiF_6:Mn^{4+}$ red phosphor from silica glasses by wet chemical etching in HF/ $KMnO_4$ solution, Electrochem. Solid-State Lett., 査読有, 12, pp. J69-J71 (2009)
- ⑯ Y. K. Xu and S. Adachi, Properties of green-light-emitting anodic layers formed on Si substrates in HF/ MnO_2 mixed solution, J. Appl. Phys., 査読有, 105, pp. 113525-1-7 (2009)
- ⑰ T. Tamura and S. Adachi, Photo-oxidation effects on light-emitting porous Si properties, J. Appl. Phys., 査読有, 105, pp. 113518-1-7 (2009)
- ⑱ K. Takeuchi and S. Adachi, Optical properties of β -Sn films, J. Appl. Phys., 査読有, 105, pp. 073520-1-6 (2009)
- ⑲ K. Takeuchi and S. Adachi, Optical properties of β -Sn films, J. Appl. Phys., 査読有, 105, pp. 073520-1-6 (2009)
- ⑳ Y. K. Xu and S. Adachi, Properties of $Na_2SiF_6:Mn^{4+}$ and $Na_2GeF_6:Mn^{4+}$ red phosphors synthesized by wet chemical etching, J. Appl. Phys., 査読有, 105, pp. 013525-1-6 (2009)
- ㉑ S. Adachi and T. Takahashi, Direct synthesis of $K_2SiF_6:Mn^{4+}$ red phosphor from crushed quartz schist by wet chemical etching, Electrochem. Solid-State Lett., 査読有, 12, pp. J20-J23 (2009)
- ㉒ T. Takahashi and S. Adachi, Mn^{4+} -activated red photoluminescence in K_2SiF_6 phosphor, J. Electrochem. Soc., 査読有, 155, pp. E183-E188 (2008)
- ㉓ S. Adachi and T. Takahashi, Direct synthesis and properties of $K_2SiF_6:Mn^{4+}$ phosphor by wet chemical etching of Si wafer, J. Appl. Phys., 査読有, 104, pp. 023512-1-3 (2008)
- ㉔ S. Adachi and T. Kubota, Electroluminescence from porous silicon formed by photoetching in an HF/ I_2 solution, J. Porous Mater., 査読有, 15, pp. 427-431 (2008)
- ㉕ Y. K. Xu and S. Adachi, Properties of light-emitting porous silicon formed by stain etching in HF/ KIO_3 solution under light illumination, J. Appl. Phys., 査読有, 103, pp. 103512-1-6 (2008)
- [学会発表] (計 30 件)
- ① 新井隆広, 尾池弘美, 徐彦愷, 安達定雄, $Na_2SiF_6:Mn^{2+}$ 及び $Na_2SiF_6:Mn^{4+}$ 蛍光体の作製と評価, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 26, 神奈川工科大学
- ② 本多勇規, 新井隆広, 安達定雄, $CaF_2:Mn^{2+}$ 緑色蛍光体の作製及び発光特性, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 24, 神奈川工科大学
- ③ 奈良淳一, 安達定雄, $KCl:Sn^{2+}$ アルカリハライド緑色蛍光体の作製と評価, 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 24, 神奈川工科大学
- ④ 加藤優希, 安達定雄, Ag_2O/HF を用いた化学エッチングによるシリコンナノワイヤの作製と評価, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 24, 神奈川工科大学
- ⑤ Yan Kai Xu, 古澤伸一, 安達定雄, マンガン(IV)添加アルカリ六フッ化チタン蛍光体, 第 71 回応用物理学学会学術講演会, 2010. 9. 14, 長崎大学
- ⑥ 中村俊博, ビシュヌ ティワリ, 安達定雄, 無電解エッチングによる金属と多孔質シリコンの複合体粉末の作製, 第 71 回応用物理学学会学術講演会, 2010. 9. 14, 長崎大学
- ⑦ 新井祐輔, 安達定雄, Na_2SnF_6 赤色蛍光体の発光特性, 2010 年電気化学秋季大会, 2010. 9. 3, 神奈川工科大学
- ⑧ 奈良淳一, 新井祐輔, 安達定雄, HCl 浸漬 Sn のフォトルミネッセンス特性, 2010 年電気化学秋季大会, 2010. 9. 3, 神奈川工科大学
- ⑨ 笠亮太, 安達定雄, 六方晶 K_2MnF_6 赤色蛍光体の作製と発光特性, 2010 年電気化学秋季大会, 2010. 9. 3, 神奈川工科大学
- ⑩ 新井隆広, 安達定雄, HNO_3/HF 混合溶液への Al/Mn のエッチングで作製した沈殿物の発光特性, 2010 年電気化学秋季大会, 2010. 9. 3, 神奈川工科大学
- ⑪ 加藤優希, 小林也寸志, 安達定雄, AgO/HF を用いた化学エッチングによる Si ナノワイヤの作製と評価, 2010 年電気化学秋季大会, 2010. 9. 2, 神奈川工科大学
- ⑫ 新井祐輔, 安達定雄, $Cs_2MF_6:Mn^{4+}$ (M = Si, Ge, Sn) 赤色蛍光体の作製と評価, 2010 年電気化学第 77 回大会, 2010. 3. 31, 富山大学
- ⑬ 小林也寸志, 安達定雄, $AgNO_3/HF$ の化学エッチングによる Si ナノワイヤの作製, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010. 3. 20, 東海大学
- ⑭ 新井隆広, 新井祐輔, 高橋亨, 安達定雄, Mn 賦活 K_2SiF_6 黄色-赤色蛍光体の発光特性, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010. 3. 19, 東海大学
- ⑮ 保坂倫弘, 中村俊博, 安達定雄, Au 薄膜

- 堆積 GaN 微粒子のバンド端発光増大効果, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010. 3. 18, 東海大学
- ⑩ 笠亮太, 新井祐輔, 高橋亨, 安達定雄, Zn を用いた赤色発光体の作製と評価, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010. 3. 18, 東海大学
- ⑪ T. Nakamura, N. Hosoya, and S. Adachi, Properties of silver/porous-silicon nanocomposite powders prepared by metal assisted electroless chemical etching, PSST-2010, 2010. 3. 16, Valencia, Spain
- ⑫ 安達定雄, 高橋亨, I_2 -IV-F₆:Mn⁴⁺系赤色蛍光体の作製及び発光特性, 2009 年電気化学秋季大会, 2009. 9. 11, 東京農工大学
- ⑬ 新井祐輔, 安達定雄, K₂SnF₆·H₂O:Mn⁴⁺蛍光体の雰囲気による PL スペクトル変化, 第 70 回応用物理学学会学術講演会, 2009. 9. 10, 富山大学
- ⑭ 細谷直貴, 中村俊博, 安達定雄, AgNO₃/HF 混合溶液によるポーラスシリコン粉末の作製, 第 70 回応用物理学学会学術講演会, 2009. 9. 10, 富山大学
- ⑮ 徐彦愷, 安達定雄, 共鳴、非共鳴光励起による多孔質 Si からのフォトルミネッセンス, 第 70 回応用物理学学会学術講演会, 2009. 9. 10, 富山大学
- ⑯ 石田涼介, 高橋亨, 安達定雄, Mn ドープ K₂GeF₆ 結晶の光学的性質, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009. 3. 31, 筑波大学
- ⑰ Yan Kai Xu, 安達定雄, MnO₂/HF 中陽極化成法により作製した緑色発光多孔質シリコン, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009. 3. 30, 筑波大学
- ⑱ 新井祐輔, 高橋亨, 安達定雄, Sn を原料とする赤色発光体の作製と評価, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009. 3. 30, 筑波大学
- ⑲ T. Nakamura, T. Ogawa, T. Kubota, S. Adachi, and M. Fujii, Resonant energy transfer from porous silicon to iodine molecules, The Electrochemical Society - 214th Meeting, 2008. 10. 15, Honolulu, Hawaii, USA
- ⑳ 安達定雄, 赤色発光蛍光体の開発, 2008 産学官技術交流フェア, 2008. 10. 1, 東京ビックサイト
- ㉑ T. Nakamura, T. Ogawa, N. Hosoya, and S. Adachi, The effects of thermal annealing oxidation on the luminescent properties of porous silicon, XIV International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters,

2008. 9. 17, Valladolid, Spain
- ㉒ 中村俊博, 小川達也, 細谷直貴, 安達定雄, ポーラスシリコン粉末の発光特性に対する熱アニールによる酸化の効果, 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008. 9. 4, 中部大学
- ㉓ 田村知之, Aisyah Aznur, 安達定雄, 陽極化成ポーラスシリコン(PSi)の PL スペクトル解析, 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008. 9. 4, 中部大学
- ㉔ 徐彦愷, 安達定雄, HF/KIO₃ 中での照射射ステインエッチングによる可視発光多孔質 Si の作製及び評価, 第 69 回応用物理学学会学術講演会, 2008. 9. 3, 中部大学

〔図書〕 (計 1 件)

- ① 安達定雄, LED 照明の高効率化プロセス・材料技術と応用展開, サイエンス&テクノロジー, 2010, pp. 162-174

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: Fluorescent Material, Process for producing the same, and white-light-emitting diode employing the fluorescent material

発明者: S. Adachi and T. Takahashi

権利者: 群馬大学

種類: 特許

番号: PCT/JP2009/055622

出願年月日: 2009. 3. 23

国内外の別: 国外

名称: 蛍光体の製造方法及び該方法により得られた蛍光体を用いた白色発光ダイオード

発明者: 安達定雄, 高橋亨

権利者: 群馬大学

種類: 特許

番号: 特願 2008-267596

出願年月日: 2008. 10. 16

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安達 定雄 (ADACHI SADAŌ)

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 1 0 2 0 2 6 3 1

(2) 研究分担者

中村俊博 (NAKAMURA TOSHIHIRO)

群馬大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 9 0 4 5 1 7 1 5