

機関番号：12608

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360095

研究課題名 (和文) 青色発光 SiC ナノ粒子の高速大量合成と
フラットパネル白色 LED の開発研究課題名 (英文) Mass Synthesis of Blue-luminescent SiC Nanoparticles:
Application to Flat-panel White Light-emitting Diodes

研究代表者

野崎 智洋 (Nozaki Tomohiro)

東京工業大学・大学院理工学研究科・特任准教授

研究者番号：90283283

研究成果の概要 (和文) : 従来法にない量産性と材料設計の高い自由度を兼ね備えた方法としてインフライトプラズマ CVD を開発し, SiC 量子ドットを大量合成することに成功した。反応時間によってナノ結晶のサイズを 3–12 nm で制御できること, さらに結晶サイズによってフォトルミネッセンスを 900 nm から 650 nm へ制御できることを実証した。カーボンナノチューブをマトリックスとして用い, 量子ドットを分散させた薄膜を作成したが, 量子ドットの酸化に起因してエレクトロルミネッセンス及び薄膜の良好な電気伝導性を得ることができなかった。シリコン系の量子ドットを発光デバイス等へ発展させるためには, 完全に空気 (水蒸気) が遮断された環境で量子ドットを取り扱う必要性があること, そのために必要なデバイス設計指針を明示した。

研究成果の概要 (英文) : Although optical properties of silicon-related semiconductor nanocrystals (NCs) is not as excellent as compound semiconductor materials such as cadmium selenide, these materials are highlighted as one of the promising frontiers in the future optoelectronic devices because of non-toxicity and abundance. We propose in-flight plasma synthesis of silicon carbide NCs with size tunable photoluminescence. As-produced NCs were dispersed into organic solvent, followed by spin coating to fabricate NC containing thin film. We successfully fabricated 3–12 nm NCs, and observed size-dependent photoluminescence between 650 nm and 900 nm. However electroluminescence was not possible due to significant oxidation of NCs. Compared with NCs synthesized using SiH₄, chlorine-terminated NCs are oxidized 1000-time faster than hydrogen-terminated NCs. Further development of given plasma technology for NCs containing lighting devices, ambient oxygen and moisture must be strictly eliminated.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2008年度 | 8,500,000 | 2,550,000 | 11,050,000 |
| 2009年度 | 4,500,000 | 1,350,000 | 5,850,000 |
| 2010年度 | 2,100,000 | 630,000 | 2,730,000 |
| 年度 | 0 | 0 | 0 |
| 年度 | 0 | 0 | 0 |
| 総計 | 15,100,000 | 4,530,000 | 19,630,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：量子ドット, 二酸化炭素排出削減, 熱工学, 反応工学, 非平衡プラズマ,
プラズマ加工, ナノシリコン, ナノ材料

1. 研究開始当初の背景

エネルギー・環境問題を背景に、大きなCO₂排出量抑制効果が期待できる高効率固体照明の実現を目的に発光素子とデバイスを開発する。具体的には、環境負荷の小さいシリコンと炭素の化合物である青色発光SiC量子ドットの大量合成法を確立する。さらに、フラットパネルLEDを低コストで制作するために、量子ドットを溶媒に分散させた量子ドットインクを開発する。これにより、既存の印刷技術を用いてLED等のデバイスを低コストで大量生産することが可能になる。本提案の要点を以下にまとめる。

(1) 世界的に全消費エネルギーの約 20%は照明によって消費されている。現在、照明機器は蛍光灯をはじめとするガス照明であるが、ガス照明の効率は 1990 年以降ほぼ横ばいでこれ以上の高効率化は期待できない。一方、LED の効率は約 2000 年から急激に増加の一途をたどっており、次世代の省エネ光源として大きな期待が寄せられている。

(2) LEDの効率は蛍光灯の2倍、寿命は10倍、大きさは1/10という特徴があり、白熱灯の6%、蛍光灯の10%をLEDで置き換えることができれば、原油換算で53.2万キロリット相当のCO₂を削減できる。

(3) 発光効率が極めて高い量子ドットを用いた光源を開発し更なる高効率化を目指す。

(4) 蛍光灯などのガス照明と異なり、LEDは水銀などの有害物質を全く含んでいないため環境負荷が小さい。

2. 研究の目的

シリコン系の材料は電氣的に優れた物性を有しており、半導体産業の基幹物質として重用されている。一方、これらの多くは間接遷移半導体であるため光学特性は優れておらず、元来発光しない材料と考えられてきた。しかし、結晶のサイズが10 nmより小さくなると、量子サイズ効果によってバンドギャップが顕著に増大し、室温でも可視発光することが1990年になって初めて発見された。これが契機となり、オプトエレクトロニクス分野におけるシリコン系ナノ材料の合成、評価、デバイス応用に関する研究が急速に進展している。一般的な量子ドットの合成法として、シリコン亜酸化物やアモルファスシリコンの薄膜をプラズマCVD、イオンドープ等で予め作っておき、高温で熱処理してナノ結晶へ相変化させる方法がある。しかし、ナノ結晶への相変化には1000°Cを超える高温での熱処理が必要になるため、デバイスを構成する量子ドット以外の材料に熱的ダメージを与えたり不純物の拡散を促すなどの問題が指摘されている。他方、レーザーアブレーションやスパッタリングなどの気相合成法では、ナノ粒径のサイズ制御が難しいことに加え

大量生産に向かないことが多い。溶液を用いて化学的に微粒子を合成するコロイド成長や電気化学的エッチングも重用されているが、化学操作が煩雑で合成に長い時間を有するため大量生産には適していない。特にシリコンは融点が高く、溶剤の沸点の制約から結晶性の高いナノ粒子の合成には不向きである。

我々は、従来法にない量産性と材料設計の高い自由度を兼ね備えた方法としてマイクロプラズマに着目し、量子ドットを連続的かつ大量合成するプロセスを開発した。従来技術（高真空ドライプロセス）に対するマイクロプラズマの特徴として、高密度媒体ではモノマーのクラスタリングが加速される、マイクロ空間では反応時間が短いためナノ粒子が過度に成長しない、モノマーの生成と核生成・成長プロセスを分離して微粒子の低温合成を実現できる、連続処理であるためスケールアップ（大量合成）に対応しやすい、などがあげられる。また、シリコンは毒性が低いうえ、既存のシリコンテクノロジーと相性が良い利点がある。我々は新たに開発したインフライトプラズマCVD法を用い、SiC量子ドットを低コストで合成すると同時に、その薄膜化技術の確立を目的に研究を行う。さらに、青色発光するLEDの開発を実現するための基本素子を開発する。

3. 研究の方法

図1に実験装置の概略を示す。反応器上部から希ガス（HeまたはAr）で希釈した四塩化ケイ素（SiCl₄）とメタン又は水素を供給し、内径3.5 mm、外径6 mmの石英管の内部に高周波プラズマを発生させる。SiCl₄がなければ、H α : 656 nmとH β : 486 nmの強い線スペクトルが観察される。ところが、SiCl₄を添加すると水素の発光はほぼ消滅し、代わってシリコン原子の発光が強く現れる。マイクロプラズマによって原子状水素が生成され、これがSiCl_nから塩素を引き抜くことでシリコン原子が生成される。シリコン原子はプラズマの

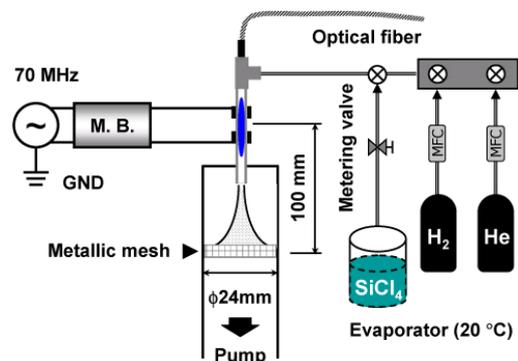


図1 実験装置の概略

なかで微粒子として成長するため、反応時間を長くするほどサイズの大きな量子ドットが合成される。合成された量子ドットはステンレス製メッシュまたはガラス製フィルターで捕集し種々の分析に供する。

4. 研究成果

研究の第一段階として、シリコン量子ドットを合成しその結晶性を顕微ラマン分光分析で評価した (Seki Technoton; STR750, 514 nm)。量子ドットはレーザー照射によって変質しやすいため、レーザーパワーはできるだけ小さく設定し、スペクトルの経時変化を慎重に調べながらデータを取得した (レーザーパワー; 2 mW, スポット径; 1.6 μm , 露光時間; 120 s)。水素濃度, 電力を変化させて合成したSi-NPsのラマンスペクトルを図2に示す。比較のため, シリコン基板のラマンスペクトルを破線で併記した。50W-10%の場合, 480 cm^{-1} 付近にピークを持つブロードなスペクトルが得られた。これは, アモルファス状の物質が合成されていることを示す。電力を100 Wへ, さらに水素濃度を2%から16%に増やすとアモルファス成分が減少し, 結晶性の高い量子ドットが合成された。バルク単結晶のシリコンと比較して, 微結晶シリコンのピークは僅かにブロードで低波数側にシフトしているのが特徴である。ラマンスペクトルを, 480 cm^{-1} 及び515 cm^{-1} にピークを持つガウシアン分布と仮定し, 二つのピークの面積比から結晶化度を推定すると100W-16%の場合90%である。

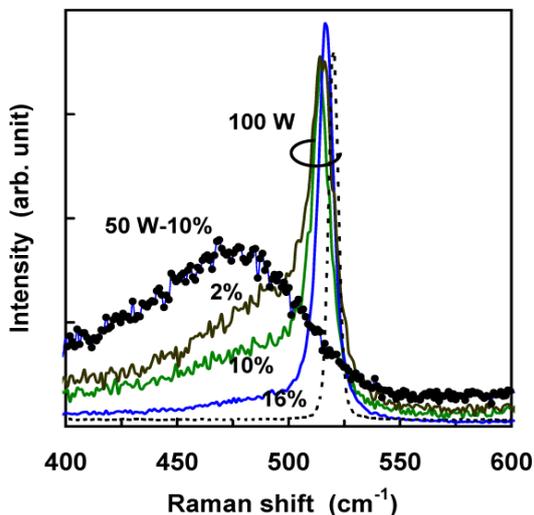


図2 ラマンスペクトル

量子ドットの光学特性は, 粒子サイズだけでなく表面シリコンの化学結合の状態にも大きく左右される。そこで, 合成直後の量子ドットをデシケータの中で24時間自然酸化させた後, トルエンに分散させてコロイド溶

液を作成した。この溶液をTEMグリッドに滴下し, 透過型電子顕微鏡で観察した結果を図3に示す (JEM-3010, JEOL)。ナノ結晶を取り囲むような殻状のシリコン酸化物は明確に確認できないが, 分散した粒径3-12 nmのナノ結晶が観察されている。結晶のサイズは反応時間によって制御することができ, 分散が最大で25%以下に抑えたほぼ単一粒径のナノ結晶を合成することに成功した。コロイドを基板上にキャストリングして薄膜化し, 360 nmの紫外線を照射することで蛍光 (PL, Photoluminescence) を計測した。結晶のサイズに依存して, 蛍光スペクトルのピーク波長が650 nmから900 nmまでシフトすることを実証した (図4)。

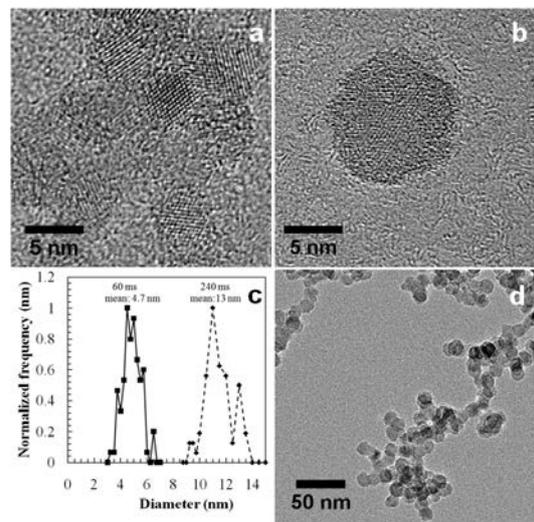


図3 透過型電子顕微鏡像: $\text{SiCl}_4/\text{Ar}/\text{H}_2 =$ (a) 2/40/40, (b) & (d) 0.5/10/10 cm^3/min , (c) サイズ分布 (ナノ粒子50個をカウント)

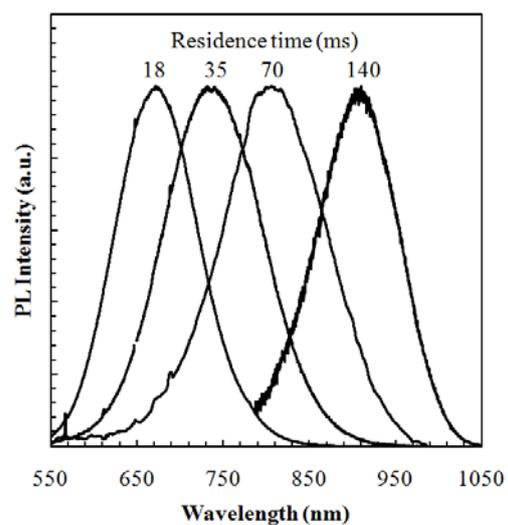


図4 結晶サイズによるフォトルミネッセンスのチューニング

さらに、紫外・可視吸収スペクトル (Hitachi; U-3500) とPLスペクトル (325 nm励起) を図5, 図6に示す。ここでは、表面を酸化させていない合成直後の量子ドットと、大気中で24時間自然酸化させたサンプルを加えた3種類について分析した。表面が酸化されると結晶サイズが小さくなるため、PLは短波長にシフトする。大気中では水蒸気 (H₂O) によって酸化反応が促進されるためPLは強く、より短波長にシフトする。光吸収強度は表面酸化によって弱くなるが、水蒸気の影響はほとんど現れていない。

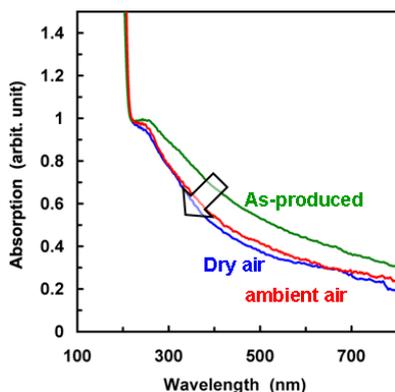


図5 紫外・可視吸収スペクトル

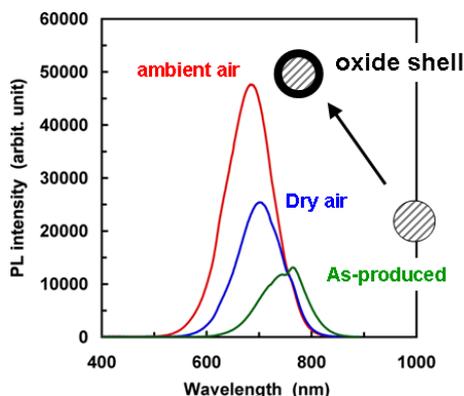


図6 酸化によるPLの変化

比表面積の大きなカーボンナノチューブをマトリックスとして用い、量子ドットを薄膜化した。コロイド溶液と同様に、紫外線励起によって量子ドット薄膜はPLを示す。一方、表面が酸化されているため、電気伝導性は低く、エレクトロルミネッセンスによる発光はほとんど観察されなかった。SiCl₄を用いると残留塩素に起因して量子ドットが容易に酸化されることは既に述べたが、これを克服するためには、大気に暴露することなく量子ドットを成膜する環境を整備することが必須である。さらに、量子ドット薄膜の諸特性(光学物性、電子の移動度など)を同様の環境で評価しつつ、欠陥のない薄膜を製作することがLED等デバイス開発に必須である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計18件)

1. **T Nozaki**, S Yoshida, T Karatsu, **K Okazaki**: Atmospheric pressure plasma synthesis of carbon nanotubes, *J. Phys. D*, **44**, 174007 (9pp), 2011. 査読有り
2. **T Nozaki**, T Karatsu, S Yoshida, **K Okazaki**: Parametric study Selective Growth of Single-walled Carbon Nanotubes in Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, *Jpn J Appl. Phys.*, **50**, 01AF03(5pp), 2011. 査読有り
3. **野崎智洋**: 大気圧プラズマ環境保全からナノマテリアル創生まで、*機械の研究*, **63**(2), 100-106, 2011. 査読無し
4. **T Nozaki**, T Karatsu, K Ohnishi, **K Okazaki**: A Pressure-dependent Selective Growth of Single-walled and Multi-walled CNTs using Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, *Carbon*, **48**, 232-238, 2010. 査読有り
5. **野崎智洋**, **岡崎健**: プラズマCVDによるカーボンナノチューブ合成, *ケミカルエンジニアリング*, **55**(12), 35-40, 2010. 査読無し.
6. **野崎智洋**: マイクロプラズマによるシリコンナノ粒子合成, *高温学会誌*, **36**(4), 168-173, 2010. 査読無し
7. **野崎智洋**: 大気圧プラズマとマイクロリアクターの融合による革新的化学合成プロセス, *材料の化学と工学*, **47**(3), 14-18, 2010. 査読無し
8. **野崎智洋**: 高効率エネルギー・物質変換のための大気圧反応性プラズマの有効利用, *化学工業*, **61**(2), 40-45, 2010. 査読無し
9. **T Nozaki**, T Nakamura, M Sagawa, **K Okazaki**: In-flight Microplasma Synthesis of Luminescent Silicon Nanocrystals, *J. Plasma and Fusion Res. SERIES*, **8**, 500-503, 2009. 査読有り
10. **野崎智洋**, 唐津拓也, 大西空摩, **岡崎健**: プラズマCVDにおけるカーボンナノチューブ成長モード圧力依存性, *日本機械学会論文集B編*, **75**(756), 1662-1668, 2009. 査読有り
11. **野崎智洋**: 大気圧プラズマCVDによる単層カーボンナノチューブ合成, *表面技術*, **60**(6), 18-22, 2009. 査読無し
12. **野崎智洋**: 熱流を伴う反応性プラズマの材料合成「おわりに」, *プラズマ・核融合学会誌*, **85**(3), 128-130, 2009. 査読無し
13. **野崎智洋**: 誘電体バリア放電におけるエネルギー分配機構とヒートマネジメント, *プラズマ・核融合学会誌*, **85**(1), 46-52, 2009. 査読無し
14. **野崎智洋**: 熱流を伴う反応性プラズマの材料合成「はじめに」, *プラズマ・核融合学会誌*, **85**(1), 44-45, 2009. 査読無し

15. **野崎智洋**: マイクロプラズマによる可視発光シリコンナノ粒子の合成: 低温・大量合成にむけて, 光アライアンス, **20**(1), 14-18, 2009. 査読無し
16. **T. Nozaki** and **K. Okazaki**: Carbon nanotube synthesis in atmospheric pressure glow discharge: A review, *Plasma Processes & Polymers*, **5**, 301-321, 2008. 査読有り
17. **K. Okazaki** and **T. Nozaki**: Application of atmospheric pressure non-equilibrium plasma to nanomaterials synthesis, *J. Optoelect. & Adv. Materials*, **10**(8), 1910-1916, 2008. 査読有り
18. **野崎智洋**: マイクロプラズマを用いたシリコンナノ粒子合成, 伝熱, **47**(201), 1-7, 2008. 査読無し

[学会発表] (計 31 件)

1. R Gresback, S Kanegae, **T. Nozaki**, **K. Okazaki**: Synthesis of Silicon Quantum Dots from Silicon Tetrachloride via Very High Frequency Plasma, 2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 2011 年 3 月 24-27 日.
2. **野崎智洋**, Ryan Gresback, Zachary Holman, 鐘ヶ江俊輔, **岡崎健**: In-flight プラズマCVDによるシリコンナノ粒子合成と太陽電池への応用, 第 31 回日本熱物性シンポジウム, 九州大学, 2010 年 11 月 11 日-19 日.
3. **T. Nozaki**, R Gresback, Z Holman, S Kanegae, **K. Okazaki**: In-flight Plasma Synthesis of Silicon Quantum Dots towards Next Generation Photovoltaic Cell, Int. Symp. on Technology and Policy for Low Carbon Society, Beijing China, Nov. 8-10 2010. **Poster**
4. **野崎智洋**, 吉田晋平, 唐津卓也, **岡崎健**: 大気圧プラズマによる単層カーボンナノチューブ成長促進, 第 2 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, くにびきメッセ (松江), 2010 年 10 月 13-15 日.
5. **野崎智洋**, 吉田晋平, 唐津拓哉, **岡崎健**: プラズマCVDにおける活性種生成がカーボンナノチューブ合成に及ぼす影響, 化学工学会第 42 回秋季大会, 同志社, 2010 年 9 月 6-8 日.
6. **T. Nozaki**: Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes, Gordon Research Conference (Plasma Processing Science), July 11-16, 2010, Colby-Sawyer, New London, NH, USA. (招待講演)
7. 吉田晋平, 唐津拓也, **野崎智洋**, **岡崎健**, プラズマCVDにおけるカーボンナノチューブ成長モード (単層/多層) の圧力依存性, 第 47 回日本伝熱シンポジウム, 札幌, 2010 年 5 月 26-28 日.
8. 吉田晋平, 唐津拓也, **岡崎健**, **野崎智洋**, 大気圧プラズマCVDによるカーボンナノチューブ成長メカニズムの解明 (4), 2010 年春季第 57 回 応用物理学関係連合講演会, 東海大学, 2010 年 3 月 17-20 日.
9. **T. Nozaki**: A pressure-induced transition of carbon nanotube morphology in plasma enhanced CVD, 2nd International Symp. on Adv. Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, Meijo Univ., March 7-10, 2010. (招待講演)
10. 吉田晋平, 唐津拓也, **岡崎健**, **野崎智洋**, プラズマCVDによるカーボンナノチューブ合成: 成長モードの圧力依存性, プラズマプロセス研究会, 横浜開港記念会館, 2010 年 2 月 1-3 日.
11. **野崎智洋**, プラズマCVDによる単層・多層カーボンナノチューブ選択合成, 化学工学会CVD研究会, 名古屋大学, 2009 年 12 月 10 日 (招待講演)
12. **野崎智洋**, 唐津拓也, 吉田晋平, **岡崎健**, プラズマCVDによるカーボンナノチューブ成長メカニズムの解明, 熱工学コンファレンス 2009, 山口大学, 2009 年 11 月 7-8 日.
13. **野崎智洋**, 鐘ヶ江俊輔, **岡崎健**, マイクロプラズマによるシリコン量子ドットの低温・大量合成, 熱工学コンファレンス 2009, 山口大学, 2009 年 11 月 7-8 日.
14. 唐津拓也, **岡崎健**, **野崎智洋**, 大気圧プラズマCVDによるカーボンナノチューブ成長メカニズムの解明 (3), 2009 年秋季 第 70 回応用物理学学会学術講演会, 富山大学, 2009 年 9 月 8 日-11 日.
15. **野崎智洋**: 高効率エネルギー・物質転換のための大気圧反応性プラズマの有効利用, 日本化学会第 3 回関東支部会, 早稲田大学, 2009 年 9 月 4-5 日 (招待講演)
16. **T. Nozaki**, T Nakamuta, M Sagawa, **K. Okazaki**: In-flight microplasma synthesis of silicon nanocrystals in macroscopic quantities, 19th International Symposium on Plasma Chemistry, Bochum, Germany, July 26-31, 2009. **Oral**
17. **T. Nozaki**, T Karatsu, K Ohnishi, **K. Okazaki**: Pressure Dependent Transition of Single-Walled Carbon Nanotube Growth Mode in Atmospheric Pressure Plasma Enhanced CVD, 19th International Symposium on Plasma Chemistry, Bochum, Germany, July 26-31, 2009. **Oral**
18. 唐津拓也, **岡崎健**, **野崎智洋**, 大気圧プラズマによるダメージフリープラズマCVD: 垂直配向単層カーボンナノチューブ合成メカニズム, 第 46 回日本伝熱シンポジウム, 国立京都国際会館, 2009 年 6 月 2-4 日.
19. **野崎智洋**: 大気圧プラズマによるダメージフリーCVD: カーボンナノ材料の合成と成長制御, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 筑波大学, 2009 年 3 月 30-4 月 2 日. (招待講演)

20. **T Nozaki**: In-flight microplasma synthesis of luminescent silicon quantum dots in macroscopic quantities, 215th ECS Meeting, SF, CA, May 24-29, 2009. (招待講演)
21. T Karatsu, K Ohnishi, **K Okazaki**, **T Nozaki**: Effect of growth pressure of carbon nanotubes in atmospheric-pressure PECVD, Int. Union of Materials Research Society - Int. Conf. in Asia 2008, Nagoya, Japan, Dec. 9-13, 2008. **Poster**
22. **T Nozaki**: In-flight plasma synthesis of blue-luminescent silicon nanocrystals, Int. Union of Materials Research Society - Int. Conference in Asia, Nagoya, Dec. 9-13, 2008 (招待講演)
23. **T Nozaki**, T Nakamuta, M Sagawa, **K Okazaki**: A single-step plasma synthesis of organically-terminated, 9th Asia-Pacific Conf. on Plasma Science and Technol./21st Symp. on Plasma Science for Materials, Huangshan, China, Dec. 8-11, 2008. **Poster**
24. **野崎智洋**: 大気圧プラズマによるナノマテリアル創成, 電気学会講演会, 名古屋工業大学, 2008年11月14日. (招待講演)
25. **野崎智洋**, 中牟田崇史, 佐川正記, **岡崎健**, マイクロプラズマによる青色発光シリコンナノ粒子の合成と表面修飾, 化学工学会第40回秋季大会, 東北大学, 2008年9月24日-26日.
26. **T Nozaki**, T Nakamuta, T Ogino, **K Okazaki**: A single-step plasma synthesis of organically-passivated blue-luminescent silicon nanocrystal, Int. Congress on Plasma Physics, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Sep. 8-12, 2008. **Oral**
27. 中牟田崇史, 佐川正記, **野崎智洋**, **岡崎健**, シリコン量子ドットの表面修飾と化学構造解析, 第69回応用物理学会学術講演会, 中部大学, 2008年9月2日-5日.
28. 唐津拓也, 大西空摩, **野崎智洋**, **岡崎健**, 大気圧プラズマCVDによるカーボンナノチューブ成長メカニズムの解明(2), 第69回応用物理学会学術講演会, 中部大学, 2008年9月2日-5日.
29. **野崎智洋**: 大気圧プラズマ流が拓く先端ナノテクノロジー, 日本機械学会年次大会, 横浜国立大学, 2008年8月3日-7日. (招待講演)
30. **T Nozaki**, and **K Okazaki**: Prospective and Challenges of Hydrogen and Fuels Cell Technology: contribution of Non-thermal Plasma Assisted Fuel Conversion, 7th Korea-Japan joint workshop on plasma nanotechnology, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, July 3-5, 2008. (招待講演)
31. **野崎智洋**, 荻野智久, 中牟田崇, **岡崎健**, マイクロプラズマによる青色発光シリコン量子

ドットの気相合成と表面修飾, 第45回日本伝熱シンポジウム, つくば, 2008年5月21日-23日.

〔図書〕 (計4件)

1. **T Nozaki** and K Okazaki: Synthesis of vertically-aligned single-walled carbon nanotubes using atmospheric pressure plasma enhanced chemical vapour deposition, *in Generation and applications of atmospheric pressure plasmas*, Nova Science Pub Inc, in press, 2011.
2. **野崎智洋**, **岡崎健**: 大気圧プラズマの基礎と応用: 6.7.6 CNT・ナノ微粒子, オーム社, 2009年10月, 365-372, (ISBN 978-4-274-20760-0)
3. **T Nozaki**: In-flight Microplasma Synthesis of Luminescent Silicon Quantum Dots, in *Macroscopic Quantities, Nanocrystal Embedded Dielectrics for Electronic and Photonic Devices*, ECS Transaction, **19**(8), 3-8, 2009. (ISBN 978-1-56677-724-7)
4. **T Nozaki**, K Okazaki: Microplasma Synthesis of Tunable Photoluminescence Si Quantum Dots, in *Photoluminescence Research Progress*, Nova Science Pub Inc, 2008/July, 213-233, (ISBN 978-1-60456-538-6)

〔その他〕

ホームページ等: <http://www.plasma.nu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野崎 智洋 (NOZAKI TOMOHIRO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・特任准教授
研究者番号: 90283283

(2) 研究分担者

岡崎 健 (OKAZAKI KEN)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 20124729