

機関番号：82108

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21710095

研究課題名(和文) 単分子/ナノ粒子ヘテロ界面構造操作に基づく発光特性制御

研究課題名(英文) Size-tunable UV Luminescence from Organic-capped Si Nanoparticles -Developed Heterogeneous Interface for Precise Light Emission Control

研究代表者

白幡 直人 (SHIRAHATA NAOTO)

独立行政法人物質・材料研究機構・ナノセラミックスセンター・主幹研究員

研究者番号：80421428

研究成果の概要(和文)：

紫外波長領域において高輝度発光するシリコン(Si)ナノ粒子の発見に基づき、本研究課題では、この新しいナノ構造体の発光機構及び、発光波長チューニングの可能性を、Si/有機単分子コア/シェル界面構造制御を通じて明らかにした。

当該発光メカニズムを明らかにするために、(1)Siコア構造と、(2)シェル/コア界面化学構造の両面から調べたところ、高輝度紫外発光を導くには、①非酸化結晶性コア構造を構築し、②コア径を2.5 nmより小さい粒子径にナノサイズ化すれば良く、さらに、2.5 nm以下で粒度分布を制御することで、300-400 nmの発光波長域でサイズ効果を見出せることを明らかにした。このサイズに依存した発光現象挙動は、Siコアと単分子シェルの接合界面における極性には影響を受けないことを「Si-C」および「Si-O」系のモデル界面を構築することで実証した。界面結合様式に選択性を与えることは、ナノ粒子を単分子修飾する際の反応系オプションを制限しないという格別の効果を導く。これらの結果、Siナノ粒子は紫外-近赤外の非常に広い波長域で、蛍光発光波長を可変できる他に類を見ないユニークな物質であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：

The present study demonstrated the size-dependent UV PL features from the nanocrystals terminated with organic monolayers (i.e., Si/organic core/shell nanoparticles) for the first time. Two parameters should be satisfied to observe such unique PL features; (i) the size of cores is controlled in diameter range less than 2.5 nm, and (ii) surface of the crystalline cores is covered with high density of monolayers to give nonoxidized Si nanoparticles. It can be clearly seen that the size control of cores allows the wavelength-tunable light emission in the range from 300 to 400 nm. Although the presence of oxidized surface region due to lower monomolecular coverage causes the drastic redshifted PL features, the difference in head group of monolayers, i.e., carbon-silicon and oxygen-silicon, does not influence on light absorption and emission properties, suggesting an advantage that we have many options for choosing a reaction route to synthesize a variety of organic-modified nanoparticles. These results would be open a new frontier for silicon as environmentally-friendly light emitters.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：表面・界面科学

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、ナノ構造科学

キーワード：ナノ材料、光物性、量子閉じ込め、環境材料、シリコン、表面、界面、発光

1. 研究開始当初の背景

有機 EL 素子やレーザーに代表される光エレクトロニクスからバイオモニタリング・トレース研究に至るまで、発光材料は実に幅広い分野で活用されている。有機系色素は、発光の量子効率がよく、種類も豊富なうえ、構造の一部を変えることで、比較的容易に発光波長を変調できることから依然として汎用性が高い。しかしながら、有機材料に固有の著しい退色性により、産業応用は大きく制限を受けている。一方で、III-VI 族系に代表される直接遷移型半導体量子ドット (or ナノ粒子) は高い注目を集めている。具体的には、低退色で無機物としては効率の良い発光特性を示す。特段の注目は、量子サイズ効果に基づき発光波長を可変できる点に集まっている。ところが幅広い分野で使用するには、毒性が強い。例えば、Cd と Se は脊椎動物に急性及び慢性毒性を及ぼすことが知られている。可視-近赤外域で使用される PbS や PbSe もヒトの健康と環境へ及ぼす影響が懸念されるため技術移転は制限を受ける。

このように化合物半導体の将来的な使用制限が危惧される背景に立脚し、申請者は“新しい発光材料”として、環境半導体であるシリコン (Si) に着目した。生体に対し無毒で、高環境調和性といった材料固有の優位性に加え、なにより元素戦略上優位である。Si はバルク状では間接遷移型バンドギャップ構造をもつため高輝度発光は望めないがバルクの励起子ボーア半径以下にナノ構造化することにより可視域で蛍光発光することが知られている。Si

申請者は最近、紫外波長領域において高輝度発光する Si ナノ粒子を発見した。バルクのバンドギャップが僅か 1.1 eV と小さな半導体から紫外発光に相当するエネルギーを光として取り出せることは、非常に興味深い現象である。本研究課題では、この新しいナノ構造体の発光機構及び、発光波長チューニングの可能性を探ることで、Si における秘められた機能解明に向け研究を推進することとした。

2. 研究の目的

従来、Si 粒子をナノ構造化することにより制御可能な蛍光発光波長領域は可視域に限られ、紫外波長領域においてのみ蛍光発光を観察した例はない。本研究では、紫外波長領域において高輝度発光する Si ナノ粒子を対象とし、当該高輝度紫外発光を導く構造的起源の起源を解明することを目的とする。具象化すると、高輝度紫外発光を導くナノ構造に

ついて (1) Si コア構造と、(2) 有機単分子シェル/Si コア界面化学構造の両面からアプローチする。紫外発光を導く構造パラメータを実験的に明らかにした上で、さらに、紫外域における発光波長のチューニングの可能性について言及する。

3. 研究の方法

3-1 Si コア構造の制御

バルクのバンドギャップが 1.1 eV である Si をナノ構造化することで 4.0 eV に相当する光子エネルギーを放出できる点から、当該発光の起源が量子サイズである可能性が高い。そこでコア制御に必要な条件は、① コアをナノ結晶で構築する、② コアの酸化を防ぐ(=非酸化コアの形成)、③ コアサイズをバルクの励起子ボーア半径以下 ($d \leq 5$ nm) で制御し単分散を実現する、である。特に、コアサイズ制御を重要視し、逆ミセル法を選択した。合成したコア粒子の結晶性は、Raman 分光、XPS、HR-TEM を用い、マクロスコピック・ミクロスコピック両面から詳細に分析した。コアの酸化抑制は、図 1 に示すように Si 結晶コアを有機単分子で高密度被覆することで達成した。鋭意研究を積み重ねることで、これら多様な要件を満足する合成法として図 1 に示す逆ミセル法を開発した。

3-2 『単分子-Si』サブナノコンタクト界面の構築

光学バンドギャップの幅を紫外波長領域において制御すること上で、コア構造の制御にくわえ、もう 1 つ重要な因子として考えられるのが、Si コア/有機単分子シェルの界面接合モードである。Si は単一元素からなる無極性半導体であるために、ナノ粒子の電子構造や光学特性は表面の化学種や化学結合に影響を受ける可能性がある。そこで、図 2 に示すように、極性が異なる有機官能基種をシリコン最表面へ各々、共有結合的に導入する。これにより光学バンドギャップの幅へ及ぼす界面化学接合種の効果を検証する。

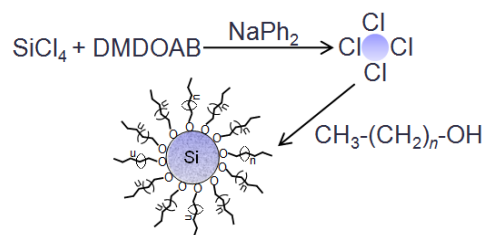


図 1. 逆ミセル法を用いたアルコキシ終端 Si ナノ粒子の合成

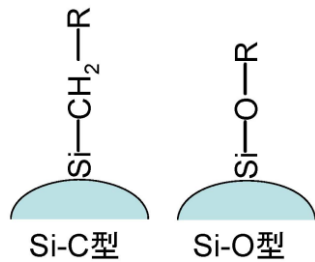


図2. 極性の異なる界面接合(ナノコンタクト界面構築)を有する非酸化 Si ナノ粒子

4. 研究成果

図1に示すように、 SiCl_4 をサーファクタント存在下、ナトリウムビフェニリドで還元することで塩素終端 Si コアを形成、1-アルコールと表面反応させることで、アルコキシ終端 Si ナノ粒子を合成した。NMR から図2に示したような『O-Si』界面結合が形成されていること、ナノ粒子表面がアルコキシ基で終端されていることを確認した。FTIR からナノ粒子表面は単分子で保護され、非酸化を実現していた。動的光散乱式粒度分布をみると 2.0 nm 以下のナノ粒子で構成された単分散性の高いサンプルを作製できた。ラマン分光法により、当該紫外発光 Si ナノ粒子からのラマンスペクトルは 503cm^{-1} とバルク (520cm^{-1}) に比べてかなりブルーシフトしていた。このブルーシフト量は過去のシミュレーション結果と比較すると、2.5nm 以下の粒径群から導かれるという理論計算とよく一致した。これを実像として調べるために、HR-TEM 観察を行ったところ平均粒径は $1.8 \pm 0.2\text{ nm}$ と見

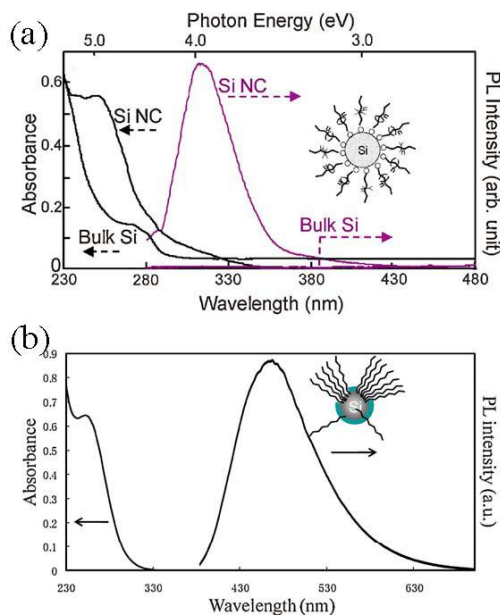


図3. (a)非酸化コアと(b)部分酸化コアを有する Si ナノ粒子から観察された光吸収スペクトルと PL スペクトル

積もられた。図3(a)にバルクとナノ粒子の光吸収スペクトルを示す。ナノ粒子はバルクに比して、ブルーシフトしている。また、フォトルミネッセンス (PL) スペクトルの比較では、バルクはそのバンドギャップ構造ゆえにほとんど発光を示さない。一方、ナノ粒子サンプルでは、発光極大を 310 nm (4.0 eV) にもつ強い PL スペクトルが観察された。 $1.8 \pm 0.2\text{ nm}$ とほぼ単分散が達成されたサンプルであるがゆえに、半幅幅は 35 nm と化合物半導体量子ドットに匹敵するほど狭く、PL スペクトルいずれの位置で励起スペクトル取得しても同じ励起スペクトル形状を有した (→発光の起源が同じことを意味する)。当該 PL の量子収率は相対値として 20% と見積もられた。また、時間相関単一光子計数法により当該 PL の蛍光寿命は、1.1 ns と見積もられた。これらの値は、直接遷移型バンドギャップ構造をもつ化合物半導体量子ドットの発光効率に近く、さらに、直接遷移型バンドギャップ構造をもつ化合物半導体と同程度の短い光励起キャリアの寿命であった。

ここまで示した光学特性を観察するには、非酸化 Si コアの形成が極めて重要であった。例えば、単分子の被覆密度が低く、部分的に酸化した Si ナノ粒子からの PL スペクトルは、非酸化ナノ粒子とは、全く異なる発光特性を示した (図3(b)参照)。平均粒径がほぼ同一であるにも関わらず、酸化被膜の存在により発光波長は紫外 (310 nm, 4.0 eV) → 青 (440 nm, 2.8 eV) に大きくレッドシフトした。これは、酸化被膜が部分的にでも存在することで、量子サイズ効果により離散化されたエネルギーギャップの間に、光学的界面準位が形成したことを示すと考えられる。この様子は、時間相関単一光子計数法による光励起キャリアの緩和過程を観察するとよく分かる (図4参照)。酸化膜の存在により、蛍光減衰曲線は非酸化 Si に比べ非常に緩やかになり、蛍光寿命は非酸化 Si の 12 倍以上長くなった。このことは光学界面準位の形成を示唆しており、図3(b)において目に見えている青色発光は光学界面準位と基底準位の間のエネルギーギャップの大きさに

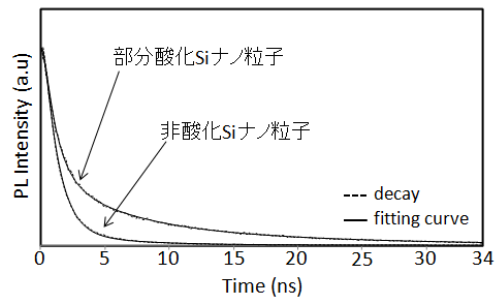


図4. 非酸化 Si ナノ粒子と部分酸化 Si ナノ粒子の蛍光減衰曲線

相当すると考えられる。

このように非酸化界面の構築が高輝度な紫外発光を導くために非常に重要であることが分かった。当該発光現象が本当に量子サイズ効果に基づくなら、PLのサイズ依存性を見いだすことができるはずである。そこで、図5に示すように1-4 nmの狭い粒子径範囲において、粒度分布の異なる5種類の非酸化Siナノ粒子を調製した。図からコアのサイズが小さくなるに従い、発光波長もブルーシフトすることが実証された。近紫外-青の各波長帯で発現するPLのサイズ依存性の発見は、Siの発光素材としての高いポテンシャルを示している。

これまで、近紫外波長域におけるSiナノ粒子からの発光は、非酸化コア粒子径の精密制御により導くことができることが明らかになってきた。ここでは、最後のパラメータとしてナノコンタクト界面に着目した。具体的には、図2に示すようなヘテロ接合界面を創り、当該界面結合様式の違いが光学特性に及ぼす影響を調べた。『C-Si』界面は、 SiCl_4 をサーファクタント存在下で LiAlH_4 により水素還元し、平均粒径1.8 nmの水素終端化Siナノ粒子を作製、1-アルケンのヒドロシル化を通じて、アルキル単分子膜で被覆されたSiナノ粒子を調製した。『C-Si』接合系の構築はNMR、酸化被膜がないことはFTIRを用いて各々確認した。当該サンプルの光学特性を調べると、図3(a)に示した『O-Si』系と同じく310 nmに発光極大を有するPLスペクトルを得た。時間相関単一光子計数法による光励起キャリアの緩和過程を観察したところ、O-Si系の蛍光減衰曲線とよく似ており、蛍光寿命は1.2 nsと見積もられた。『O-Si』と『C-Si』接合系から得られた光学特性を相互比較すると、ナノコンタクト界面の結合様式は、Siのナノ結晶コアが1.8 nmより大きい

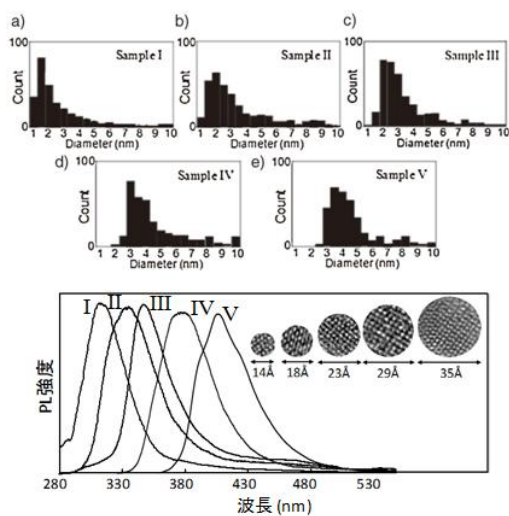


図5. 非酸化Siナノ粒子における『サイズ-発光波長』関連性

サイズ域においては、発光特性に影響を及ぼさないことが明らかとなった。

以上、すべての結果を統合し議論することで、本研究で得た化合物半導体に匹敵する程度高い相対発光量子収率を有する紫外発光は光励起キャリアの放射性再結合に基づいていると結論づけた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計24件)

1. N. Shirahata, "Colloidal Si nanocrystals: A controlled organic-inorganic interface and its implications of color-tuning and chemical design toward sophisticated architectures", *Phys. Chem. Chem. Phys. (Perspective Article)* 13 (2011) 7284-7294 (査読有)
2. H. Sun, Y. Sakka, H. Gao, Y. Miwa, M. Fujii, N. Shirahata, Z. Bai, J. Li, "Ultrabroad Near Infrared Photoluminescence from $\text{Bi}_5(\text{AlCl}_4)_3$ Crystal", *J. Mater. Chem.* 21 (2011) 4060-4063 **Hot Article** (査読有)
3. W. Di, Y. Sakka, N. Shirahata, J. Li, N. Pinna, "Photoluminescence, cytotoxicity and in vitro imaging of hexagonal terbium phosphate nanoparticles doped with europium", *Nanoscale* 3 (2011) 1263-1269 (査読有)
4. H. Sun, J. Yang, M. Fujii, Y. Sakka, Y. Zhu, T. Asahara, N. Shirahata, M. Ii, Z. Bai, J. Li, H. Gao, "Highly Fluorescent Silica-Coated Bismuth Doped Aluminosilicate Nanoparticles for Near Infrared Bioimaging", *Small* 7 (2011) 199-203 (査読有)
5. H. Sun, Y. Sakka, M. Fujii, N. Shirahata, H. Gao, Ultrabroad Near Infrared Photoluminescence from Ionic Liquids Containing Subvalent Bismuth", *Opt. Lett.* 36 (2011) 100-102 (査読有)
6. N. Shirahata, D. Hirakawa, Y. Sakka, "Interfacial-related Color Tuning of Colloidal Si Nanocrystals", *Green Chem.* 12 (2010) 2139-2141 **Cover Article** (査読有)
7. W. Di, J. Li, N. Shirahata, Y. Sakka, "An Efficient and Biocompatible Fluorescence Resonance Energy Transfer System Based on Lanthanide-Doped Nanoparticles", *Nanotechnology* 21 (2010) 21 455703 (1-8) (査読有)
8. N. Shirahata, T. Tsuruoka, T. Hasegawa, Y. Sakka, "Size-Tunable UV-Luminescent Silicon Nanocrystals", *Small* 6 (2010) 915-921 (査読有)
9. H. Sun, Y. Sakka, Y. Miwa, N. Shirahata, M. Fujii, H. Gao, "Spectroscopic Characterization of Bismuth Embedded Y Zeolites", *Appl. Phys. Lett.* 97 (2010) 131908 (1-3) (査読有)

10. N. Shirahata, Y. Sakka, "Controlled Organic/Inorganic Interface Leading to the Size-tunable Luminescence from Si Nanoparticles", *J. Cer. Soc. Jpn.* 118 (2010) 932-939 (2010JCerSJ 優秀論文賞) (査読有)
 11. W. Di, N. Shirahata, H. Zeng, Y. Sakka, "Fluorescent Sensing of Colloidal CePO₄:Tb Nanorods for Rapid, Ultrasensitive and Selective Detection of Vitamin C", *Nanotechnology* 21 (2010) 365501(1-7) (査読有)
 12. H. Sun, M. Fujii, Y. Sakka, Z. Bai, N. Shirahata, L. Zhang, Y. Miwa, H. Gao, "Near-infrared photoluminescence and Raman characterization of bismuth embedded sodalite nanocrystals", *Opt. Lett.* 35 (2010) 1743-1745 (査読有)
 13. N. Shirahata, "Organometallic Chemistry on IV Semiconductors and Potential Applications", *Trans. Mater. Res. Soc. Jpn.* 35 (2010) 443-448 (査読有)
 14. 白幡直人「発光色を紫外-可視で可変可能なSiナノ粒子～表面単分子接合が創発する新しい発光～」*表面* 48 (2010) 8-17 (査読無)
 15. 白幡直人「有機単分子と半導体間の制御された接合界面構築と物性発現」*Coll. Interf. Commun.* 34 (2010) 27-29 (査読無)
 16. N. Shirahata, M. R. Linford, S. Furumi, L. Pei, Y. Sakka, R. J. Gates, M. C. Asplund, "Laser-derived One-Pot Synthesis of Silicon Nanocrystals Terminated with Organic Monolayers", *Chem. Commun.* (2009) 4684-4686 (査読有)
 17. L. Yang, N. Shirahata, G. Saini, F. Zhang, L. Pei, M. Asplund, D. Kurth, K. Ariga, K. Sautter, T. Nakanishi, V. Smentkowski, M. R. Linford, "The Effect of Surface Free Energy on PDMS Transfer in Microcontact Printing, and Its Application to ToF-SIMS to Probe Surface Energies", *Langmuir* 25 (2009) 5674-5683 (査読有)
 18. N. Shirahata, S. Furumi, Y. Sakka, "Micro-emulsion Synthesis of Blue Luminescent Silicon Nanoparticles Stabilized with Alkoxy Monolayers", *J. Cryst. Growth* 211 (2009) 634-637 (査読有)
 19. K. Funato, N. Shirahata, Y. Miura, "α-Man monolayer formation via Si-C bond formation and protein recognition", *Thin Solid Films* 518 (2009) 699-702 (査読有)
 20. S. Furumi, T. Uchikoshi, N. Shirahata, T. Suzuki, Y. Sakka, "Aqueous Dispersions of Carbon Nanotubes Stabilized by Zirconium Acetate", *J. Nanosci. Nanotechnol.* 9 (2009) 662-665 (査読有)
 21. N. Shirahata, A. Hozumi, Y. Sakka, "Wavelength-Selectivity in Photochemical Reaction between 1-Alcohol and Hydrogen-terminated Silicon", *J. Nanosci. Nanotechnol.* 9 (2009) 662-665 (査読有)
 22. A. Hozumi, H. Taoda, T. Saito, N. Shirahata, "Fabrication of Well-defined Microdomains Composed of Aldehyde and Carboxy terminated Self-assembled Monolayers", *J. Nanosci. Nanotechnol.* 9 (2009) 455-460 (査読有)
 23. 白幡直人、目義雄「発光シリコン粒子の湿式合成」*色材協会誌* 82 (2009) 516-521(査読無)
 24. 白幡直人「超薄膜」*J. Soc. Inorg. Mater. Jpn.* 16 (2009) 442-449 (査読無)
- [学会発表] (計 2 1 件)
1. 白幡直人「単分子-IV 族半導体」接合系：発光特性を操作する界面」ナノ界面を用いるサイエンスとその解析に関する研究会, 旭川 2011.01.18 (招待講演)
 2. S. Tao, Y. Sakka, N. Shirahata, "Highly Fluorescent Bismuth Doped Aluminosilicate/Silica Core-Shell Nanoparticles for Multifunctional Near Infrared Bioimaging", The 3rd International Congress on Ceramics, 大阪国際会議場, 2010/11/14-18
 3. D. Hirakawa, N. Shirahata, Y. Sakka, "Highly Luminescent Ge Nanocrystals Synthesized via Laser Chemical Approach", ICC 3rd International Congress on Ceramics, 大阪国際会議場, 2010/11/14-18
 4. N. Shirahata, Y. Masuda, A. Hozumi, Y. Sakka, "Parallel Observation of Different Biomolecular Recognition Events using a Multi-functional SAM Microarray", ICC 3rd International Congress on Ceramics, 大阪国際会議場, 2010/11/14-18
 5. S. Tao, J. Yang, Y. Sakka, M. Fujii, M. Masaaki, T. Asahara, Z. Bai, N. Shirahata, "Highly Fluorescent Bismuth Doped Aluminosilicate/Silica Core-Shell Nanocomposites for Near Infrared Bioimaging, The 11th IUMRS International Conference in Asia, Qingdao International Convention Center, China, 2010/09/25-28
 6. 白幡直人、目義雄「発光色を紫外-可視で可変可能なIV族半導体ナノ粒子」第59回高分子討論会, 北海道大学, 2010/09/16
 7. N. Shirahata, T. Tsuruoka, Y. Sakka, "Unique Optical Properties of Organic Modified Si Nanoparticles", 2010 MRS Spring Meeting, Marriott, San Francisco, USA, 2010/09/5-9
 8. 平川大悟、白幡直人、目義雄「高輝度発光するGeナノ粒子の1ステップレーザー化学合成」第17回材料科学若手討論会,

- 千葉工業大学, 2010/09/03
9. N. Dewei, N. Shirahata, Y. Sakka, "Enhanced Photoluminescence Features of Rare Earth Phenylphosphonate Hybrid Nanostructures Synthesized under Nonaqueous Conditions", STAC-4, メルパルク横浜, 2010/07/21-23
 10. N. Shirahata, T. Tsuruoka, Y. Sakka, "Size-Tunable UV-Blue Luminescent Silicon Nanoparticles", The International Conference on Nanophotonics 2010, エポカルつくば, 2010/05/30-06/3
 11. 白幡直人, 鶴岡徹、目義雄「単分子/Si の制御されたナノ構造が導く発光特性」日本化学会第 90 春季年会, 近畿大学, 2010/03/26
 12. 白幡直人「発光体としての Si ナノ粒子」ナノ粒子研究会, 東京工業大学, 2010/03/05 (招待講演)
 13. 白幡直人「発光色を紫外-可視で可変可能なナノ粒子の室温湿式調製と誘導化」Nanotech 2010, 東京ビックサイト, 2010/02/17-19
 14. 白幡直人「IV 族半導体上での表面化学と物性発現」日本 MRS 創立 20 周年記念シンポジウム, 横浜情報文化センター, 2009/12/16 (招待講演)
 15. 白幡直人「発光 Si ナノ構造体の調製と表面化学修飾」第 32 回ナノテク部会研究会, 東京理科大学, 2009/11/12 (招待講演)
 16. Naoto Shirahata, "Simple Chemical Approaches for Luminescent Si Nanostructures", 11th International Conference on Advanced Materials (ICAM2009), Hotel Windsor Barra, Rio de Janeiro, Brazil, 2009/09/25 (招待講演)
 17. 平川大悟、白幡直人、伊藤滋、目義雄「有機終端化 Ge ナノ粒子の 1 ステップ合成」第 62 回コロイドおよび界面化学討論会, 岡山理科大学, 2009/09/19
 18. 越川祥高、白幡直人、増田佳丈、伊藤滋、目義雄「酸化物上へ作製した SAM マイクロアレイ表面における生体分子認識」第 62 回コロイドおよび界面化学討論会, 岡山理科大学, 2009/09/19
 19. 白幡直人「有機分子と半導体間の制御された新規接合界面の構築とその物性発現」第 62 回コロイドおよび界面化学討論会, 岡山理科大学, 2009/09/17 (招待講演)
 20. Naoto Shirahata, "A smart core/shell nanostructures emitting UV-visible light", 3rd International Workshop on Smart Materials & Structures, University of Applied Sciences Kiel, Germany, 2009/08/20 (招待講演)
 21. Naoto Shirahata, "Ultraviolet Light Emission from Silicon Nanostructures", 2nd

International Conference from Nanoparticles & Nanomaterials to Nanodevices & Nanosystems (IC4N), Rodos Palace, Rhodes, Greece, 2009/06/29 (招待講演)

[図書] (計 3 件)

1. N. Shirahata, "Organic Monolayers: Recent Potential Applications", *Bio-inspired materials synthesis* edited by Y. Gao, Transworld Research Network, India (2010) 249-277 (ISBN: 978-81-308-0401-9)
2. N. Shirahata, "When Biomolecules Meet Highly-oriented Monolayer Systems on Semiconductor Surfaces", *Soft Nanomaterials* edited by H. S. Nalwa, American Scientific Publishers Vol. 1, pp. 171-208 (2009)
3. 白幡直人「単分子/IV 属半導体接合系のヘテロ界面設計と機能」*超分子サイエンス&テクノロジー* 国武豊喜監修 (株) エヌ・ディー・エス pp. 361-369 (2009)

[その他]

- 受賞—
1. 2010 J CerSJ 優秀論文賞
受賞論文: N. Shirahata and Y. Sakka, "Controlled Organic/Inorganic Interface Leading to the Size-tunable Luminescence from Si Nanoparticles", *J. Cer. Soc. Jpn.* 118 (2010) 932.
 2. 日本 MRS「日本 MRS 創立 20 周年記念シンポジウム」感謝状 平成 21 年 12 月 6 日
 3. 平成 21 年度 (社) 日本化学会 コロイドおよび界面化学部会 科学奨励賞
受賞課題「有機分子と半導体間の制御された新規接合界面の構築とその物性発現」平成 21 年 9 月 18 日
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
白幡 直人 (SHIRAHATA NAOTO)
独立行政法人物質・材料研究機構・ナノセラミックスセンター・主幹研究員
研究者番号: 80421428
 - (2) 研究分担者
なし
 - (3) 連携研究者
なし