

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651111

研究課題名(和文) 不規則構造を利用した高効率光捕集構造の開発

研究課題名(英文) development of light harvesting structure using random medium

研究代表者

藤原 英樹 (Fujiwara, Hideki)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号：10374670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：異なる光学特性を持つ不規則構造の多層化と光局在効果を利用した新しい表面光捕集構造の提案に向け、本課題の基となった局在モード制御方法の実証実験を行った。その結果、散乱体・欠陥サイズ等の構造パラメータの調整によって局在モードを制御できる事を明らかにした。また、上記構造を作製する他の材料としてダイヤモンドナノ粒子にも注目し、これまでに報告例の無い、新規なUVランダムレーザーの実現に成功した。これらの結果は、不規則な媒質中においても任意に局在モード等の光学特性を制御できる可能性を示しており、光捕集構造を実現する上での重要な知見となる。

研究成果の概要(英文)：Towards the development of a novel light-harvesting surface structure, I experimentally validate the controllability of random lasing modes on the basis of the resonant properties of surrounding scatterers and intentionally introduced defect nanoparticles. By adjusting the sizes of scatterers and defects, we experimentally clarified that the random lasing modes (lasing peak wavelength and the number of lasing peaks) at a defect region within a spherical ZnO nanoparticle film can be controlled. In addition, I also demonstrated a novel UV random lasing from a diamond nanoparticle film, in which nonlinear evolution of discrete sharp peaks at wavelengths around 380 nm, a wavelength never before observed, was observed. Because these results suggest the possibility of manipulating the optical characteristics even in random media, these results should provide important knowledge for the realization of highly efficient light harvesting structure.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学

キーワード：不規則構造 光局在 ランダムレーザー

1. 研究開始当初の背景

近年のナノ加工技術の進展により、光電変換素子や発光素子の光捕集・取り出し効率向上、光学素子の迷光防止等の用途に対して、基板等の表面上に精密に設計・作製したナノ構造が注目を集めている。特に高効率な太陽電池や人工光合成の実現の為には、如何に太陽光スペクトルの広い範囲で光を効率的に捕集・吸収するかが重要な課題の一つである。このため周期構造を利用した高効率光捕集構造が提案されているが、大規模・高価な装置を必要とし、コストや時間がかかるだけでなく、周期構造では特定の狭い波長帯や受光角度においてのみ動作するため、高効率光捕集と言う点では改善の余地がある。

一方私は、きれいな構造とは真逆の波長オーダーの不規則な屈折率分布をもつ不規則構造中の局在モードに注目した研究を行っている。これまでの成果から、構造中の不規則な散乱体サイズや空間分布等のいずれかのパラメータを規則的(例えば、均一粒径)にする事で、個々の散乱体の共鳴特性によって、透過・反射特性において特異な反射・透過バンドが現れることを数値解析的に確認し、均一な散乱体で構成されたランダム構造中に散乱体を配置しない欠陥領域を設けるだけの簡単な局在モード制御方法を提案した。これまでに散乱体の共鳴波長帯域の光が欠陥領域において局在する様子を数値解析的に確認し、実験的にも球状の均一なサイズを持つ酸化亜鉛ナノ粒子フィルムにおいて誘起されるレーザー発振モードを制御できる事を示唆する結果を得ている。

本研究では、これらの知見を基に、光学特性を制御した不規則構造を基板表面上に多層化する事で入射光に対する空間的なインピーダンス整合を実現し、吸収を持つ周辺媒質や散乱体を使用する事により、広い受光角・スペクトル帯域をもつ新しい表面光捕集構造を実現出来ると考え、本申請に至った。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに私が提案を行って来た不規則構造中の局在モード制御技術を基に、異なる光学特性を持つ不規則構造の多層化と多重散乱による光局在効果の相乗効果を利用した新しい表面光捕集構造の提案・開発を行う事を目的とした。このため当初の計画では、基板表面の不規則構造の散乱体サイズや濃度、材質等の空間分布条件について数値解析的に条件探索を行い、最適な構造作製条件の指針を得るとともに、その特性を実験的に評価する事によって、安価・簡便・大面積に実現可能な新しい表面ナノ構造の開発のための指針を得る事を目指した。

3. 研究の方法

本研究提案遂行のため、当初の計画では、入射光のインピーダンス整合を考慮したランダム構造中の散乱体サイズや濃度等の

最適な構造条件の探索、構造試作およびその光学特性の実験的評価、および、表面に構造を作製したデバイスの効率評価による検証を行う事が重要であると考えた。

期間前半において、数値解析的に複数の共鳴散乱体を用いた最適な光捕集用の多層ランダム構造条件(散乱体の空間分布、粒径、濃度、吸収体等)の探索を行うとともに、得られた結果を基に多層不規則構造の試作を行う予定であった。その後、試作した多層不規則構造の光学特性についての反射・透過・吸収スペクトルの測定を行い、試作試料の散乱体サイズや濃度、屈折率、含有する色素濃度等のパラメータ変化に対する光学特性の変化を、研究室既存の白色光源と積分球を用いて実験的に検証する事によって、安価・簡便・大面積に実現可能な新しい表面ナノ構造の開発のための指針を得る事を目指した。

4. 研究成果

(1)局在モード制御技術の構造パラメータ依存性の検証

本課題のアイデアの基となったランダム構造中の欠陥領域による局在モード制御技術(図1)の数値解析的な提案に対して、その実験的な検証研究に著しい進捗があった。本課題の当初計画には無かったものの、密接に関連する重要な実験課題であるため、検証実験を本課題内において行った。実験では、既にランダムレーザー発振の報告が多数ある酸化亜鉛(ZnO)ナノ粒子を用い、従来のランダムレーザー発振特性との違いを明らかにする事で本手法の有効性を示唆するデータを得ている。本課題では特に、散乱体や欠陥のサイズ等の構造パラメータによる発振モードの制御性に関して検証を行った。

これまでの数値解析的な制御手法の提案では、ランダム構造中の個々の散乱体粒子の共鳴特性に従って、局在モードやレーザー発振波長が変化すると期待される。散乱体サイズ制御によるレーザー発振波長制御を実験的に検証するため、液中レーザー溶融法を用いて異なる粒径をもつ球状 ZnO ナノ粒子の作製条件の探索を行い、3種類の粒径(図2, 平均粒径 223, 234, 303 nm)をもつ球状 ZnO ナノ粒子の作製に成功した(九大・辻剛志助教(現島大・准教授)との共同研究)。この試料に欠陥として蛍光微粒子を混入したフィルムを作製した。蛍光微粒子の使用により、フィルム内における欠陥位置を蛍光画像から確認した(図3(a))。図3(b,c)はそれぞれ、欠陥粒子(図中矢印)を含んだ球状 ZnO ナノ粒子フィルムと市販 ZnO ナノ粒子フィル

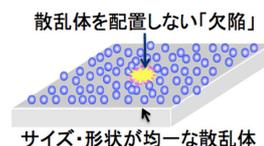


図1 光局在モード制御の概念図。散乱体の共鳴特性に一致した周波数において欠陥領域に束縛される局在モードを誘起する。

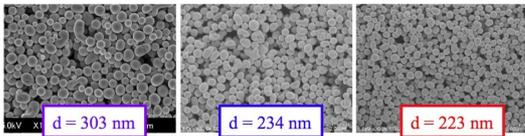


図2 作製した球状 ZnO ナノ粒子の SEM 像 .

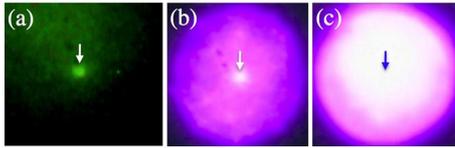


図3 (a)球状 ZnO ナノ粒子フィルムの蛍光像 . (b)球状 ZnO ナノ粒子および(c)市販 ZnO ナノ粒子フィルムにおけるランダムレーザー発振像 . 図中の矢印が欠陥微粒子の位置を示す .

ムにおけるランダムレーザー発振画像である。これらの結果を比べると、球状 ZnO ナノ粒子フィルムにおいてのみ、欠陥領域に強く束縛されたレーザー発振スポットが観測されることから、ナノ粒子の球状化・サイズの均一化により、散乱体の共鳴特性に一致した光が欠陥領域に強く閉じ込められた結果、レーザー発振が誘起されていると理解できる。

この散乱体サイズの影響を検証するため、粒径 223, 234 nm の球状 ZnO ナノ粒子フィルムの欠陥における発光スペクトル測定を行った。図4に観測される典型的な発振スペクトルを示す。一般的なランダムレーザー発振の特徴(マルチピーク、最大利得波長でのナローイング)とは異なり、最大利得と異なる波長においてほぼ単一モードのレーザー発振が誘起され、サイズに応じて発振波長が変化する様子が確認できる。また、同様の実験を繰り返し、発振ピークとしきい値の散布図を作成した結果を図5に示す。従来のランダムレーザー発振()とは異なり、しきい値の低下や発振波長のブルーシフトが見られ、発振ピーク数もほぼ単一のスペクトル形状が得られている。また、発振ピーク波長が球状粒子サイズの減少に伴い、ブルーシフトする傾向を示し、球状粒子の共鳴特性の変化と良い一致を示す事が明らかとなった。一方、平均粒径 303nm の粒子では、励起光強度が 100 MW/cm² 以上でもレーザー発振が誘起されなかった事から、ZnO 粒子サイズの増大により、ナノ粒子の共鳴特性と ZnO の利得スペクトルのオーバーラップが無くなったため、303nm の粒子では発振が確認できなかったと考えられる。これらの結果から、散乱体粒子サイズの調整により、局在モードやレーザー発振波長を制御可能である事が明らかとなった。

また、散乱体サイズだけでなく、欠陥サイズのレーザー発振特性への影響についても検討を行った。実験では、散乱体サイズを粒径 234 nm に固定し、導入する欠陥粒子サイズを各 300, 900, 2000 nm とした場合のレーザー発振スペクトル測定を繰り返し行い、発振波長やしきい値、発振ピーク数の解析を行った。図6に各欠陥サイズに対する発振波長としきい値の散布図を示す。通常のランダム

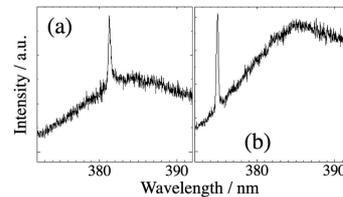


図4 球状 ZnO ナノ粒子フィルム内の欠陥におけるランダムレーザー発振スペクトル . 球状 ZnO ナノ粒子サイズ : (a) 234 nm, (b) 223 nm .

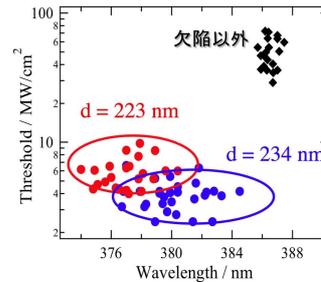


図5 球状 ZnO ナノ粒子フィルムの欠陥におけるレーザー発振波長としきい値の散布図 .

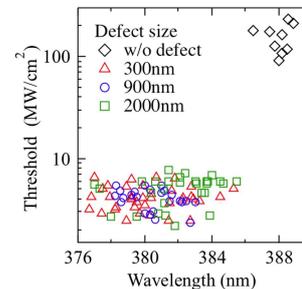


図6 各欠陥サイズに対する発振波長としきい値の散布図 .

レーザー発振()と比較して、低しきい値化およびブルーシフトが確認できるが、欠陥サイズの変化に対しては、波長、しきい値ともに変化が無い事が確認できる。この結果は、欠陥サイズによって発振波長や光閉じ込め効率が決定されるのではなく、球状 ZnO ナノ粒子の共鳴特性が発振波長等の特性を決定する重要な因子である事を示している。

図7は、各欠陥サイズにおける発振ピーク数のヒストグラムを示している。欠陥サイズは、それぞれ(a, d, g) 300 nm、(b, e, h) 900 nm、(c, f, i) 2000 nm とした。上段から励起光強度がしきい値の 1, 2, 3 倍でのヒストグラムを示している。また、図中の黒色のバーは Poisson 分布によるフィッティング結果を示している。得られたヒストグラムが Poisson 分布と良く一致し、どの励起光強度においても欠陥サイズが小さくなるに従い、平均発振ピーク数が減少する様子が確認できる。以上の結果から、発振波長は周辺の球状 ZnO ナノ粒子の共鳴特性によって決定され、発振ピーク数は導入した欠陥粒子サイズによって決定される事が実験的に明らかとなった。これらの結果は、散乱体の共鳴特性や意図的な欠陥の導入により、ランダム構造においても自在に光学特性を制御できる可能性を示す重要な知見を与えるものと考えている。

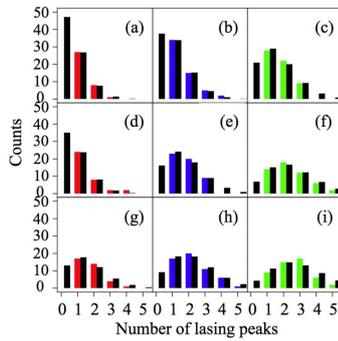


図7 各欠陥サイズにおける発振ピーク数のヒストグラム．欠陥サイズ：(a,d,g) 300, (b,e,h) 900, (c,f,i) 2000 nm．励起光強度は上段からしきい値の1, 2, 3倍と変化している．カラー、黒色バーはそれぞれ実験結果とフィッティング結果を示す．

(2) 温度依存性の測定によるランダムレーザー発振メカニズムの解明

これまでに球状ナノ粒子と意図的な欠陥の導入によって従来のランダムレーザーとは全く異なる挙動を確認した。特にしきい値が従来報告よりも1桁以上低くなる事から、従来のZnOナノ粒子におけるランダムレーザーとはメカニズム自身が異なる可能性が考えられる。この発振メカニズムを明らかにするため、周辺温度を変えながらランダムレーザー発振の測定を行い、発振状態の解析を行った(群馬大・中村俊博助教との共同研究)。

図8は、温度を変えながら測定を行った結果を示しており、図8aが発振ピークエネルギー、図8bがしきい値キャリア密度を示している。図中の○が市販粒子を用いた一般的なランダムレーザー発振、●が球状ZnOナノ粒子を用いたランダムレーザー発振の結果である。また、図a中の破線($E_{g,max}$)および図b中の破線(n_{th}^{cal})は、バルクZnOのデータから計算した利得の最大波長とキャリア密度のしきい値を示し、点線(E_x)は励起子エネルギーの位置を示している。従来のランダムレーザーの結果は、共振器を考慮しないZnOの物質定数のみから計算される結果と良く一致しており、最大利得においてレーザー発振が誘起されている。また、Mott転移密度よりも十分高いキャリア密度においてレーザー発振が誘起される事から、既に報告されている様に電子-ホールのプラズマ状態がレーザー発振の原因であると言える。一方、球状ナノ粒子を用いたランダムレーザーの結果では、低温では従来のランダムレーザー発振と一致する傾向にあるものの、高温側では発振波長が励起子エネルギーに近づくとともに、しきい値キャリア密度もMott転移密度に近づいていく様子が確認できる。この結果は、球状ナノ粒子を用いたランダムレーザーでは、励起子状態に由来している事を示唆しており、従来のランダムレーザーとは発振メカニズムが異なる事が明らかとなった。

以上の結果は、球状ナノ粒子および意図的な欠陥の導入によってランダム構造中に高Q値の局在モードが存在し、このモード中にお

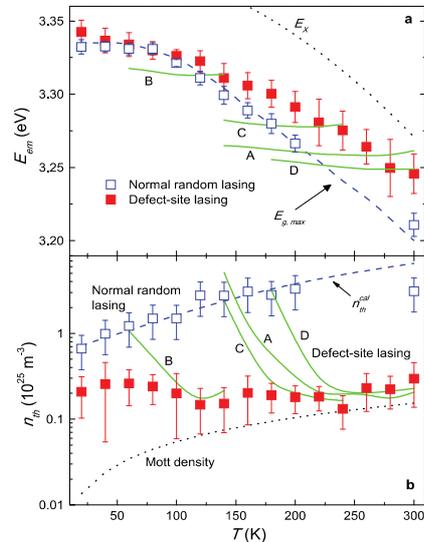


図8 (a)発振ピークエネルギー、(b)しきい値キャリア密度の温度依存性．○：球状ZnOナノ粒子フィルム、●：市販ZnOナノ粒子フィルム．

いて励起子状態に由来したレーザー発振が誘起される事を示唆していると考えられる。

(3) ダイヤモンドナノ粒子フィルムにおける新規UVランダムレーザーの観測

局在モード制御手法の更なる検証に向け、他材料を用いた実験を行うため、ダイヤモンドナノ粒子に注目し、これまでに報告例の無い紫外ランダムレーザーの観測に成功した。ダイヤモンドは、光学的に高い透明性と屈折率を持つだけでなく、高熱伝導率、高絶縁破壊電界、高キャリア移動度等の優れた性能を示すため、特に高速動作、高出力動作、高耐熱性のデバイスとして幅広い分野で注目されている。このため、ダイヤモンド関連の既存電子・光学技術との融合によって、将来的に学術的にも産業的にも展開を期待できると考え、本課題内での検証を行った。

市販ダイヤモンドナノ粒子(平均粒径25nm)を散乱体かつ利得媒質として用いた。ナノ粒子表面の sp^2 層を除去するため、先行研究の焼成条件を参考に加熱処理(425℃、5時間、空気中)を行った後、ヘキサシランに分散したものをガラス基板上に滴下・乾燥させた。励起光としてLDパルスレーザー(355nm、1kHz、100ps)を使用し、ダイヤモンドナノ粒子フィルムからの発光スペクトルと発光ピーク強度の励起光強度依存性を測定した。

図9は、加熱処理前後のダイヤモンドナノ

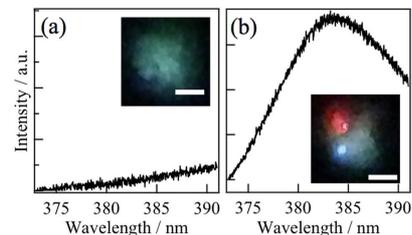


図9 (a,b)加熱処理前後のダイヤモンドナノ粒子フィルムの発光スペクトル．挿入図：発光画像．

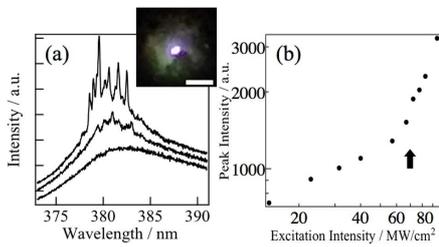


図 10 ダイヤモンドナノ粒子フィルム中での (a)レーザー発振スペクトルと(b)発振ピーク強度の励起光強度依存性．挿入図は発振画像を示す．

粒子フィルムにおける発光スペクトルと発光画像を示している。加熱処理前の試料では、380nm 付近の青色の発光を確認できなかったが、加熱処理後では青色に発光するスポットを観測した。図 10 は、青色スポットにおいて、励起光強度を変化させた場合のスペクトルとピーク強度の励起光強度依存性を示している。青色スポットにおいて離散的なシャープな発光ピークが現れる様子を確認し、励起光強度に対してしきい値が存在する事を確認した。異なる場所において繰り返し同様の測定を行った結果、加熱処理前の試料ではレーザー発振は確認されず、加熱後の試料においてのみ同様の挙動を確認した。Gorelikらの先行研究では、N₂ センターにおいて 380nm 付近の発光が観測されると報告しており、今回観測した発光スペクトルと良く一致している。つまり、加熱処理によりナノ粒子表面の sp² 層が除去され、sp² 層による発光抑制が無くなった結果、N₂ センターに由来したランダムレーザー発振が観測されたものと考えられる。これらの結果は、今まで報告の無い、ダイヤモンドナノ粒子フィルムでの紫外域 (~380 nm) のランダムレーザー発振を確認したものであり、ダイヤモンドナノ粒子に基づく新たな発光デバイスの可能性を示唆する重要な結果であると考えている。

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 12 件)

1. H. Takashima, K. Kitajima, Y. Tanaka, H. Fujiwara, and K. Sasaki, Efficient optical coupling into a single plasmonic nanostructure using a fiber-coupled microspherical cavity, *Phys. Rev. A* **89**, 021801 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevA.89.021801 査読有
2. T. Tsuji, Y. Higashi, M. Tsuji, H. Fujiwara, Y. Ishikawa, and N. Koshizaki, Fabrication of Spherical-Shaped Submicron Particles of ZnO Using Laser-induced Melting of Submicron-sized Source Materials, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* **8**, 292-295 (2013). DOI: 10.2961/jlmn.2013.03.0017 査読有
3. F. Ren, H. Takashima, Y. Tanaka, H. Fujiwara, and K. Sasaki, Two-photon

excited fluorescence from a PIC-attached Au-coated tip via a thin tapered fiber under a weak CW excitation, *Opt. Express* **21**, 27759-27769 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.027759 査読有

4. Y. Nishijima, J. B. Khurgin, L. Rosa, H. Fujiwara, and S. Juodkakis, Randomization of gold nano-brick arrays: a tool for SERS enhancement, *Opt. Express* **21**, 13502-13514 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.013502 査読有
5. H. Fujiwara, R. Niyuki, Y. Ishikawa, N. Koshizaki, T. Tsuji, K. Sasaki, Low-threshold and quasi-single-mode random laser within a submicrometer-sized ZnO spherical particle film, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 61110 (2013). DOI: 10.1063/1.4792349 査読有
6. H. Fujiwara, R. Niyuki, Y. Ishikawa, N. Koshizaki, T. Tsuji, K. Sasaki, Quasi-single-mode random lasing within a ZnO nanoparticle film, *Proc. SPIE* **8599**, 859912 (2013). DOI: 10.1117/12.2003372 査読有
7. T. Chiba, J. Qi, H. Fujiwara, K. Sasaki, Analysis of Trap State Dynamics of Single CdSe/ZnS Quantum Dots on an Indium Tin Oxide Thin Film with Applying External Electric Field, *J. Phys. Chem. C* **117**, 2507-2510 (2013). DOI: 10.1021/jp306408s 査読有
8. T. Tsuji, Y. Higashi, M. Tsuji, H. Fujiwara, N. Koshizaki, and Y. Ishikawa, Fabrication of Spherical Particles Using Laser-induced Melting of Submicron-sized Materials, *Proceedings of The 14th International Symposium on Laser Precision Microfabrication* **14**, 205-205 (2013). 査読無
9. Y. Higashi, T. Tsuji, M. Tsuji, H. Fujiwara, N. Koshizaki, and Y. Ishikawa, Fabrication of Spherical-Shaped Submicron Particles of ZnO Using Laser-induced Melting of Submicron-sized Source Materials, *Proceedings of The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim* **10**, WPE-12 (2013). 査読無
10. F. Ren, H. Takashima, Y. Tanaka, H. Fujiwara, and K. Sasaki, Nonlinear phenomena from a PIC attached gold tip using a plasmonic-whispering gallery mode hybrid system, *Proc. SPIE* **8816**, 881612 (2013). DOI: 10.1117/12.2022626 査読有
11. T. Chiba, H. Fujiwara, J. Hotta, S. Takeuchi, and K. Sasaki, Experimental evaluation of diffusion constant in a thin polymer film by triplet lifetime analysis of single molecules, *J. Photochem. & Photobiol. A* **238**, 24-28 (2012). DOI: 10.1016/j.jphotochem.2012.04.013 査読有

12. F. Ren, K. Kitajima, H. Takashima, H. Fujiwara, and K. Sasaki, "Second harmonic generation from the top of an Au-coated tip via a tapered fiber coupled microsphere resonator", Proc. SPIE **8463**, 846305 (2012). DOI: 10.1117/12.929437 査読有

〔学会発表〕(計 39 件)

1. 藤原英樹, “酸化亜鉛サブミクロン球状粒子で光を操る～新奇ランダムレーザーの実現”, 東京工業大学応用セラミクス研究所共同利用研究ワークショップ (サブミクロン球状粒子の合成とその応用), 東工大田町キャンパス, 東京都港区 (2013/12/17). (招待講演)
2. H. Fujiwara, “Manipulation of photon localized fields within a random medium: realization of low-threshold and quasi-single-mode random laser”, The 14th RIES-Hokudai International Symposium “網 [mou]”, Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo (2013/12/11). (招待講演)
3. F. Ren, H. Takashima, Y. Tanaka, H. Fujiwara, and K. Sasaki, “Nonlinear phenomena from a PIC attached gold tip using a plasmonic-whispering gallery mode hybrid system”, SPIE Optics & Photonics, San Diego (2013/8/29).
4. T. Tsuji, Y. Higashi, M. Tsuji, H. Fujiwara, Y. Ishikawa, and N. Koshizaki, “Fabrication of Spherical-Shaped Submicron Particles of ZnO Using Laser-induced Melting of Submicron-sized Source Materials”, The 6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, TOKI MESSE Niigata Convention Center, Niigata (2013/7/25).
5. H. Fujiwara, Y. Tanaka, and K. Sasaki, “Direct imaging of localized fields in a gold nanostructure using a scattering-type near-field microscope”, The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, International Conference Center, Kyoto (2013/7/4).
6. H. Fujiwara, R. Niyuki, T. Tsuji, Y. Ishikawa, N. Koshizaki, and K. Sasaki, “Quasi-single mode random laser”, Collaborative Conference on Materials Research, Ramada Plaza Jeju Hotel, South Korea (2013/6/27). (招待講演)
7. 藤原英樹, “ZnO ナノ粒子薄膜からの疑似単一モードランダムレーザー発振”, 日本化学会第 93 春季年会, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス, 草津市 (2013/3/22). (招待講演)
8. H. Fujiwara, R. Niyuki, Y. Ishikawa, N. Koshizaki, T. Tsuji, and K. Sasaki, “Quasi-single-mode random lasing within a ZnO nanoparticle film”, SPIE Photonics West, Moscone center, San Francisco, USA

(2013/2/4).

9. F. Ren, H. Takashima, K. Kitajima, H. Fujiwara, and K. Sasaki, “Second harmonic generation from the top of an Au-coated tip via a tapered fiber coupled microsphere resonator”, SPIE Optics+Photonics, San Diego convention center, USA (2012/8/14).
10. 藤原英樹, “ランダムな構造で光を操る～ランダムレーザー発振の制御”, 第 2 回光科学異分野横断萌芽研究会, 岡崎コンファレンスセンター, 岡崎市 (2012/8/7). (招待講演)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: ランダムレーザー素子とその作製方法
 発明者: 藤原英樹、笹木敬司、辻剛志、越崎直人、石川善恵
 権利者: 同上
 種類: 特許
 番号: 特願 2012-183134
 出願年月日: 平成 24 年 8 月 22 日
 国内外の別: 国内

〔その他〕

【ホームページ】

<http://optsys.es.hokudai.ac.jp/~optsys/>

【新聞記事等】

1. 2013 年 9 月「ランダムレーザーで良好な発振を実現 - 球状のサブマイクロ粒子が成功のカギ」Laser Focus World Japan 2013.9 (研究室探訪), 16-17, (2013)
2. 2013 年 2 月 14 日「発振特性優れるランダムレーザー素子開発、ZnO 粒子利用」化学工業日報
3. 2013 年 2 月 13 日「酸化亜鉛のサブマイクロ粒子、ランダムレーザー素子に」日刊工業新聞
4. 2013 年 2 月 12 日「酸化亜鉛粒子を用いた発振特性に優れたランダムレーザー素子を開発」産総研プレスリリース http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2013/pr20130212/pr20130212.html
5. 2013 年 2 月 12 日「酸化亜鉛粒子を用いた発振特性に優れたランダムレーザー素子を開発」日経電子板プレスリリース

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤原 英樹 (FUJIWARA HIDEKI)
 北海道大学・電子科学研究所・准教授
 研究者番号: 10374670

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし