

平成 22 年 5 月 14 日現在

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2007～2009

課題番号：19686009

研究課題名 (和文) 非線形フォトニック結晶による深紫外コヒーレント光源の開発

研究課題名 (英文) Nonlinear photonic crystals for deep ultraviolet coherent light sources

研究代表者

井上 振一郎 (SHIN-ICHIRO INOUE)

九州大学・先導物質化学研究所・助教

研究者番号：20391865

研究成果の概要 (和文)：本研究開発では、フォトニック結晶機能と高非線形性光学材料を融合させる新しい非線形 2 次元フォトニック結晶の創製を行った。非線形フォトニック結晶内において発現する非線形光学応答と特異な光分散関係 (群速度等) との相互関係を定量的に検証することによって、波長変換素子や 2 光子吸収素子などの非線形光学デバイスの性能を劇的に向上させることに成功した。さらに本原理を用いて、高効率・コンパクトな深紫外コヒーレント波長変換素子の動作実証に成功した。

研究成果の概要 (英文)：The aim of this research project is to fabricate nonlinear two-dimensional (2D) photonic crystals (PhCs) by proposing a new 2D PhC structure that combines PhC functions and highly nonlinear optical materials. We reveal a direct relationship between the observed nonlinear optical responses and the corresponding photonic band structure, and we show experimental evidence that the performance of nonlinear optical applications such as the wavelength conversion and two-photon absorption devices are dramatically improved in this structure. Moreover, by using this physical enhancement mechanism, we demonstrate the high-efficiency, compact deep-ultraviolet (DUV) coherent wavelength conversion devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2008年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2009年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
年度			
年度			
総計	19,100,000	5,730,000	24,830,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 応用光学・量子光学

キーワード：(1)フォトニック結晶 (2)非線形光学デバイス (3)第二高調波発生 (4)波長変換 (5)ナノ微細加工 (6)深紫外コヒーレント光源 (7)光バンド構造 (8)群速度制御

1. 研究開始当初の背景

深紫外波長（ここで200-340nmと定義）領域で発光する半導体レーザダイオードは技術的な困難さから未だ実現されていない。よって、高集積化・低消費電力化が可能な小型可視半導体レーザダイオードからの出力光を非線形光学効果により、非常に高い効率で波長変換することは、半導体発光素子としては未踏である深紫外波長領域の小型高性能コヒーレント光源を実現する上で必要不可欠であり、早急に取り組むべき重要課題である。これが達成されれば、小型深紫外レーザを用いた腫瘍細胞ナノサージェリや、蛋白質・DNA 深紫外高感度センシングといった、これまで適した小型光源が無く研究が進んでいなかった医療・バイオ分野における重要技術の開発が可能になり、さらにはDVDなど光記録の高密度化、PCB等の環境汚染物質の深紫外光触媒処理の新たな光源としての適用など、産業分野への多大な貢献も期待できる。

しかし従来型の擬似位相整合（QPM）型波長変換デバイスでは、可視域で実用化に成功しているものの、深紫外領域では、短周期の分極反転が極めて難しく、これまで深紫外領域の高効率な素子の開発は実現されていない。またバルク非線形結晶を用いた波長変換では、位相整合条件を満たすことはできるものの、極めて相互作用が弱く、高効率動作のためには高出力な大型固体レーザが必要となり小型化は不可能である。よって現状の波長変換素子開発の延長においては、深紫外小型コヒーレント光源を実現することは現実的に困難であり、新しい原理に基づく新規デバイスが求められていた。

2. 研究の目的

本研究は、光と物質との間の相互作用を高度制御する非線形フォトニック結晶を用いることによって、新たなアプローチからこれまで存在しなかった深紫外小型高性能コヒーレント光源の実現につながる基本素子の開発を目指した。

より具体的には、極めて高い非線形光学性能を有するニオブ酸リチウム単結晶及び非線形光学ポリマーを用いた非線形2次元フォトニック結晶素子を作製し、フォトニック結晶内における非線形（波長変換）特性と特異な光分散関係（低群速度等）との相互関係を定量的に検証し、どのような光分散制御が従来性能限界を打破する新しい光非線形機能を発現させ高性能化につながるのか解明することを目的とする。さらに、極めて遅い群速度と新しいタイプの位相制御を併せて達成した波長変換効率の増強効果を世界に先駆け実験的に実証することを目標とした。

3. 研究の方法

本研究は、フォトニック結晶機能と非線形光学機能とを融合させた非線形性2次元フォトニック結晶を創製することにより、フォトニック結晶内における第2高調波発生などの非線形光学特性と特異な光分散関係（群速度等）との相互関係を定量的に検証することによって、これまででない位相制御と低群速度を併せて実現した超小型・高性能な波長変換型の深紫外レーザの基本素子を世界に先駆け開発し動作実証することを目指した。これを実現するためには、①. 高非線形性材料の極微細領域での難加工性の問題、②. 素子の光バンド構造（光分散関係）の正確な制御技術の確立、③. 低群速度（スローライト）の実験的な実現とその制御、という大きな技術的障壁があった。これらの課題に対し、本研究は、①. 非線形特性に優れた高非線形性光学材料及び光非線形機能を制御する2次元フォトニック結晶の融合構造からなる素子構造を用いて、高精度な素子作製を実現し、②. 独自に開発した実験的（角度分解反射分光バンド測定法）・理論的（非線形3次元時間領域有限差分法）手法を用いて、光のバンド構造（光分散関係）を高精度に計測・制御し、③. さらに提案構造を活かした高精度素子作製技術と光バンド制御技術により低群速度（スローライト）を実験的に実デバイス中で実現・観測することで、課題の解決を図った。

4. 研究成果

（1）本研究では、高非線形性材料の難加工性の問題を克服するため、従来と異なるまったく新しい非線形フォトニック結晶素子構造を提案した。本提案は2次元フォトニック結晶スラブ層と非線形光学結晶層を上下に分離・結合させた独自の素子構造を用いることを特徴とする。高非線形性光学材料として LiNbO_3 単結晶を用いた非線形2次元フォトニック結晶素子の作製結果を図1に示す。超難加工性材料である LiNbO_3 単結晶を使用しても、本研究で提案した素子構造を用いることによって、高精度な非線形2次元フォトニック結晶素子の作製に成功した。

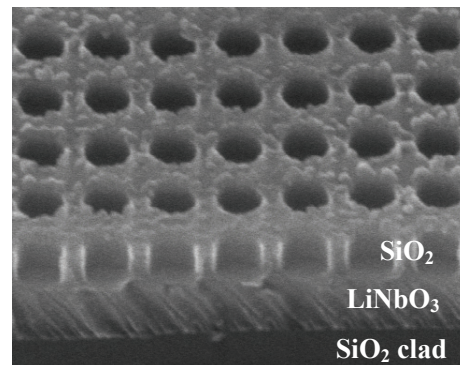


図1. LiNbO_3 単結晶を用いた非線形2次元フォトニック結晶素子の断面SEM像

高非線形性材料の難加工性の問題を克服する独自の素子構造と LiNbO_3 単結晶を波長レベルの厚みまで研磨する技術の開発によって、超難加工性材料である LiNbO_3 単結晶を使用しても、設計通りの断面素子構造が得られていることが分かる。

(2) フォトニック結晶による光バンド分散制御を活用することで、非線形光学効果を著しく増大できる可能性があるが、この効果を実際のデバイスに対する確に適用していくためには、いかに精度良く光バンドを計測・操作し、狙いの光分散状態を実現するかが重要となる。しかし通常、ライトライン下側のモードは外部光と結合しないため、これまで外部から直接的に導波モードの光バンド構造を観測した例はなかった。本研究では、この問題を解決するため、分光角度分解ブリズム結合技術により非線形2次元フォトニック結晶内部の導波モードを外部から直接観測する新たな手法を開発し、ブリルアンゾーン全域に亘って実験的な光バンド構造を正確に測定することに成功した。

(3) 最も代表的な高非線形性材料であり、且つ難加工性材料であるニオブ酸リチウムを使用して、非線形2次元フォトニック結晶を作製し、光バンド制御による第二高調波発生 (SHG) の明瞭なエンハンスメントの観測に成功した。スローライトバンドに共鳴する運動量 (k ベクトル) において、バルク素子と比較し300倍以上のSHG強度増大を観測した(図2)。この非線形2次元フォトニック結晶中で実験的に実証されたSHGのエンハンスメント効果は、波長変換効率を劇的に向上させるため、相互作用が弱く高効率な動作が従来困難であった波長領域(深紫外光領域など)でも実用レベルの波長変換素子を実現できる可能性を示している。

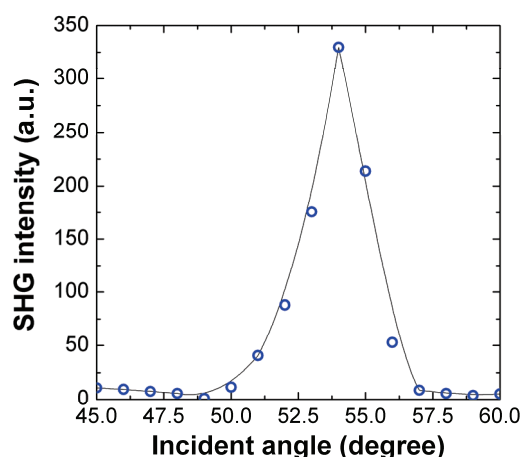


図2. LiNbO_3 非線形2次元フォトニック結晶素子に対する第二高調波発生 (SHG) の入射角度依存性

(4) 3次の非線形光学効果である2光子吸収励起過程は回折限界以下の解像度と3次元的空间選択性が得られるため、次世代の超高密度な3次元光メモリや立体的な蛍光イメージング、3次元ナノ・マイクロソグラフィなど、様々な応用分野でその利活用が期待されている。しかしながら一般的な2光子吸収材料の励起効率は極めて低く、広く実用化されるには至っていない。本研究において、高い2光子吸収断面積を有する bis(styryl) benzene 誘導体分子をドーパした非線形光学ポリマー材料を用いて、非線形2次元フォトニック結晶を作製し、人工的に物質内の群速度を制御することにより、光と物質間の非線形相互作用を増強させ、2光子吸収励起に伴う蛍光強度を100倍以上大きく増大させることに成功した。実験的な光バンド構造解析と角度分解2光子励起蛍光強度測定を組み合わせることで、2光子吸収過程の増強効果が光バンド共鳴及び低群速度効果に起因することを直接的に実証した。この2光子吸収効率の向上結果は、2光子吸収断面積 $\sigma^{(2)}$ の値として90000 GM という極めて大きな値に相当し、本素子が2光子吸収デバイスの大幅な高性能化に対し極めて有効であることを明確に立証した。

(5) 以上の検証結果を十分に活用し、深紫外領域における小型・高性能な波長変換コヒーレント光源素子の開発・動作実証を行った。本研究では、高非線形性ニオブ酸リチウム単結晶の2次元 $\chi^{(2)}$ 周期制御と非線形2次元フォトニック結晶構造とを組み合わせることで、位相整合させた面内導波型の高効率・波長変換素子を開発した。第二高調波発生 (SHG) の評価実験を行った結果、素子長1.0 mm以下の小型デバイスでも、深紫外波長領域(325nm)で10%/W以上の高い変換効率を得ることに成功し、蛍光体を使って肉眼でははっきりと視認できる強い深紫外コヒーレント光の発生を確認した。

以上により、研究当初に掲げた目標は全て達成された。本研究は、高非線形性光学材料を用いた非線形2次元フォトニック結晶素子を独自の素子構造を用いることで高精度に創製し、且つ、本素子により波長変換デバイスや2光子励起蛍光デバイスなどの性能を大幅に向上できることを示した。この新たな高効率波長変換技術の開発によって、相互作用が弱く高効率な動作が従来困難であった波長領域(深紫外光領域など)でも実用レベルの波長変換が可能となり、半導体LDでは実現できていない小型高性能な未踏波長コヒーレント光源開発実現の可能性が開かれた。

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 13件)

- [1] A. Inoue, S. Inoue, H. Miki, I. Aoki, A. Otomo, and S. Yokoyama, "Enhanced Electro-optic Response of a Poled Polymer in a Reflective Microcavity", *Optical Communications*, (2010) in press.
- [2] K. Sasaki, S. Inoue, K. Nishio, H. Masuda, A. Otomo, and S. Yokoyama, "Polymer Micro-structure Embedded in Two-Dimensional Photonic Crystals", *Opt. Mater.*, **32**, 543-546 (2010).
- [3] S. Inoue and S. Yokoyama, "Numerical simulation of an ultra-compact electro-optic modulator based on nanoscale plasmon metal gap waveguides", *Electron. Lett.*, **45**, 1087-1089 (2009).
- [4] S. Inoue and S. Yokoyama, "Nonlinear optical responses in Two-dimensional photonic crystals", *Thin Solid Films*, **518**, 470-472 (2009).
- [5] S. Inoue, and S. Yokoyama, "Enhancing the two-photon excited fluorescence by two-dimensional nonlinear optical-polymer photonic crystals", *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* **7212**, 721311I-8 (2009).
- [6] S. Inoue, and S. Yokoyama, "Highly compact organic electro-optic modulator based on nanoscale plasmon metal gap waveguides", *Proc. SPIE*, **7631**, 763128 (2009).
- [7] X. Piao, S. Inoue, S. Yokoyama, H. Miki, I. Aoki, A. Otomo and H. Tazawa, "Synthesis and characterization of binary chromophore polymers for electro-optic application", *Thin Solid Films*, **518**, 481-484 (2009).
- [8] A. Inoue, S. Inoue, and S. Yokoyama, "Reflective planar microcavity with enhanced electro-optic activity of a poled polymer", *Proc. SPIE*, **7631**, 763129-1-6 (2009).
- [9] A. Inoue, S. Inoue, S. Yokoyama, K. Kojima, K. Yasui, M. Ozawa, and K. Odoi, "One dimensional polymeric photonic crystal doped with second-order nonlinear optical chromophore", *Proc. SPIE*, **7213**, 72131C (2009).
- [10] S. Inoue and S. Yokoyama, "Enhancement of two-photon excited fluorescence in two-dimensional nonlinear optical polymer photonic crystal waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 11110 1-3 (2008).
- [11] S. Inoue, S. Yokoyama, and Y. Aoyagi,

"Direct determination of photonic band structure for waveguiding modes in two-dimensional photonic crystals", *Opt. Express*, **16**, 2461-2468 (2008).

[12] S. Yokoyama, S. Inoue, and K. Sasaki, "Two-photon polymer laser writing in the photonic crystal", *Proc. SPIE*, **7049**, K490-K490 (2008).

[13] M. Okinaka, S. Inoue, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, "Defect-free two-dimensional-photonic crystal structures on a nonlinear optical polymer patterned by nanoimprint lithography", *J. Vac. Sci. Technol. B*, **25**, 899-901 (2007).

〔学会発表〕(計 34件)

- [1] S. Yokoyama, X. Piao, A. Inoue, X. Zhang, S. Inoue, "Hyperbranched Polymer for Electro-optic (EO) and Photonic Crystal Applications" SPIE, Photonic West, (San Francisco) (27 Jan 2010)
- [2] S. Inoue, and S. Yokoyama, "Highly compact organic electro-optic modulator based on nanoscale plasmon metal gap waveguides" ACP 2009 (Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition), Shanghai, China. Nov. 4-6 (2009)
- [3] 井上振一郎、横山士吉、"超コンパクト・電気光学 (EO) 光変調器のナノスケール Gap-SPP 導波路に基づく理論提案"、第70回応用物理学会学術講演会(富山市)(2009年9月10日)
- [4] 井上振一郎、横山士吉、"高分子2次元フォトニック結晶による非線形光学デバイスの開発"、日本化学会第89会春季年会(船橋市)(2009年3月28日)
- [5] S. Inoue and S. Yokoyama, "Enhancing the two-photon excited fluorescence by two-dimensional nonlinear optical-polymer photonic crystals", *Photonics West 2009* (San Jose) (28 Jan 2009)
- [6] A. Inoue, S. Inoue, and S. Yokoyama, "Reflective planar microcavity with enhanced electro-optic activity of a poled polymer" ACP 2009 (Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition), Shanghai, China. Nov. 4-6 (2009)
- [7] S. Yokoyama, X. Piao, X. Zhang, Y. Mori, A. Inoue, and S. Inoue, "Electro-Optic (EO) Host-Guest Hyperbranched Polymer over 100 pm/V" IUPAC 5th International Symposium on Novel Materials and Synthesis, 2009. 10. 20.
- [8] X. Piao, Y. Mori, S. Inoue, and S. Yokoyama, "Application of Hyper-Branch

Polymer for Electro-Optic Application” IUPAC 5th International Symposium on Novel Materials and Synthesis, 2009.10.20.

[9] X. Piao, 井上振一郎、横山士吉、三木秀樹、青木勲、大友明, Synthesis and Characterization of FTC Acceptor-based Nonlinear Chromophores, 第 58 回高分子討論会, 2009. 9. 18

[10] 井上梓、井上振一郎、横山士吉、安井圭、小澤雅昭, 反射型多層膜共振器を用いた電気光学ポリマーの非線形光学効果の増大, 第 58 回高分子討論会, 2009. 9. 18

[11] 森裕一、X.Piao、井上振一郎、横山士吉、青木勲、大友明, ハイパーブランチポリマーを用いた電気光学材料の合成, 第 58 回高分子討論会, 2009. 9. 18

[12] 村田幸司、X.Piao、井上振一郎、横山士吉、青木勲、大友明、田澤英久, FTC 側鎖型電気光学高分子の合成と光学特性の解析, 第 58 回高分子討論会, 2009. 9. 18

[13] A. Inoue, S. Inoue, S. Yokoyama, K. Kojima, K. Yasui, M. Ozawa, and K. Odoi, “One dimensional polymeric photonic crystal doped with second-order nonlinear optical chromophore”, Photonics West 2009 (San Jose) (28 Jan 2009)

[14] S. Inoue and S. Yokoyama, “Nonlinear Optical Responses in Polymer Two-Dimensional Photonic Crystals”, ICNME2008 (8th International Conference on Nano-Molecular Electronics) (Kobe) (16 Dec 2008)

[15] S. Inoue and S. Yokoyama, “Enhancement of Two-Photon Excited Fluorescence using Two-Dimensional Photonic Crystals”, SSDM2008 (Solid State Devices and Materials 2008) (Tsukuba) (26 Sep 2008)

[16] 井上振一郎、横山士吉, “高非線形光学ポリマー2次元フォトリソニック結晶による2光子吸収励起蛍光強度の増強効果”, 第 69 回応用物理学会学術講演会 (春日井市) (2008 年 9 月 5 日)

[17] 井上振一郎、横山士吉, “高分子非線形光学材料とフォトリソニック結晶機能との融合による非線形光学デバイスの高効率化”, 日本化学会第 88 会春季年会 (東京) (2008 年 3 月 26 日)

[18] X. Piao, S. Inoue, S. Yokoyama, I. Aoki, H. Miki, A. Otomo, and H. Tazawa, “Synthesis and characterization of binary chromophore polymers for electro-optic application”, ICNME2008 (8th International Conference on Nano-Molecular Electronics) (Kobe) (17 Dec 2008)

[19] K. Murata, X. Piao, S. Inoue, S. Yokoyama, A. Otomo, I. Aoki, H. Miki, and

H. Tazawa, “Synthesis of electro-optic polymer based on MMA-MOI side-chain structure”, ICNME2008 (8th International Conference on Nano-Molecular Electronics) (Kobe) (17 Dec 2008)

[20] M. Koichi, S. Inoue, S. Yokoyama, I. Aoki, H. Miki, and A. Otomo, “Synthesis and characterization of molecular hyperpolarizability of novel p-electron conjugated chromophore for EO application”, ICNME2008 (8th International Conference on Nano-Molecular Electronics) (Kobe) (17 Dec 2008)

[21] K. Sasaki, S. Inoue, and S. Yokoyama, “Fabrication of photonic crystals and introduction of optical defects”, ICNME2008 (8th International Conference on Nano-Molecular Electronics) (Kobe) (17 Dec 2008)

[22] Y. Mori, S. Inoue, S. Yokoyama, K. Taketsuji, and A. Otomo, “Two-photon induced laser microfabrication using hyperbranched polymer”, ICNME2008 (8th International Conference on Nano-Molecular Electronics) (Kobe) (16 Dec 2008)

[23] A. Inoue, S. Inoue, S. Yokoyama, K. Yasui, M. Ozawa, and K. Odoi, “Poled electro-optic polymers using hyper-branched host materials”, ICNME2008 (8th International Conference on Nano-Molecular Electronics) (Kobe) (16 Dec 2008)

[24] S. Yokoyama and S. Inoue, “Two-photon polymer laser writing in the photonic crystal”, SPIE Optics and Photonics (San Jose) (14 Aug 2008)

[25] 森祐一、井上振一郎、横山士吉、竹辻耕治、大友明, “光機能性ハイパーブランチポリマーを用いた微細構造素子の評価”, 第 45 回化学関連支部合同九州大会 (北九州市) (2008 年 7 月 5 日)

[26] 佐々木謙亮、井上振一郎、横山士吉、西尾和之、益田秀樹, “二光子吸収高分子微細加工を用いた機能性フォトリソニック結晶の作製”, 第 45 回化学関連支部合同九州大会 (北九州市) (2008 年 7 月 5 日)

[27] 佐々木謙亮、井上振一郎、横山士吉、西尾和之、益田秀樹, “フォトリソニック結晶を用いた高分子複合型光素子の作製”, 第 57 回高分子学会年次大会 (横浜市) (2008 年 5 月 29 日)

[28] 森祐一、井上振一郎、横山士吉、竹辻耕治、大友明, “ハイパーブランチポリマーを用いた 2 光子吸収光造形の検討と高分子光デバイスの作製”, 第 57 回高分子学会年次大

会（横浜市）（2008年5月28日）
[29] 佐々木謙亮、井上振一郎、横山士吉、西尾和之、益田秀樹、“2光子吸収高分子光造形法によるフォトニック結晶複合素子の作製”、第6回ナノ学会（福岡市）（2008年5月8日）
[30] 森祐一、井上振一郎、横山士吉、竹辻耕治、大友明、“ハイパーブランチポリマーを用いた高分子微細構造素子の作製”、第6回ナノ学会（福岡市）（2008年5月7日）
[31] 横山士吉、井上振一郎 “高分子微細加工による光アクティブ・フォトニック結晶”、日本化学会第88会春季年会（東京）（2008年3月26日）
[32] 井上振一郎、横山士吉、青柳克信、“分極反転ドメインの選択的化学エッチングによるLiNbO3非線形フォトニック結晶の作製”、第68回応用物理学学会学術講演会（札幌市）（2007年9月8日）
[33] 井上振一郎、渡辺恒介、青柳克信、“2次元 $\chi(2)$ エンジニアリングによる紫外光領域LiNbO3 2次元非線形 $\chi(2)$ フォトニック結晶”、第54回応用物理学関係連合講演会（相模原市）（2007年3月27日）
[34] 横山士吉、井上振一郎、佐々木謙亮、森裕一、大友明、西尾和之、益田秀樹、“2光子吸収高分子造形による光アクティブ・フォトニック結晶の作製”、第57回高分子討論会（名古屋市）（2007年9月19日）

〔図書〕（計 1 件）

[1] 井上振一郎、横山士吉、急成長する光化学の最前線：高分子微細加工による光アクティブ・フォトニック結晶、『化学工業』化学工業社、60、786-793（2009）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 5 件）

名称：チオエステル基含有ハイパーブランチポリマー
発明者：永島英夫、横山士吉、井上振一郎、井上梓、小島圭介
権利者：同上
種類：特許
番号：特願 2009-016050
出願年月日：平成 21 年 1 月
国内外の別：国内

名称：機能性色素を含有する光学材料
発明者：横山士吉、井上振一郎、小澤雅昭、安井圭、大土井啓佑
権利者：同上
種類：特許
番号：特願 2008-318974
出願年月日：平成 20 年 12 月
国内外の別：国内

名称：2 光子吸収重合組成物及び光デバイス
発明者：横山士吉、井上振一郎、小澤雅昭、安井圭、大土井啓佑
権利者：同上
種類：特許
番号：特願 2008-230264
出願年月日：平成 20 年 9 月
国内外の別：国内

名称：フォトニック結晶
発明者：井上振一郎、梶川浩太郎、青柳克信
権利者：同上
種類：特許
番号：特願 2007-160407
出願年月日：平成 19 年 6 月
国内外の別：国内

名称：フォトニック結晶
発明者：井上振一郎、梶川浩太郎、青柳克信
権利者：同上
種類：特許
番号：特願 2007-71262
出願年月日：平成 19 年 3 月
国内外の別：国内

○取得状況（計 1 件）

名称：フォトニック結晶
発明者：井上振一郎、梶川浩太郎、青柳克信
権利者：同上
種類：特許
番号：特許第 3 9 9 8 0 6 4 号
出願年月日：平成 19 年 8 月 17 日
国内外の別：国内

〔その他〕

報道掲載：研究ハイライトに選出
[1] “Molecular imaging: Exciting fluorescence”、NPG (Nature Publishing Group) Asia Materials (Research Highlights) (2008年11月25日版)

6. 研究組織

(1) 研究代表者
井上 振一郎 (SHIN-ICHIRO INOUE)
九州大学・先端物質化学研究所・助教
(平成 22 年 4 月 1 日付 異動)
(現：情報通信研究機構・未来 ICT 研究センター・主任研究員)
研究者番号：2 0 3 9 1 8 6 5

(2) 研究分担者
無し

(3) 連携研究者
無し