

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20226002

研究課題名（和文） フォトニック結晶の動的制御と新機能の創出

研究課題名（英文） Dynamic control of photonic crystal for new functionality

研究代表者

野田 進 (NODA SUSUMU)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10208358

研究成果の概要（和文）：本研究では、フォトニック結晶の特性を時間領域で動的に制御することにより、新光機能を創出し、「フォトニック結晶ダイナミクス」とも呼ぶべき新しい学術分野構築のための基盤を築くことを目的として研究を行った。その結果、(1) 光ナノ共振器の Q 値の動的制御により、光パルスをナノ共振器へ捕獲、保持および放出すること、(2) フォトニック結晶光導波路の動的制御により、光パルスの波長を変化させるとともに、パルスを選択的に共振器に結合・放射させるなどの新たな機能を実証することに成功した。

研究成果の概要（英文）：The target of this project is to dynamically control photonic crystals to create new functionalities, and to develop a new academic field called: “*Dynamic Photonic Crystal*”. We have successfully demonstrated that (1) an optical pulse can be held effectively, and can be rapidly released on demand by the dynamic control of the Q factor of the photonic crystal nanocavity, and (2) the dynamic change of the characteristics of photonic crystal waveguides produces dynamic characteristic and behavior changes of photons propagating in the photonic crystals.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-------------|------------|-------------|
| 2008年度 | 34,300,000 | 10,290,000 | 44,590,000 |
| 2009年度 | 31,000,000 | 9,300,000 | 40,300,000 |
| 2010年度 | 32,400,000 | 9,720,000 | 42,120,000 |
| 2011年度 | 31,400,000 | 9,420,000 | 40,820,000 |
| 2012年度 | 31,000,000 | 9,300,000 | 40,300,000 |
| 総計 | 160,100,000 | 48,030,000 | 208,130,000 |

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・量子光工学

キーワード：フォトニック結晶、動的制御、波長変換、ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

フォトニック結晶は、光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ光ナノ構造体であり、様々な光制御が可能な材料として注目を集めている。研究代表者は、本研究開始前までに、フォトニック結晶工学の発展を目指し、高 Q 値光ナノ共振器の概念の提唱と実現など、様々な世界をリードする成果を挙げてき

た。

しかし、これらは、フォトニック結晶自身の性質が時間的に変化しない、静的なもののみを取り扱ってきた。そのため、一旦設計段階で特性を決めると、そのままその特性が決定してしまっていた。ここで、フォトニック結晶自身の性質を時間領域で動的に変化させることができると、光を一瞬の間止めてお

く、あるいは伝播する光パルスの波長を選択的に変化させるといった、様々なブレークスルーが生まれ、光科学分野のさらなる新しい展開が開けるものと期待される。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、研究代表者等は、フォトニック結晶の性質を時間領域で、動的に制御することにより、新しい光機能を実現することを目的として、研究をスタートさせた。具体的には、以下に示すような2つの課題を設定し、研究を進めてきた。

(1) 光ナノ共振器の Q 値の動的制御による光パルスの捕獲、保持および放出：

フォトニック結晶光ナノ共振器は、極微小領域に光を閉じ込める働きをもつ。その Q 値は、光閉じ込めの強さを表し、値が大きいほど、光を長く閉じ込めることが可能となる。本研究開始時点において、我々は、 Q 値 200 万を超えるナノ共振器を実現していたが、これは光波長程度の極微小領域に、 ~ 1.6 ns 間も光を留めることが可能となることを意味する。しかしながら Q 値が高いままであると、応答波長帯域は、 < 1 pm と極めて狭く、かつ、光パルスをナノ共振器に導入するために、光子寿命と同じ ~ 1.6 ns もの時間を要するため、応答時間が極めて遅くなるという問題が生じる。従って、重要なことは、光パルスをナノ共振器に導入するときには、 Q 値を十分に低くしておき、光パルスがナノ共振器に導入されるや否や、 Q 値を瞬間的に増加させ、光パルスがナノ共振器から逃げないようにすることである。また、必要とあれば、 Q 値をすばやく減少させ、速やかにナノ共振器から光を取り出すことが出来ることが重要である。このようなナノ共振器の Q 値の動的な制御が出来れば、伝播している光パルスを、ナノ共振器にて効率良く捕獲し、しばらくの間止めておき、必要とあれば、すばやく放出することが出来るようになるものと期待される。

(2) 導波路モードの動的制御による光パルス制御：

フォトニック結晶に設けた光導波路の特性を動的に変化させることが出来ると、導波路を伝播する光パルスそのものの性質や振る舞いをも動的に変化させることが可能となると期待される。例えば、導波路を伝播している光パルスのうち、いくつかのパルスの波長を選択的に変化させたり、さらに、その光パルスの進路を変化させたり、選択的にナノ共振器へ結合したりすることが出来るようになるものと期待される。

以上のように、フォトニック結晶の性質を瞬間的に変化させることにより、これまでに

ない全く新しい光機能の創出を目指し、フォトニック結晶の動的制御とそれによる新機能の創出、さらには新しい学問領域「フォトニック結晶ダイナミクス」の構築を目指した。

3. 研究の方法

試料作製：材料として、主に SOI (Silicon on Insulator) を用いた。電子ビーム露光、ICP エッチングによる加工により、シリコンフォトニック結晶の作製を行なった。

光学特性評価：波長 1550 nm 帯のファイバーレーザを光源として用い、光の一部を SHG 結晶に通し、波長 775 nm 帯の光に変換し、フォトニック結晶に照射することにより、非線形現象による動的制御を信号と同期して実現した。特性の評価には、強度測定、スペクトル測定、時間分解測定などを行った。

解析：大型計算機等を利用し、FDTD 法、モード結合理論などの解析手法を利用した。

4. 研究成果

(1) 光ナノ共振器の Q 値の動的制御による光パルスの捕獲、保持および放出

本研究において対象とした、光ナノ共振器の Q 値の動的制御の概念を図 1 に示す。ナノ共振器の Q 値は、共振器から自由空間への光の漏れで決まる Q_v と、導波路への漏れで決まる Q_m で決定されるが、この系の Q_m は、共振器から導波路の左側へ漏れた光波(青色実線)と、共振器から導波路の右側へ漏れ、ヘテロ界面(完全反射鏡)で反射された光波(青色破線)の干渉により決定される。この系における Q 値(Q_{total})は、モード結合理論によると以下のように表せる。

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_v} + \frac{1 + \cos \theta}{Q_{in0}}$$

ここで、 Q_{in0} は完全反射鏡がない場合の Q_m 、 θ は 2 光波の位相差である。 $Q_v \gg Q_{in0}$ とすると、 θ を $0 \rightarrow \pi \rightarrow 2\pi$ と変化させることにより、 Q 値は、 $Q_{in0}/2 \rightarrow Q_v \rightarrow Q_{in0}/2$ と変化させることが可能と考えられる。ここで位相差 θ は、共振器とヘテロ界面の間の導波路部分に制御パルス光を照射することによりキャリアを発生させ、屈折率を変化させることにより、ピコ秒程度の非常に短い時間で変化させることができる。また、Si のフォトニック結晶を考えると、励起キャリアの寿命が数 ns 以上もあるため、制御パルス光照射後も θ の変化を保持できる。この Q 値の動的な制御により、伝播している光パルスを、ナノ共振器にて効率良く捕獲し、しばらくの間止めておき、必要とあれば、すばやく放出することが出来るようになるものと期待される。

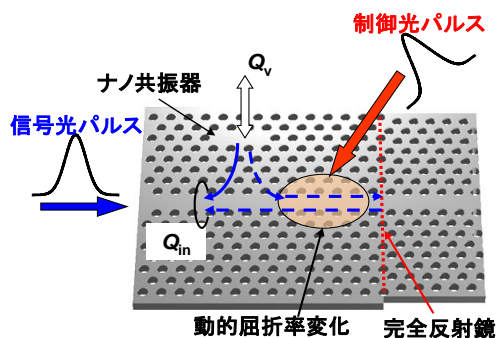


図 1: 共振器 Q 値制御の概念図

本研究課題の開始前には、 Q 値の動的な増大に関して、スペクトル観察による間接的な実証に成功した段階であったが、その動作の時間軸上での直接的な観測は行えていなかった。そこで、本研究では、まず、共振器内部の光子の振る舞いを直接観測するため、相互相関法による時間分解測定システムを構築し、 Q 値が時間的に増大すること（言い換えれば、共振器内に光が捕獲・保持されること）を直接観測することを試みた。図 2 にその結果を示す。同図に示すように、制御光照射とともに、 Q 値が瞬間的に増大する様子が明快に観測された。

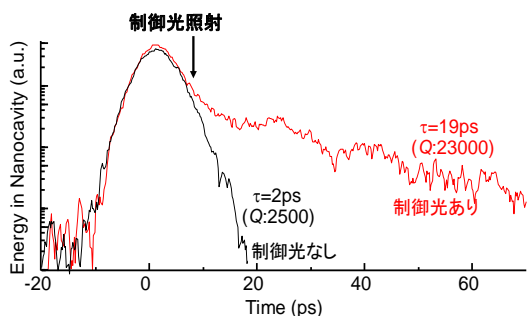


図 2: 時間分解測定システムを用いた光捕獲の実験結果。制御光照射により、 Q 値が増大し、光が捕獲・保持されていることがわかる。

続いて、 Q 値を動的に減少させることを目指し、2つ目の制御パルス光を導入し、 θ を π から 2π へ変化させた。その結果、2つ目の制御光の照射により、 Q 値が減少し、共振器から光が放出される様子を観測することに成功した。放出動作の際に、 θ を様々に変化させることを試み、 θ が 2π の場合に最も効率良く放出可能となることも見出した。

さらに、図 3(a)に示すような試料を開発した。この構造は、共振器近傍に光パルスの出力用導波路を追加した構造である。この構造に対し、共振器に光が結合すると同時に入射用導波路の Q_{in} を増大させる。その後、様々な時刻において出力用導波路の Q_{in} を動的に低下させ、出力用導波路端から出射されるエネルギーの時間変化を測定した。この結果、

図 3(b)に示すように、4ps のパルスを共振器に最大で 330ps 以上保持可能なこと、さらに、任意のタイミングで出力用導波路に放出可能なことを示唆する結果を得ることに成功した。将来的には、これをアレイ化して更なる多機能化をもたせることも可能となると期待できる。

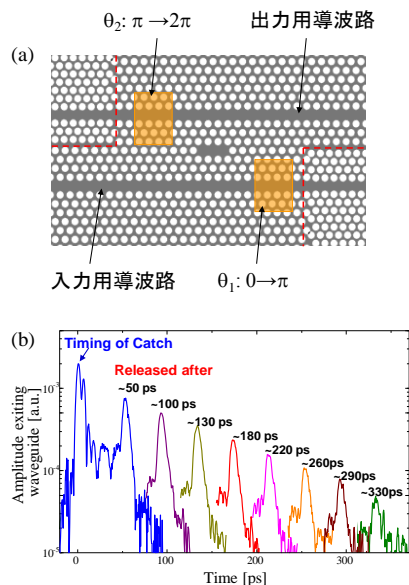


図 3: (a)光の出力用導波路を導入し、光パルスを捕獲、保持、放出することを狙った構造。(b) Q 値を動的に減少させ、出力用導波路からの光を測定した結果。出力用導波路の Q_{in} を動的に低下したタイミングで出力用導波路からの光取り出しを実現できていることが分かる。

併せて、動的制御の核となる自由キャリアの振る舞いとそれによる信号光吸収の影響の除去に関する検討を行った。図 1 に示す、Si 系フォトニック結晶ナノ共振器の Q 値の動的制御では、励起キャリアの寿命が、数 ns 以上存在する。このため、制御光の照射後も自由キャリアが照射部にそのまま留まり、屈折率変化が保持されるため、 Q 値の高速な変化とその保持が実現されるが、合わせてこの自由キャリアによる信号光パルスの吸収の影響が存在することが明らかになってきた。この課題に対処するため、以下のような新たな光の捕獲方法を検討した。すなわち、キャリア寿命が 10ps と短い GaAs 系材料を用い、(i)あらかじめ Q 値を高くしておき、(ii)光が共振器に結合する直前に、自由キャリアを利用して Q 値を低下させるという手法を考える。この場合、キャリア寿命が短いために、光が共振器に結合すると同時にキャリア減衰が生じ Q 値が再び上昇する結果、共振器に光が捕獲・保持されると考えられる。この手法では、 Q 値が高い状態において、自由キャリア

が存在しないために、キャリア吸収が生じず、より長時間の捕獲が可能となると期待できる。GaAs 系材料を用い測定を行った結果、33ps の保持寿命を得ることに成功した。これは、Si を用いて実験的に得られていた値と比較して 2 倍程度大きい値である。

(2) 導波路モードの動的制御による光パルス制御

フォトニック結晶に設けた光導波路の特性を動的に変化させることが出来ると、導波路を伝播する光パルスそのものの性質や振る舞いをも動的に変化させることが可能となると期待される。例えば、導波路の伝播モードを動的に変化させることにより、伝播する光パルスの波長の動的変換を実現することを提案した。本研究では、まず、このことを実証するため、図 4(a)に示すようにフォトニック結晶導波路中を伝播する光パルスに対して、様々なタイミングで、制御光を照射し、どのような現象が生じ得るかを検討した。その結果、同図(b)に示すように、信号パルスと制御パルスの照射タイミングが一致するときに、確かに入射パルスの波長が動的に変換しうることを実験的に示すことに成功した。さらに、屈折率変化量やパルス幅、導波路の群速度に関する体系的検討や多段の波長変換など、大きな波長変換量を得るための検討を行い、最大で 3nm の波長変化量を得た。

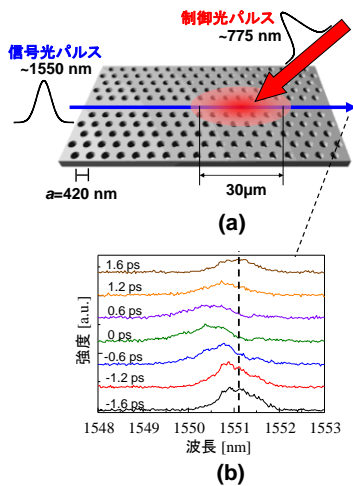


図 4 : (a)導波路モードの動的制御による光パルス制御。(b)制御光照射のタイミングを変化したときの透過光スペクトル。タイミングが、信号光パルスと一致するときに波長変換が生じる。

併せて、導波路近傍に、ナノ共振器を配置した系を形成し、動的波長変換動作を行うことにより、信号光と制御光のタイミングが一致するパルスのみを選択的に共振器に結合・放射させることが可能なことを示すこと

にも成功した(図 5)。以上の成果は、各種新聞にも取り上げられ、新たな光制御の道が開けたと大きな関心を集めた。

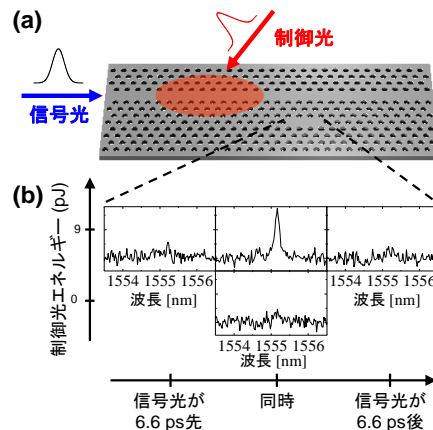


図 5 : (a)導波路・共振器結合系 (b)屈折率変化のタイミングを制御したときの共振器からの放出光スペクトル

(3) 新たな展開：導波路を介した結合共振器とその動的制御

以上のような共振器や導波路の動的制御に関する検討では、個々の光パルスの特性やその伝播を制御することを目指してきたが、ここで複数の光子系同士の結合状態(相互作用状態)を様々な制御することができると、より高度な光制御へと展開できると考えられる。そこで、本研究では、高 Q 値ナノ共振器を用いた新たな強結合システムの構築とその結合状態の動的制御をも目指した。この際、ナノ共振器を近接集積し、強結合状態を形成するのが自然と考えられるが、この場合、ナノ共振器同士があまりにも近接して存在するため、形成された強結合状態を、外部から制御することは極めて困難となる。本研究では、図 6(a)に示すように、波長の数百倍程度も離れた高 Q 値ナノ共振器間を、導波路を介することで強結合状態を形成する新たな方法を見出した。このとき、共振器の共振波長と導波路の伝搬位相を適切に設計することで、導波路に存在する光エネルギーを抑え、大部分の光が共振器部分に局在可能となる。図 6(b)に、結合状態の時間分解測定結果を示す。本方式を用いることで、400 ps 以上にわたる共振器間の強結合状態を実現し、かつ時間領域で直接測定することに成功した。

さらに、図 7(a)に示すように、強結合を形成している状態において、制御パルスの照射により一方の共振器の共振波長を動的に変化させた。この時の時間分解測定結果を図 7(b)に示す。共振器間の強結合状態を、動的に停止させることに成功していることがわかる。この成果は、ナノ共振器をベースとした光量子情報ナノシステムを構築するため

の、極めて重要な一歩を与える成果と言える。

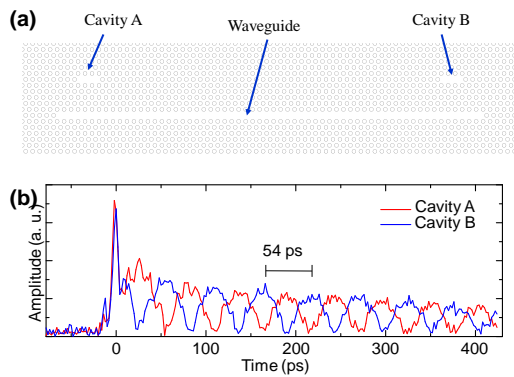


図 6 : (a)導波路を介した 2 共振器結合系の模式図 (b)強結合状態の時間分解スペクトル

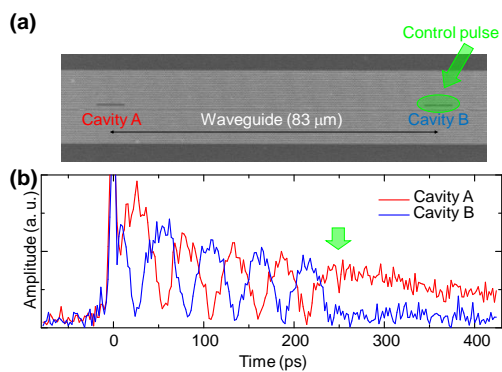


図 7 : (a)制御パルス照射による強結合状態の制御の模式図 (b)強結合状態の時間分解スペクトル

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 40 件)

① J. Upham, Y. Fujita, Y. Kawamoto, Y. Tanaka, B. S. Song, T. Asano, and S. Noda: "The capture, hold and forward release of an optical pulse from a dynamic photonic crystal nanocavity", *Optics Express*, vol. 21, pp. 3809-3817, (2013). 査読有
DOI:10.1364/OE.21.003809

② R. Konoike, Y. Sato, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: "Adiabatic transfer scheme of light between strongly coupled photonic crystal nanocavities", *Physical Review B*, vol. 87, pp. 165138, (2013). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.87.165138

③ Y. Sato, Y. Tanaka, J. Upham, Y. Takahashi, T. Asano, and S. Noda: "Strong coupling between distant photonic nanocavities and its dynamic control",

Nature Photonics, vol. 6, pp. 56-61 (2012)
査読有

DOI: 10.1038/nphoton.2011.286

④ R. Terawaki, Y. Takahashi, M. Chihara, Y. Inui, and S. Noda: "Ultra-high-Q photonic crystal nanocavities in wide optical telecommunication bands", *Optics Express*, vol. 20, pp. 22743-22752 (2012). 査読有

DOI: 10.1364/OE.20.022743

⑤ J. Upham, Y. Tanaka, Y. Kawamoto, Y. Sato, T. Nakamura, B. S. Song, T. Asano, and S. Noda: "Time-resolved catch and release of an optical pulse from a dynamic photonic crystal nanocavity", *Optics Express*, vol. 19, pp. 23377-23385 (2011). 査読有

DOI: 10.1364/OE.19.023377

⑥ Y. Taguchi, Y. Takahashi, Y. Sato, T. Asano, and S. Noda: "Statistical studies of photonic heterostructure nanocavities with an average Q factor of three million", *Optics Express*, vol. 19, pp. 11916-11921 (2011). 査読有

DOI: 10.1364/OE.19.11916

⑦ J. Upham, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: "On-the-fly Wavelength conversion of photons by dynamic control of photonic waveguides", *Appl. Phys. Exp.*, vol. 3, pp. 062001(1-3) (2010). 査読有

DOI: 10.1143/APEX.3.062001

⑧ Y. Takahashi, Y. Tanaka, H. Hagino, T. Sugiya, Y. Sato, T. Asano, and S. Noda: "Design and demonstration of high-Q photonic heterostructure nanocavities suitable for integration", *Optics Express*, vol. 17, pp. 18093-18102 (2009). 査読有

DOI: 10.1364/OE.17.018093

⑨ H. Hagino, Y. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: "Effects of fluctuation in air hole radii and positions on optical characteristics in photonic crystal heterostructure nanocavities", *Physical Review B*, vol. 79, pp. 085112(1-8) (2009). 査読有

DOI: 10.1364/OE.17.018093

⑩ B. S. Song, T. Nagashima, T. Asano, and S. Noda: "Resonant-wavelength tuning of a nanocavity by sub-nanometer control of a two-dimensional silicon-based photonic crystal slab structure", *Applied Optics*, vol. 48, pp. 4899-4903 (2009). 査読有

DOI: 10.1364/AO.48.004899

⑪ J. Upham, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: "Dynamic increase and decrease of photonic crystal nanocavity Q factors for optical pulse control", *Optics Express*, vol.

16, pp. 21721-21730 (2008). 査読有
DOI: 10.1364/OE.16.021721

⑫ Y. Tanaka, T. Asano and S. Noda:
"Design of Photonic Crystal Nanocavity
with Q -factor of $\sim 10^9$ ", *IEEE/OSA Journal
of Lightwave Technology*, vol.26, pp.
1532-1539 (2008). 査読有
DOI: 10.1364/OE.16.021721

⑬ Y. Takahashi, Y. Tanaka, H. Hagino, T.
Asano, and S. Noda: "Higher-order
resonant modes in a photonic
heterostructure nanocavity", *Applied
Physics Letters*, vol. 92, pp. 241910 (2008).
査読有

DOI: 10.1063/1.2943650

⑭ B. S. Song, T. Nagasima, T. Asano, and
S. Noda: "Resonant-wavelength control of
nanocavities by nanometer-scaled
adjustment of two-dimensional photonic
crystal slab structures", *IEEE Photonic
Technology Letters*, vol. 20, pp. 532-534
(2008). 査読有

DOI: 10.1109/LPT.2008.918890

(他 25 件)

[学会発表] (計 220 件)

招待講演

① S. Noda: "Recent Progress in Photonic
Crystals and their Applications", META'13:
The 4th International Conference on
Metamaterials, Photonic Crystals and
Plasmonics, Sharjah, United Arab
Emirates, Mar. 18 (2013).

② S. Noda: "Recent Progresses in 3D and
2D Photonic Crystals", PECS-X: 10th
International Symposium on Photonic and
Electromagnetic Crystal Structures, New
Mexico, USA, Jun. 2 (2012).

③ S. Noda: "Recent Progress in Photonic
Crystals - From Dynamic Control to Solar
Cells", META12: 3rd International
Conference on Metamaterials, Photonic
Crystals and Plasmonics, Paris, France,
Apr. 19 (2012).

④ S. Noda: "Manipulation of Photons by
Photonic Crystals: Recent Progress and
New Trends" CLEO 2011, Baltimore, USA,
May. 4 (2011).

⑤ S. Noda: "Advanced Light Manipulation
with Photonic Crystal Nanostructures",
The 1st International Symposium on
Photonics and Electronics Convergence
-Advanced Nanophotonics and Silicon
Device Systems-, Tokyo, Japan, Nov. 15
(2011).

⑥ S. Noda: "Recent Progress in
Manipulation of Photons by Photonic

Crystals", IEEE Photonics Society, Denver,
USA, Nov. 8 (2010).

⑦ S. Noda: "Recent Progress in
Manipulation of Photons by Photonic
Crystals", 36th International Conference
on Micro & Nano Engineering (MNE2010),
Genoa, Italy, Sep. 20 (2010)(Keynote).

⑧ S. Noda: "New Trends in Photonic
Crystals", CLEO/Pacific Rim 2009,
Shanghai, China, Aug. 30 (2009).

⑨ S. Noda: "Manipulation of Photons by
Photonic Crystals", International
Conference on Electronic Materials 2008,
PLENARY2-S1.2, Hilton Sydney, Sydney,
Australia, Jul. Jul. 28 - Aug. 1 (2008).

(他 40 件)

一般講演: 国際学会 40 件以上、国内学会 130
件以上

[図書] (計 3 件)

「フォトニックナノ構造の最近の進展」(監
修: 野田進, シーエムシー出版, 2011 年 3 月)
にて以下を執筆

① 野田進: 第1章「フォトニック結晶の進
展」, pp. 1-28

② 浅野卓, 野田進: 第3章第1節「フォトニッ
クナノ共振器の進展」, pp. 49-61

③ 田中良典, 野田進: 第3章第2節「 Q 値の動
的制御とストップングライト」, pp. 62-68

[その他]

[新聞報道] 15 件以上

[ホームページ]

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 進 (NODA SUSUMU)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号: 10208358

(2) 研究分担者

浅野 卓 (ASANO TAKASHI)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 30332729

(3) 連携研究者

田中 良典 (TANAKA YOSHINORI)
京都大学・工学研究科・特定助教
研究者番号: 20534522

高橋 和 (TAKAHASHI YASUSHI)
大阪府立大学・工学研究科・特別講師
研究者番号: 20512809