

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，光パルス停止，波長変換，ダイナミクス

1. 研究計画の概要

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、様々なブレイクスルーが生まれ、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。

本研究では、具体的な研究対象として、A. 光ナノ共振器の Q 値を時間領域で動的に制御することにより、共振器に光パルスを捕獲・保持・放出するなど、光の伝播を自在に制御すること、B. 導波路モードを動的に制御することで、導波路を伝播する光パルスの波長(周波数)など、光パルスそのものの性質や振る舞いを動的に変化させること、の2点を設定し、フォトニック結晶の動的制御と新機能の創出、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」の構築を目指す。

2. 研究の進捗状況

(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：高 Q 値ナノ共振器は、光を長時間閉じ込めることを可能とするが、半面、光を導入する際により長い時間が必要になる。したがって、重要なことは、光をナノ共振器に導入する時には Q 値を低くし、光をすばやく共振器に導入できるようにしておき、光が一旦共振器に導入されると、速やかに Q 値を増大させ、光を無駄なく共振器に留めることである。また必要とあ

れば、さらに Q 値を低下させ、光をすばやく取り出せるようにすることである。

この Q 値の動的制御を実現には、フォトニック結晶中のナノ共振器とそれに隣接する一列埋めの線欠陥導波路、導波路の片端に反射鏡を導入した構造を利用し、共振器と反射鏡間の導波路にキャリアを生成して屈折率を変化させることで反射光の位相を制御することで、ナノ共振器と導波路の結合 Q 値を変化させるという方法を利用している。

この系を利用し、まず時間幅 4ps の光パルスが共振器に結合すると同時に、制御光照射によりナノ共振器と導波路の結合 Q 値を増大させることによる、捕獲・保持の様子を測定した。この結果、 Q 値を 2500 から 23000 まで動的に増大することにより光が効率よく捕獲・保持されることを観測することに成功した。次に、共振器に光を捕獲した後、2つ目の制御光を新たに導入し、結合 Q 値を減少させた結果、制御光を照射した時刻で共振器に捕獲された光が放出されていることを示すことに成功した。さらに、共振器近傍に光パルス放出用の導波路を追加した構造を新たに作製した。この構造において、4ps のパルスを共振器に 320ps 保持し、その後取り出すという動作が可能であることを示唆する実験結果を得ることに成功した。

(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。本研究では、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、制御光を入射し、導波路の屈折率を動的に変化させることにより、入射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、入射パルスの波長が動的に変換することを実験的に示すことに成功した。また、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、屈

折率変化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。

3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

(1)については、光ナノ共振器の Q 値を、数千から数万への増大のみならず、逆に、ピコ秒という極短時間に数万から数千へ減少させることに世界で初めて成功した。さらに、ナノ共振器と光入射・放出用の導波路をチップ上に集積し、ナノ共振器に光パルスを高効率に捕獲し、任意のタイミングで放出可能なことを示唆する成果をも得ることに成功した。これらは、フォトニック結晶の動的制御により、オンチップ・オンデマンドな光操作が可能であることを示す重要な結果と言え、将来の光を光のまま蓄える光バッファメモリの実現や、光量子チップの実現など、次世代通信、量子情報分野の発展に大いに寄与するものと位置づけることが出来、当初の目標を十分に満足する成果が得られたものと言える。

(2)については、フォトニック結晶導波路の導波路モードを動的に変化させ、導波路中を伝播する光パルスそのものの性質を動的に変化させ、その周波数を(スペクトル幅を一定に保ったまま)短波長側へ動的に変化させることに初めて成功することが出来た。その変化量は、最大で数 nm レベルにも達した。これは、一般に空間領域における屈折率変化で議論されるスネルの法則を、時間領域へと展開した全く新たな現象を、世界で初めて示した重要な結果と言える。さらに、この動的波長変換を活用してパルスの進路を選択的に制御する機能を実証することにも成功した。以上のように、(2)に関しても当初の目的を十分に満足する成果を得ることが出来たといえる。

以上のように、これまで、本研究で得られた成果は、当初の研究計画を十分に満足するものと言え、残り2年間引き続き研究を進めることで、「フォトニック結晶ダイナミクス」構築に向けた更なる成果が見込まれ、当初の目的を遥かに超える成果が得られるものと確信している。

4. 今後の研究の推進方策

本研究では、フォトニック結晶の特性を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いる。当初、目的に挙げた2つの課題ともに幸いにも順調に研究が進展している。以下、今後2年間の研究計画・方法を説明する。

(1)に関しては、屈折率変化に利用している自由キャリアに関する検討を行う。Si フォトニック結晶ナノ共振器では、励起キャリアの寿命が、数 ns 以上と長いことを利用して屈折率変化を保持しているが、自由キャリアによる信号光パルスの吸収の影響を考えると、キャリア寿命が十 ps 程度の短い材料を利用した新たな光の捕獲方法が有効であることが、

これまでの理論検討により明らかになった。そこで、キャリア寿命が短いと予測される GaAs 系材料を用いることや、PIN 構造を形成し、電氣的なキャリア引き抜き効果を導入することで、上述のような捕獲方法を確立していく。

(2)に関しては、昨年度までに、フォトニック結晶導波路の屈折率を高速で制御し、導波路中に瞬時に反射鏡を生成することを実証してきた。今後、動的反射鏡生成を基礎として、フォトニック結晶導波路中に光パルスを捕獲し、新たな光機能の実現可能なことを実証していく。

5. 代表的な研究成果

(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 25 件)(すべて査読あり)

1. J. Upham, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: *Applied Physics Express*, vol. 3, pp. 062001 (1-3) (2010).
2. Y. Takahashi, Y. Tanaka, H. Hagino, T. Sugiya, Y. Sato, T. Asano, and S. Noda: *Optics Express*, vol.17, pp.18093-18102 (2009).
3. H. Hagino, Y. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: *Physical Review B*, vol. 79, pp. 085112 (1-8) (2009).

4. J. Upham, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: *Optics Express*, vol. 16, pp. 21721- 21730 (2008).
5. Y. Tanaka, T. Asano and S. Noda: *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, pp. 1532- 1539 (2008).

[学会発表] (計 164 件)(招待講演 80 件含む)

1. S. Noda: "Manipulation of Photons by Photonic Crystals: Recent Progress and New Trends" *CLEO 2011*, Baltimore, USA, May. 4 (2011) (plenary).
2. S. Noda: "Recent Progress in Manipulation of Photons by Photonic Crystals", *IEEE Photonics Society*, Denver, USA, Nov. 8 (2010) (Plenary).
3. S. Noda: "New Trends in Photonic Crystals", *CLEO/Pacific Rim 2009*, Shanghai, China, Aug. 30 (2009) (Plenary).

[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]

受賞

1. 野田進: 江崎玲於奈賞 2009年10月
2. S. Noda: IEEE Nanotechnology Pioneer Award 2009年7月
3. 野田進: 科学技術分野の文部科学大臣表彰 2009 年 4 月

ホームページ

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