

## フォトニック結晶の動的制御と新機能の創出

Dynamic control of photonic crystal for new functionality

野田 進 (NODA SUSUMU)

京都大学・大学院工学研究科・教授



### 研究の概要

本研究は、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、新しい光機能の創出、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」の構築を目指すものである。具体的には、光ナノ共振器や導波路の特性を、ピコ秒レベルの高速で制御することにより、光を一瞬の間止めておく、伝播する光パルスの波長を選択的に変化させるなどの機能を実証する。

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、すなわち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

本研究では、フォトニック結晶光ナノ共振器および導波路の性質を動的に変化させ、新たな機能を創出することを目指している。具体的には、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を目指す。以上を通じて、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」の構築を目指す。

### 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 1550nm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 775nm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. これまでの成果

**A. 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。また、共振スペクトル幅も狭くなり、入射パルスのスペクトル幅との大きなミスマッチが生じる。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。

本研究では、図1に示す、Siフォトニック結晶中のナノ共振器とそれに隣接する導波路、導波路の片端に反射鏡を導入した構造を

利用した。この共振器の  $Q$  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  $Q_{in}$  で決定されるが、 $Q_{in}$  はさらに共振器から導波路左側へ漏れた光波(青色実線)と、共振器から導波路右側へ漏れ、反射鏡で反射された光波(青色破線)の干渉位相差 $\theta$ を用いて、 $Q_{in}=Q_{in0}/(1+\cos\theta)$ と表せる( $Q_{in0}$ :反射鏡がないときの  $Q_{in}$ )。ここで、共振器と反射鏡間の導波路に Si のバンドギャップを超えるエネルギーの光を照射すると、自由キャリアが生成されるため、非線形効果により屈折率を変化させることができる。この結果、伝播位相差 $\theta$ を制御することができるため、 $Q$  値の動的な変化が実現できる。

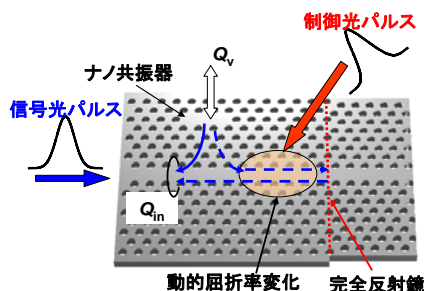


図 1: 共振器  $Q$  値の動的制御のための系の模式図

共振器の  $Q$  値が  $Q_v=50,000$ ,  $Q_{in0}=2,500$  の試料を用い、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  $\theta$  を 0 から  $\pi$  へ変化させることによる、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に、2 つ目の制御光を新たに導入し、 $\theta$  を  $\pi$  から  $2\pi$  へ変化させた結果、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。この構造に対し、共振器に光が結合すると同時に入力用導波路の  $Q_{in}$  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射出されるエネルギーの時間変化を測定した。この結果、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。

**B. 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、図 2(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、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、同図(b)に示すように、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。

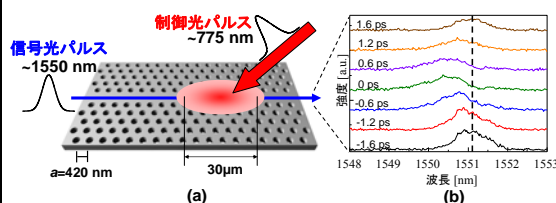


図 2: (a)導波路モードの動的制御による光パルス制御。(b)制御光照射のタイミングを変化したときの透過光スペクトル。タイミングが、入射光パルスと一致するときに波長変換が生じる。

## 5. 今後の計画

A. に関しては、屈折率変化に利用している自由キャリアによる影響に関して検討を行う。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、これまでに、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いる。これを解決するために、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と考えている。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で、上述のような自由キャリアの影響を受けない捕獲方法が実現できないか検討を進める。

B. 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、新たな光機能を実現可能なことを実証することを目指していく。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

### 発表論文

1. J. Upham, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: *Applied Physics Express*, vol. 3, pp. 062001 (1-3) (2010).
2. H. Hagino, Y. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: *Physical Review B*, vol. 79, pp. 085112 (1-8) (2009).
3. J. Upham, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: *Optics Express*, vol. 16, pp. 21721-21730 (2008).
4. Y. Tanaka, T. Asano and S. Noda: *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, pp. 1532-1539 (2008).

その他発表論文20件以上、国際学会発表65件以上(招待講演39件含む)

### 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

ホームページ等

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