

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」
平成17年度採択研究代表者

馬場 俊彦

横浜国立大学大学院工学研究院・教授

フォトニックナノ構造アクティブ光機能デバイスと集積技術

§ 1. 研究実施の概要

本研究では、フォトニックナノ構造(特にフォトニック結晶)の巨大分散効果と微小共振器効果を極限まで高め、従来は困難であった高効率でアクティブな光制御の探求と、高密度・高機能な光集積技術開発を目指している。本年度は、横浜国大が担当するフォトニック結晶導波路スローライトデバイスにおいて昨年からの記録更新中の熱光学的可変遅延をさらに大幅に増大させた。またキャリア効果を付加することにより応答時間 8 ピコ秒という高速可変遅延を実証し、伝搬を完全に停止させる動的制御ストップライトの可能性も検討した。また国内外のシリコンフォトニクスファウンドリーを利用したデバイス作製に着手し、後半期の大規模光集積回路構築に向けたノウハウを蓄積した。一方、NTT が担当するフォトニック結晶共振器型デバイスでは、作製や集積化に適した構造の改良や新規構造の探索・実証を進めると共に、デバイスを電氣的に高速制御するための PIN 接合をフォトニック結晶面内に形成する技術を立ち上げ、光変調器などの基本動作を確認した。さらに微小共振器における強力な光局在を用いたオプトメカニカル効果をこれまで理論的に議論してきたが、それを実証すべく二層構造のフォトニック結晶を試作、初期的な効果を確認した。

§ 2. 研究実施体制

(1)「馬場」グループ

- ① 研究分担グループ長:馬場 俊彦(横浜国立大学大学院、教授)
- ② 研究項目

(2)「納富」グループ

① 研究分担グループ長: 納富 雅也 (日本電信電話株式会社、グループリーダー)

② 研究項目

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

本研究では、従来の光デバイスの性能やサイズの限界を打破し、光信号処理や光集積回路を実現するフォトニックナノ構造光バイスを目指している。特にフォトニック結晶の巨大分散・共振効果を極め、可変遅延スローライト、動的制御ストップライト、線形／非線形波長変換、オプトメカニカル効果などの新しい物理効果(これらを本研究ではアクティブ機能と総称している)を探求している。これまでフォトニック結晶スラブデバイスの研究を通じてオプトメカニカル効果以外の機能は実証を完了していたが、本年度はそれらの性能をさらに向上させ、オプトメカニカル効果の初期実験にも成功した。さらにSiフォトニクスファウンドリーの利用、PIN接合による電氣的制御構造の形成など、プロジェクト後半期に計画している機能集積に向けた基盤技術を整備した。

1. フォトニック結晶導波路スローライトデバイスのさらなる性能向上と光相関係への応用

昨年度、横浜国大はSiフォトニック結晶結合導波路を長尺化し、スローライトの最重要課題である遅延帯域積と遅延可変幅の最高値を記録した。本年度はデバイスの均一化、低損失化、帯域拡大をはかり、最大遅延 330ps, 遅延帯域積 110, 可変幅 31 パルス分(いずれも世界最大)を達成した^[A-3, A-4, A-25]。ただし長尺化に伴う分散のために、現行技術でさらなる改善は困難と判断された。そこでSiフォトニクスファウンドリーの利用を検討した(後述)。

ところでこの可変遅延には熱光学効果を用いており、応答は 14 μ s と遅い。これは光バッファなどには不十分であるが、機械式可変遅延器を用いる現行の光相関器から見れば十分に高速である。そこで本デバイスを可変遅延器とした光相関係を構築したところ、10kHz 以下の周波数でピコ秒パルス波形が観測された。このような高速な相関係は、光コヒーレンストモグラフィーのリアルタイム相関マッピングなど、高速応答が必要な応用に有用と考えられる^[A27, A28]。

2. フォトニック結晶導波路型スローライトデバイスによる光非線形の増大

昨年度、低分散スローライトデバイスとして格子シフト型フォトニック結晶導波路を考案し、スローライトパルス伝搬と非線形(二光子吸収、自己位相変調)増大を実証した。二光子吸収はキャリア効果による光制御には有用であるが、プラズマ吸収が問題となる。本年度、横浜国大は、二光子吸収やプラズマ吸収を避けつつ光カー効果のみによる光制御を実現するカルコゲナイドガラス(Ag-As₂Se₃)デバイスの作製技術を立ち上げた。この材料ではSiと比べて三次非線形係数 10 倍、二光子吸収 1/100 以下が報告されているが、実際に理論と一致する光伝搬、極めて高効率な自己位相変調と四光波混合、極めて小さな二光子吸収が評価された^[A-2, A-26]。さらにSiデバイスに同ガラスを後付けすることで、Siの二光子吸収が起こる前に光カー効果が発現する見通しが得られ、Siフォトニクスファウンドリーと整合する機能デバイスに発展するものと期待している。

3. フォトニック結晶導波路型スローライトデバイス的高速可変遅延とストップライト化の検討

可変遅延を高速応答させるため、キャリアプラズマ効果の利用を検討した。ここでは低分散スローライトを励起パルスとして最初に導入し、二光子吸収キャリアに伴う屈折率変化によって信号パルスの遅延を 2ps 変えることに成功し、8ps と高速な応答を評価した^[A-30]。励起パワーの増強で可変幅は広がるので、現在、Si フォトニクスファウンドリーが提供するスポットサイズ変換器付きデバイスで外部光学系との光結合効率の改善をはかっている(これも後述)。

ところで励起パルスと信号パルスを逆順にすると、スローライト化した信号パルスに励起パルスが追いつき、屈折率を動的に変化させるので、ストップライトが発生する^[A-31, A-32, A-46]。計算ではスローライトの遅延を上回る光パルスの完全停止が証明されたため、現在、実験でも検証中である。ところで前述のようにキャリア効果はプラズマ吸収を伴う。これを避けるには、カルコゲナイドデバイス(カルコゲナイドガラス付き Si デバイス)の光カー効果を用いるのが最終解になると予想している。

4. シリコンフォトニクスファウンドリー利用の検討

昨年度、NTT-ATN 社で開始されたサービスを試し、スポットサイズ変換器によりファイバーとの結合損がこれまでより 20dB 以上も減少することを確認した^[A-38, A-39]。これはキャリア効果や光カー効果にとって重要な利点となる。本年度、横浜国大はより幅広いデバイスレシピをもつシンガポール IME で上記デバイスの作製を試した結果、損失は NTT-ATN と同等なものに加え、3mm の長尺フォトニック結晶導波路でも損失が十分に低く(結合損の揺らぎ以内)、不要な内部共振が小さい平坦な透過スペクトルが得られることを確認した^[A-47~A51]。現在、チャープやトリミング用の加熱電極形成、キャリア効果による高速応答、カルコゲナイドガラスの付与を進めており、デバイスの特性や集積性が大幅に改善されることを期待している。

5. フォトニック結晶ナノ共振器によるスローライト、および新しい光閉じ込め構造の探求

NTT は昨年度、2 次元円孔配列から成るフォトニック結晶スラブ微小共振器を 100 個以上連結させた大規模な結合共振器導波路を実現したが、本年度は連結数を 400 個まで増やし、パルス遅延を昨年の 6 パルス分から 13 パルス分に増やすことに成功した^[B-4]。

また微小共振器として、これまでフォトニック結晶スラブを基本構造としてきたが、昨年度、NTT は新たな 1 次元フォトニック結晶高 Q ナノ共振器を提案した。これは SiO₂ クラッドで覆っても Q 値が維持されるという 2 次元では得られない特長があり、高密度かつ堅牢な光集積に有利である。本年度はこれを実際に作製し、高 Q 値を確認した^[B-1]。また昨年度、フォトニック結晶導波路に非常に小さな屈折率変調をかけると、高 Q ナノ共振器が形成されることを理論計算により発見した。本年度は AFM リソグラフィにより Si フォトニック結晶に局所酸化を施し、このような共振器を形成することを試み、実際に高 Q モードの形成を確認した。これは共振器の形成だけでなく、大規模光集積回路を形成した後に共振波長のトリミングやポストチューニングにも応用できる。

6. 高 Q ナノ共振器を用いた光処理の低エネルギー化

NTT は Si フォトニック結晶共振器の両翼にイオン注入を用いて微小な PIN 接合を形成し、超小

型の電気光変調器を作製した^[B-2]。PIN 接合形成後も共振器は 80 万という高 Q 値を維持し、低電力での変調動作が実現された。現在、このデバイスを昨年度また同構造が、二光子吸収を利用した光受光器として動作することを併せて実証した。従来、Si では 1.5 μm 帯で動作する受光器の実現が難しかったが、二光子吸収を高 Q ナノ共振器で増強することにより高効率な動作が可能となった。

また 5 で述べた 1 次元フォトニック結晶共振器を用いて熱光学効果による光スイッチを作製し、同種のスイッチとしてはこれまでで最低パワーでの動作を実現した。

さらに NTT は、横浜国大がナノレーザ等でこれまで研究してきた H0 型共振器を用いた超高速スイッチング動作を実証した。H0 型は高 Q 値に加えて最小モード体積が得られるため、光局在効果が強い。線形吸収量と二光子吸収量を勘案することにより、従来、NTT が報告してきたフォトニック結晶光スイッチよりもほぼ二桁小さなエネルギー ($\sim\text{fJ}$) での動作を達成した。共振器の小型化のおかげで高速化も実現し、40Gbps の動作が確認された^[B-7]。

7. 二層型フォトニック結晶を用いたオプトメカニクス

高 Q ナノ共振器では質量が極めて小さく、光子寿命が長いので、光と力学運動の結合が強くなる。NTT は昨年度、空隙をはさんで二つのフォトニック結晶スラブを積層させた 2 層型フォトニック結晶において非常に強力な光力学結合系が実現できることを提案した。本年度は 2 層型フォトニック結晶の作製に初めて成功し、実際に外部から照射された光によって輻射力が生じ、各スラブが動くことを確認した^[B-6]。光 1 pJ あたり数 nN の力が発生しており、通常の光マイクロマシンと比べるとはるかに高効率で力が発生することが確認された。このような機能は、極めて広範囲の光制御パラメータチューニング、センシング応用などが可能であり、今後、光集積回路の付加機能として検討を進める。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

[A-1] 馬場俊彦, “分散制御フォトニック結晶導波路によるスローライト”, レーザー研究, vol. 37, no. 8, pp. 572-577, 2009.

[A-2] K. Suzuki, Y. Hamachi and T. Baba, “Fabrication and characterization of chalcogenide glass photonic crystal waveguides,” Opt. Express, vol. 17, no. 25, pp. 22393-22400, 2009. DOI: 10.1364/OE.17.022393

[A-3] T. Baba, J. Adachi, N. Ishikura, Y. Hamachi, H. Sasaki, T. Kawasaki, and D. Mori, “Dispersion-controlled slow light in photonic crystal waveguides,” Proc. Jpn. Sci. Academy Ser. B, vol. 85, no. 10, pp. 443-453, 2009. DOI:10.2183/pjab.85.443

[A-4] J. Adachi, N. Ishikura, H. Sasaki and T. Baba, “Wide range tuning of slow light pulse in SOI

photonic crystal coupled waveguide via folded chirping,” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 16, no. 1, pp. 192-199, 2010 (Invited Paper). DOI: 10.1109/JSTQE.2009.2032515

- [A-5] T. Baba, H. Abe, T. Asatsuma, and T. Matsumoto, “Photonic crystal negative refractive optics,” J. Nanosci. Nanotech., vol. 10, no. 3, pp. 1473-1481, 2010 (Invited Paper). DOI: 10.1166/jnn.2010.2026
- [B-1] L-D. Haret, T. Tanabe, E. Kuramochi and M. Notomi, “Extremely low power optical bistability in silicon demonstrated using 1D photonic crystal nanocavity,” Opt. Express, vol. 17, no. 23, pp. 21108-21117, 2009. DOI:10.1364/OE.17.021108
- [B-2] T. Tanabe, K. Nishiguchi, E. Kuramochi, and M. Notomi, “Low power and fast electro-optic silicon modulator with lateral p-i-n embedded photonic crystal nanocavity,” Opt. Express, vol. 17, no. 25, pp. 22505-22513, 2009. DOI:10.1364/OE.17.022505
- [B-3] M. Notomi, “Manipulating light by photonic crystals,” NTT Technical Review, vol. 7, no.9, 2009.
- [B-4] 納富雅也, 田辺孝純, 倉持栄一, “超高 Q ナノ共振器によるスローライト生成,” レーザー研究, vol. 37, no. 8, pp. 578-584, 2009.
- [B-5] T. Tanabe, H. Sumikura, H. Taniyama, A. Shinya, and M. Notomi, “All-silicon sub-Gb/s telecom detector with low dark current and high quantum efficiency on chip,” Appl. Phys. Lett., vol. 96, no. 10, pp. 101103, 2010. DOI:10.1063/1.3357427
- [B-6] Y-G. Roh, T. Tanabe, A. Shinya, H. Taniyama, E. Kuramochi, S. Matsuo, T. Sato, and M. Notomi, “Strong Optomechanical interaction in a bi-layer photonic crystal,” Phys. Rev. B Rapid Commun. B, vol. 81, no. 12, pp. 121101(R), 2010. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.121101
- [B-7] K. Nozaki, T. Tanabe, A. Shinya, S. Matsuo, T. Sato, H. Taniyama, M. Notomi, “Sub-femtojoule all-optical switching using a photonic-crystal nanocavity”, Nature Photonics, vol. 10, 2010 (accepted for publication).

(4-2) 知財出願

- ① 平成21年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 4 件)