

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」
平成 18 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の巨大分散効果と極微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デバイスにおいて、特に重要な遅延帯域積と遅延可変ビット数を大幅に向上させ、世界記録を更新した。NTT が担当する結合共振器型デバイスでは、さらに長い遅延に加え、より小型で高 Q 値なデバイスの提案・実証を行った。またこれらのデバイスに関連して、群屈折率の二乗に比例した光非線形と損失の精密な評価、動的制御による光の完全停止や断熱的波長変換、短パルスの発生などを計算や実験により実証した。そして以上の成果を *Nature Photonics*, *Physical Review Letters* などの論文誌、および新聞紙面にて発表した。さらに国内外のシリコンフォトニクスファウンドリーの発足に伴い、大規模光回路の設計・発注・評価のプロセスを修得・整備するなど、プロジェクト後半の準備を開始した。

2. 研究実施内容 (文中にある参照番号は 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効果(スローライトなど)と微小共振器効果を極め、可変遅延、動的制御、非線形、波長変換などを総称するアクティブ機能を探求している。これまでフォトニック結晶スラブを基盤とするデバイス設計、作製、評価を行い、本年度は特にスローライトに関して昨年度の成果を大幅に更新し、さらに新たな機能を探求、実証した。またシリコンフォトニクスによる大規模光集積との融合を目指し、本年度からサービスが始まったファウンドリーを調査し、利用のためのノウハウを蓄積した。

1. フォトニック結晶導波路型スローライトデバイスの高性能化

横浜国大が提案するフォトニック結晶結合導波路は、懸案の広帯域分散補償スローライトを昨年度に実証し、ピコ秒パルスの遅延に初めて成功した。本年度はその性能を向上させ、また問題

点も明らかにした。成果は *Nature Photonics* や *Physical Review Letters* をはじめとする論文に発表済み、もしくは今後発表予定である^{A-3,A-4,A-6,A-9-11}。

まずプロセス改善によりデバイス長を 800 μm に長尺化し、ピコ秒パルスの遅延 173ps 以上、バッファ能力を決める遅延帯域積 104 (世界最大) を達成した。また 6ps 間隔の連続パルス列の遅延も観測した。また昨年度は局所加熱による 8 パルス分の可変遅延にも初めて成功したが、本年度は加熱時の実効的なチャープの変化を精密に制御し、可変幅を 22 パルス分 (世界最多) に広げた。

ただしこの結合導波路は構造が複雑で、作製揺らぎによる損失が依然として問題である。本年度、散乱強度より損失の群屈折率依存性を評価する手法を開発したところ、この問題があらためて認識された。そこでより単純なデバイス構造を探索した結果、普通のフォトニック結晶導波路の一部の格子列をシフトさせると、上と同様の分散補償スローライトがより低損失かつ平坦なスペクトルで発生することがわかった。

実はこの構造は昨年度に発見したもので、小さなシフト量に対して低分散スローライトと非線形が観測されていた。本年度はまずこの非線形に注目し、群屈折率の二乗に比例する二光子吸収と自己位相変調を確認した (スローライトパルスでの非線形増大の初の実証)。一方、大きなシフト量に対しては分散補償スローライトが得られ、しかも低分散スローライトと分散補償スローライトの同時発生も観測された。これについて前者の 2 光子吸収キャリアによる屈折率チャープで後者の遅延が変えられることが期待され、実際に観測を試みたところ動作が観測された。ただし自己位相変調に起因したスペクトル変化に伴う遅延の変化の可能性もあり、現在、調査を続けている。

2. フォトニック結晶ナノ共振器型スローライトデバイスの高性能化

NTT は、昨年度までに開発した Q 値 100 万クラスの幅変調型フォトニック結晶ナノ共振器の結合系によるスローライトを研究してきた。こちらは導波路型に比べて狭帯域で、長い遅延を得るのに有利である。昨年度、200 個の共振器の結合と幅 10ps 台のパルス伝搬を観測していた。本年度は実験の最適化で、光速の 1/170 のパルス伝搬 (世界最小) と、IBM が昨年度に発表したばかりのリング結合系の 1/100 のサイズと損失を達成した。この成果は *Nature Photonics* に論文掲載されたほか、新聞 3 紙が報道した^{B-9}。

また本年度は、ナノ共振器の所要面積の縮小を検討した。共振器近傍に空気ダブルスロットを配置したところ、50 万以上の Q 値を維持しつつデバイス全体を大幅に縮小することに成功した^{B-5}。この構造はプロジェクト後半の高密度光集積に有利なだけでなく、共振器が軽量なので、オプトメカニクス応用にも有用である。またこの結果は、横方向周期性が超高 Q 値に必須ではないことを示しており、NTT はこの知見から 2×10^8 という超高 Q 値が計算される 1 次元フォトニック結晶共振器も発見した^{B-3}。

3. 動的制御による新しい光制御

スタンフォード大が 2004 年に議論した動的制御は光の完全停止を実現するが、NTT は同様の手法で断熱的波長変換が可能なることも 2005 年に指摘している。本年度、ナノ共振器の共振波長を動的に変化させることで、その事実を初めて観測し、*Physical Review Letters* 誌に論文掲載された^{B-10}。共振器が光パルスを蓄積した状態で、ポンプ光によるキャリアプラズマ効果により共振波

長を変化させると、蓄積光が断熱変化することがスペクトル時間分解測定より明らかになった。さらにこの過程を用いて、蓄積光を短パルスとして取り出すという CCD 的な動作を全光で実現することに成功した。また、フォトニック結晶直線導波路へ局所的な光照射を行うと、動的に共振器が形成され、走行する光パルスをピン止めできることも理論的に議論している^{B-8)}。

一方、横浜国大は上記のスローライトに対して屈折率チャープを動的に付与または消失させることで、完全停止できることを理論的に示した。ここでは複数パルスの停止も可能で、1 に述べた二つのスローライトを用いて実証を狙っている。

4. シリコンフォトニクスファウンドリー利用の検討

現行の実験環境では、デバイスの原理実証はできるが、大規模光集積の均一性や歩留まりの追求には限界がある。そこでシリコンフォトニクスファウンドリーを推進し、利用を試みた。本年度、一般ユーザーが使えるファウンドリーが世界に三社誕生した。いずれも対応可能なレシピ、データ形式、作業プロセスがあり、ユーザーがそれを熟知して利用する。最適なプロセスで作製するのではなく、可能なプロセスの組み合わせで作製するという発想転換が必要である。本年度、横浜国大は各サービスを調査、利用を試みた。1 に述べた光パルス列の生成については、多段の分岐・合流で構成される単純な回路で実現されるが、バルク系や石英系では不可能な大規模回路であり、シリコンフォトニクスの高密度集積の特徴を生かしている。実際に作製された光回路はスポットサイズ変換器の集積のおかげでファイバー入出力結合損失が合計で 1.6dB に抑えられ、スローライトの評価に利用することに成功した。

3. 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

フォトニック結晶の巨大分散を用いるアクティブ機能デバイス・集積回路技術

(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

フォトニック結晶微小共振器アクティブ機能デバイス・集積回路技術

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

[A-1] S. Kita, K. Nozaki and T. Baba, “Refractive index sensing utilizing a cw photonic crystal nanolaser and its array configuration,” Opt. Express, vol. 16, no. 11, pp. 8174-8180, 2008.

[A-2] T. Asatsuma and T. Baba, “Aberration reduction and unique light focusing in a photonic crystal negative refractive lens,” Opt. Express, vol. 16, no. 12, pp. 8711-8719,

2008.

- [A-3] T. Baba, T. Kawasaki, H. Sasaki, J. Adachi and D. Mori, "Large delay-bandwidth product and tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide," *Opt. Express*, vol. 16, no. 12, pp. 9245-9253, 2008.
- [A-4] T. Baba, "Slow light in photonic crystals," *Nature Photonics*, vol. 2, no. 8, pp. 465-473, 2008.
- [A-5] W. Zheng, G. Ren, M. Xing, W. Chen, A. Liu, W. Zhou, T. Baba, K. Nozaki and L. Chen, "High efficiency operation of butt joint line-defect waveguide microlaser in two-dimensional photonic crystal slab," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, no. 8, pp. 081109, 2008.
- [A-6] R. J. P. Engelen, D. Mori, T. Baba and L. Kuipers, "Two regimes of slow-light losses revealed by adiabatic reduction of group velocity," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, no. 10, pp. 103901, 2008.
- [A-7] T. Baba, T. Matsumoto and T. Asatsuma, "Negative refraction in photonic crystals," *Adv. Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 91-100, 2008.
- [A-8] T. Baba, T. Asatsuma and T. Matsumoto, "Negative refraction in photonic crystals," *MRS Bulletin*, vol. 33, no. 10, pp. 907-910, 2008 (Invited Paper).
- [A-9] R. J. P. Engelen, D. Mori, T. Baba and L. Kuipers, "Subwavelength structure of the evanescent field of an optical Bloch wave," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, no. 2, pp. 023902, 2009.
- [A-10] M. Burrese, R. J. P. Engelen, A. Opheij, D. van Oosten, D. Mori, T. Baba and L. Kuipers, "Observation of polarization singularities at nanoscale," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, no. 3, pp. 033902, 2009.
- [A-11] Y. Hamachi, S. Kubo and T. Baba, "Slow light with low dispersion and nonlinear enhancement in a lattice-shifted photonic crystal waveguide," *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 7, pp. 1072-1074, 2009.
- [A-12] T. Baba, H. Abe, T. Asatsuma, and T. Matsumoto, "Photonic crystal negative refractive optics," *J. Nanosci. Nanotech.*, 2009 (Invited Paper, in press).
- [B-1] H. Taniyama, and M. Notomi, "S-matrix calculation of radiation characteristics from dipole oscillation in two-dimensional photonic crystal slabs," *J. Appl. Phys.*, vol. 103, no. 8, pp. 083115, 2008.
- [B-2] T. Tanabe, H. Taniyama, and M. Notomi, "Carrier diffusion and recombination in photonic crystal nanocavity optical switches," *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, no. 11, pp. 1396-1403, 2008.
- [B-3] M. Notomi, E. Kuramochi, and H. Taniyama, "Ultrahigh-Q nanocavity with 1D photonic gap," *Opt. Express*, vol. 16, no. 15, pp. 11095-11102, 2008.
- [B-4] T. Yamamoto, M. Notomi, H. Taniyama, E. Kuramochi, Y. Yoshikawa, Y. Torii, and T. Kuga, "Design of a high-Q air-slot cavity based on a width-modulated line-defect in a photonic crystal slab," *Opt. Express*, vol. 16, no. 18, pp. 13809-13817, 2008.

- [B-5] E. Kuramochi, H. Taniyama, T. Tanabe, A. Shinya, and M. Notomi, "Ultra-high-Q two-dimensional photonic crystal slab nanocavities in very thin barriers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, no. 11, pp. 111112, 2008.
- [B-6] H. Taniyama, M. Notomi, E. Kuramochi, T. Yamamoto, Y. Yoshikawa, Y. Torii, and T. Kuga, "Strong radiation force induced in two-dimensional photonic crystal slab cavities," *Phys. Rev. B.*, vol. 78, no. 16, pp. 165129, 2008.
- [B-7] M. Notomi, T. Tanabe, A. Shinya, E. Kuramochi, and H. Taniyama, "On-chip all-optical switching and memory by silicon photonic crystal nanocavities," *Adv. Opt. Technol.*, vol. 2008, Article ID 568936, pp. 10, 2008 (Invited Paper).
- [B-8] M. Notomi, and H. Taniyama, "On-demand ultra-high-Q cavity formation and photon pinning via dynamic waveguide tuning," *Opt. Express*, vol. 16, no. 23, pp. 18657-18666, 2008.
- [B-9] M. Notomi, E. Kuramochi, T. Tanabe, "Large-scale arrays of ultra-high-Q coupled nanocavities," *Nature Photonics*, vol. 2, no. 12, pp. 741-747, 2008.
- [B-10] T. Tanabe, M. Notomi, H. Taniyama, E. Kuramochi, "Dynamic release of tapped light from an ultra-high-Q nanocavity via adiabatic frequency tuning," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, no. 4, pp. 043907, 2009.

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 4 件)