

「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, 特にフォトニック結晶に特有の巨大分散効果と極微共振器効果を極限まで高める. そして従来は困難であった高効率でアクティブな光制御機能を探求し, 最終的に高密度・高機能な光集積回路の基盤技術開発を目指している. 2 年次の研究では, まず最適設計されたスローライトデバイスを作製し, 変調位相シフト法と相互相関パルス測定法により広帯域低分散性を実証した. スローライトで特に重要な指標である遅延・帯域積は 57 となり, 現時点での最高記録である. またスローライトの空間圧縮に伴う光非線形(二光子吸収と自己位相変調)の大幅な増大, およびレーザ局所加熱による最大 23ps の遅延時間のチューニングを実現した. さらに, 負の屈折に特有のフォトニック結晶外集光や並列集光といったレンズ効果を観測し, 従来問題であった収差の低減にも見通しを付けた. 微小共振器効果では 100 万を超える超高 Q 値, $0.15(\lambda/n)^3$ 以下の極限微小モード体積を実現し, 化合物半導体デバイスでは室温連続レーザ動作, アクティブ/パッシブ集積による光取り出し, 共鳴励起によるスイッチング動作を観測した. また最大 200 個までの共振器を結合させることに成功し, ここでも広帯域スローライトを観測した. 加えて, アモルファス 3 次元構造がフォトニックバンドギャップや強力な光閉じ込めを示すことを見出し, 新たな構造設計の可能性を提示した.

2. 研究実施内容

(文中にある参照番号は 4. (1)に対応する)

従来の光デバイスは材料特性により性能やサイズが制限され, 光信号処理や光集積回路の実現に限界があった. 本研究では, フォトニックナノ構造によってこの限界を打破することを目指している. 具体的には, フォトニック結晶の巨大分散効果(スローライトと負の屈折)と微小共振器効果

を極限的に高め、高効率なスイッチング、波長変換、動的制御、非線形といったアクティブ機能を実現する。最終的には、アクティブ/パッシブ融合を含む高機能光集積回路の基盤技術を開発する。2年次までの研究では、円孔を2次元配列させたフォトニック結晶スラブを基本構造とし、構造設計、作製・評価の技術改良をすすめ、効果の観測、一部の機能の実証を行った。

(1) スローライト効果

フォトニック結晶導波路のこれまでのスローライトでは、広帯域化と高次分散の低減が最重要課題であった。本研究開始前にはフォトニック結晶スラブの円孔直径の微調整により低分散が得られることを見だし、最近、研究代表者らが申請した米国特許が成立した。1年次はSOI基板にこの導波路を作製し、波長 $1.55\mu\text{m}$ 付近の幅 9nm で $c/50$ の低分散スローライトを観測したが[1]、作製許容誤差が小さく再現が難しかった。また観測にはファブリーペロー共振法を用いており、低群速度が正確に評価できない懸念もあった。2年次は、前者を解決する格子シフト型導波路を提案し、低分散スローライトが安定して生じることを理論的に明らかにした。また後者を解決するために、変調位相シフト測定系と短パルス相互相関測定系を構築した。実際に作製・評価を行ったところ、再現性が大きく向上し、低分散スローライトが容易に観測できるようになった。そこで長さ $470\mu\text{m}$ のデバイスに 0.9ps 光パルスを入射させたところ、 $<2.3\text{ps}$ の出射パルスが観測され、通常フォトニック結晶導波路に比べて $1/100$ 以下の低分散が確認された。またピークパワー約 150mW から二光子吸収と自己位相変調が観測され、導波路長を考慮すると、Si細線に比べて $11\sim 90$ 倍の非線形増大が見積もられた。これらは、スローライトとしては初めての短パルス伝搬と非線形効果増大の観測である。

2年次は、スローライトのチューニングにも取り組んだ。具体的には円孔直径チャープ[2]をもつフォトニック結晶結合導波路[3]をレーザ照射加熱し、屈折率チャープに伴うバンドシフトにより群速度を変化させた。まず加熱前に、変調位相シフト法により波長幅 11nm で遅延 40ps 、群速度 $c/50$ のスローライトを評価した。次に様々な波長の光パルス伝搬を観測し、全帯域で相互相関測定と変調位相シフト測定の対応を確認した。スローライトデバイスのバッファ能力の指標である遅延・帯域積は 57 となり、集積型スローライトデバイスの現在の最大値となった。次に加熱を行った結果、パルスをおよそ保ったまま遅延を 23ps 変えることに成功した。これはおよそ 10 ビットの信号シフトに相当する。このような遅延時間の外部制御は、集積デバイスでは初めてである。

さらに、GaInAsPフォトニック結晶導波路においてスローライトによる利得の増大も試みた。連続励起時の放熱を考慮して三層ウエハに深い円孔を形成したフォトニック結晶を採用し、光励起型と電流注入型デバイスを作製した。いずれも励起による出力増大を確認し、特に前者ではバンド端での出力増大を観測した。しかしフォトニック結晶スラブに比べて伝搬損失が大きく、正味の利得は得られなかった。一方、ウエハを最適化することでGaInAsPフォトニック結晶スラブ導波路での室温連続レーザ発振が初めて実現した。これは連続励起に対する利得の発生を期待させるものであり、今後、増幅器やゲートデバイスへの適用を検討する。

(2) 負の屈折効果

負の屈折については、光集積部品としてのレンズ作用を主に研究してきた。1 年次は光波帯での明確な集光の観測、2 年次はフォトニック結晶外での再集光と並列一括集光というこのレンズ特有の効果を観測することに成功した。またこのレンズは分散面の歪みを利用して集光を行うが、必ずしも分散面の形状が理想的ではなく、収差が集光スポットを制限している。そこで収差補正用の構造を付加した組み合わせレンズを考案し、理論的な証明を行った。次年度はこれを実証する共に、高分解能波長分波器[4]や周回共振器へ適用する。

(3) 微小共振器効果

1 年次はフォトニック結晶線欠陥幅変調型共振器を SOI 基板に作製し、100 万以上の高 Q 値を実現した[5]。2 年次は単一点欠陥構造での高 Q 値も実現した。従来、単純な単一点欠陥では高 Q 値が得られなかったが、ここでは欠陥の最近接孔を外側にシフトさせ、六重極対称性をもつモードで 30 万の超高 Q 値が生じることを確認した[6]。この値は点欠陥型共振器としては最大である。また超高 Q 値の測定精度について詳細な検討を行い、スペクトルと時間分解測定で全く同じ値が得られ、両手段の測定精度も 100 万級の値に十分対応できることを確認した。さらに、構造揺らぎが Q 値に与える定量的影響を調べた。

一方、化合物半導体への共振器形成は、レーザや高効率な光制御に有効である。1 年次には二つの孔をシフトさせた格子シフト共振器で $0.15(\lambda/n)^3$ という記録的な微小モード体積と光励起による室温連続レーザ発振を実現した[7]。2 年次は同レーザを MOCVD 再成長アクティブ/パッシブウエハ[8]に形成し、高効率な光取り出しを実現した。また高次のモードを用いて共鳴励起することで、レーザモードとの熱シフトの違いによるスイッチング動作を観測することにも成功した[9]。ただしこの共振器は理論 Q 値が 10 万に制限される。そこでより高 Q 共振器の作製にも着手した。

Q 値 100 万を記録した線欠陥幅変調型共振器では、非常に遅い群速度 ($c/50,000$) も観測し、微小高 Q 値共振器もスローライトに利用できることがわかった[11]。2 年次は広帯域化、遅延の延長のために結合共振器化に取り組み、100 万以上の高 Q 値を維持しながら 200 個までの結合に成功した。このような大規模な結合共振器は、あらゆるタイプの共振器でも初めてである。また結合モードの透過スペクトルから分散特性を評価し、強束縛モデルから予想される結合状態の形成を初めて確認した。さらにスローライト伝搬に適するように入出力構造を変調させ、入力パルス幅の約 5 倍の遅延 75 ps を得た。単一共振器では入力パルス幅と同程度の遅延しか得られなかったことと比べると、結合共振器の効果が明確に現れている。さらに結合共振器の断熱制御を利用した光メモリ動作の提案と数値モデリングを行い、またキャリア非線形を利用したフォトニック結晶光スイッチにおけるキャリア拡散解析を行って、超高速動作の原理を明らかにした。

(4) 新構造の開拓

従来のフォトニック結晶は完全な周期性が前提となっていたが、周期性をもたないアモルファス構造でも大きな 3 次元フォトニックバンドギャップが生じ、フォトニック結晶と同程度の強い光閉じ込めが可能なことを理論的に明らかにした[12]。また、1 年次に提案した空気スロットを中央にもつフ

フォトニック結晶共振器の解析を進め、この構造が従来構造よりも大きな輻射圧を示すことを明らかにした。

3. 研究実施体制

(1)「馬場」グループ(国立大学法人横浜国立大学)

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

- ・理論解析技術の開発, デバイス設計
- ・フォトニック結晶集積技術の開発
- ・スローライトデバイスの設計・評価
- ・負の屈折デバイスの設計・評価
- ・長尺フォトニック結晶導波路の作製

(2)「納富」グループ(日本電信電話株式会社)

①研究分担グループ長:納富 雅也(物性科学基礎研究所、主幹研究員)

②研究項目

- ・フォトニック結晶デバイスの作製
- ・フォトニック結晶共振器デバイスの理論解析
- ・フォトニック結晶デバイスの評価

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

1. S. Kubo, D. Mori and T. Baba, “Low-group-velocity and low-dispersion slow light in photonic crystal waveguides”, Opt. Lett., vol. 32, no. 20, pp. 2981-2983, 2007.
2. D. Mori, S. Kubo, H. Sasaki and T. Baba, “Experimental demonstration of wideband dispersion-compensated slow light by a chirped photonic crystal directional coupler”, Opt. Express, vol. 15, no. 9, pp. 5264-5270, 2007.
3. T. Kawasaki, D. Mori and T. Baba, “Experimental observation of slow light in photonic crystal coupled waveguides”, Opt. Express, vol. 15, no. 16, pp. 10274-10281, 2007.
4. T. Matsumoto, T. Asatsuma and T. Baba, “Experimental demonstration of a wavelength demultiplexer based on negative-refractive photonic-crystal components”, Appl. Phys. Lett. vol. 91, no. 9, pp. 091117, 2007.

5. M. Notomi, T. Tanabe, A. Shinya, E. Kuramochi, H. Taniyama, S. Mitsugi, and M. Morita, "Nonlinear and adiabatic control of high-Q photonic crystal nanocavities," *Opt. Express*, vol. 15, pp. 17458-17481, 2007.
6. T. Tanabe, A. Shinya, E. Kuramochi, S. Kondo, H. Taniyama, and M. Notomi, "Single point defect photonic crystal nanocavity with ultrahigh quality factor achieved by using hexapole mode," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 2, pp. 021110, 2007.
7. K. Nozaki, S. Kita and T. Baba, "Room temperature continuous wave operation and controlled spontaneous emission in ultrasmall photonic crystal nanolaser", *Opt. Express*, vol. 15, no. 12, pp. 7506-7514, 2007.
8. H. Watanabe and T. Baba, "High-efficiency photonic crystal microlaser integrated with a passive waveguide", *Opt. Express*, vol. 16, no. 4, pp. 2694-2698, 2008.
9. K. Nozaki, H. Watanabe and T. Baba, "Photonic crystal nanolaser monolithically integrated with passive waveguide for effective light extraction", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 2, pp. 021108, 2008.
10. K. Nozaki, S. Kita, Y. Arita and T. Baba, "Resonantly photopumped lasing and its switching behavior in a photonic crystal nanolaser", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 2, pp. 021501, 2008.
11. T. Tanabe, M. Notomi, E. Kuramochi, and H. Taniyama, "Large pulse delay and small group velocity achieved using ultrahigh-Q photonic crystal nanocavities," *Opt. Express*, vol. 15, no. 12, pp. 7826-7839, 2007.
12. K. Edagawa, S. Kanoko, and M. Notomi, "Photonic amorphous diamond structure with a 3D photonic band gap," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 1, pp. 013901, 2008.

(2) 特許出願

平成 19 年度 国内特許出願件数:3 件 (CREST 研究期間累積件数:4 件)