

「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)

「フォトリ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、フォトリックナノ構造に特有の巨大分散効果(スローライト, 負の屈折)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なスイッチング, バッファリング, 波長変換, 非線形といったアクティブ機能を探求し, さらにそれらを融合させた高密度・高機能な光集積回路の基盤技術開発を目指している。平成 18 年度までの研究では, 構造設計の確立, 構造作製技術の向上, 上記効果の観測を行い, 一部, アクティブ機能の実証にも着手した。具体的には, スローライトについて変調位相シフト群速度評価法を確立し, 波長幅 10~30nm という広帯域で群屈折率 40~100 を安定的に観測した。また群速度分散の低減に成功し, 今後の超短パルスの低速化とそれによるアクティブ機能の発現に見通しを得た。負の屈折については, 構造の入出射端を最適化することで挿入損失を 10dB 以上低減させ, プリズム効果, レンズ効果を初めて明瞭に観測した。これらを組み合わせた超小型分波回路の実証にも成功した。極微共振器については, 波長の三乗の 0.2 倍以下という微小共振体積と 120 万という高 Q 値という世界記録的な値を達成した。特に超高 Q 値の精密評価法を確立したことに加え, 共鳴励起によるレーザ動作, 光子寿命内での動的な Q 値チューニングに成功し, これらを利用した波長変換動作の可能性を示唆した。さらに共振器の連結によるスローライト発生, 空気スロットの導入によるさらなるモード体積の縮小, 量子光学実験, 高効率光 MEMS, 波長変換への適用などの可能性を示した。平成 19 年度はこれらのアクティブ機能の観測に本格的に取り組む。

2. 研究実施内容

従来の光デバイスは主に材料の光学特性でその性能やサイズが制限され, 高度な光信号処理を行う高密度な光集積回路の実現には限界があった。本研究では, フォトリック結晶や高屈折率差構造を総称するフォトリックナノ構造によってこのような限界を打破することを目指している。具体的には, フォトリックナノ構造に特徴的な巨大分散効果(具体的にはスローライトと負の屈折), ならびに超高 Q 値をもつ極微共振器効果を極限的に高め, 光信号処理に利用しやすいように最適制御する。さらに, それによって可能となる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探求する。最終的には, パッシブ機能とアクティブ機能を融合させた高機

能光集積回路の基盤技術を開発することを目的としている。本年度までの研究では、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て採用し、各効果に対する構造設計手法を確立し、作製・評価技術の向上、効果の観測を行い、一部、アクティブ機能の実証も開始した。

フォトニック結晶スラブ線欠陥導波路の巨大な構造分散が生み出すスローライトは、光信号遅延を制御する光バッファ以外にも、光信号圧縮、光強度の増強に伴う大きな非線形など本研究が目指すアクティブ機能の発現に有効である。本年度の研究では、まずSOI基板上導波路の作製揺らぎを低減した。また、変調位相シフト法による遅延時間と群速度の評価を確立し、従来用いていたファブリーペロー共振法とよく一致する群屈折率(群速度の低下の割合)を評価した。また導波路の構造パラメータを微調整することで直線的なバンドが生成されることを以前に発見し、初期的な実験結果を得ていたが、作製と測定を改善したことでそのようなバンド特性がより明確に観測された。具体的には、図1に示すように、波長 $1.55\mu\text{m}$ 付近の幅 10nm の帯域で、群屈折率約40を保ったまま群速度分散を大幅に減らすことに成功した。また最長 $600\mu\text{m}$ までの導波路を作製し、広帯域のままで 100ps の遅延時間を得た。これにより幅 1ps 以下の短パルスの形状を保ちつつ低速性を実現する見通しが得られ、パルス強度の増強による非線形の増大など、次年度以降のアクティブ機能の研究の目処が立った。ところで、スローライトのもう一つの課題は、群屈折率の可変性である。本研究では、スラブの屈折率を変えることでバンドの単純シフト、傾斜の変化、局所的な変形などが制御できることを予測し、III-V族材料とシリコン系材料の具体的な屈折率変化に対してそれらが可能なことを計算した。また後述する極微共振器効果では、ナノ共振器レーザにおいて波長幅 10nm という異常に大きなチャープングを観測した。これは熱チャープが主な原因と解釈されたが、熱によるわずかな屈折率変化が異常に大きな波長変化に変換される機構があると思われる、現在も調査中である。これはわずかな屈折率変化でスローライトを大幅にチューニングする機構としても利用できる可能性があるため、今後、さらに探求する。

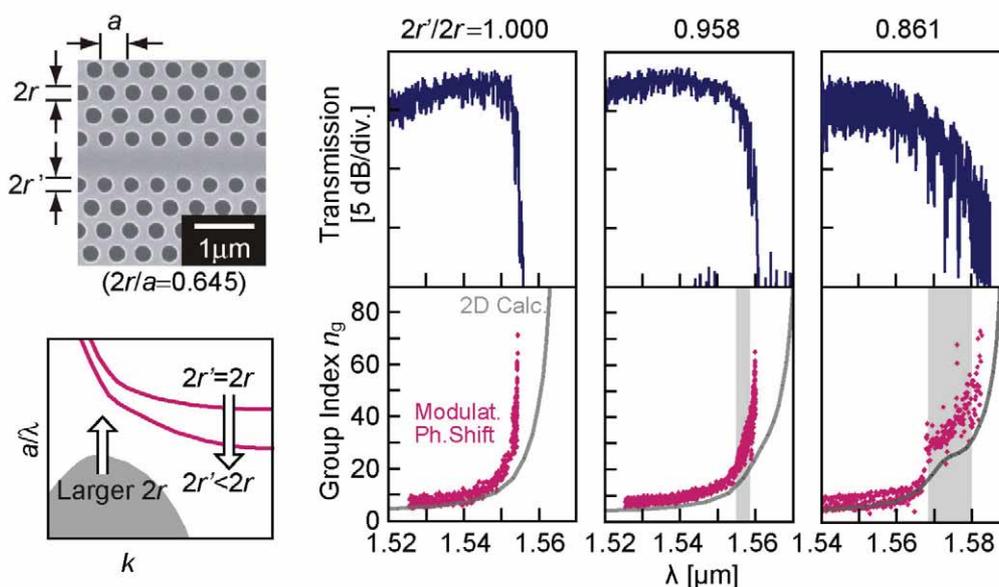


図1 円孔直径 $2r$ と $2r'$ を調整したフォトニック結晶導波路における低分散スローライトの観測

フォトニック結晶の多次元的な分散による負の屈折は、設計により様々な自由空間光伝搬を生むため、光結合や合分波といったパッシブ機能のほか、サブ波長集光やクローキングといった最新物理への展開も興味深いテーマである。以前の研究では、フォトニック結晶スラブの格子と入出射端の形状を最適化し、挿入損失 1dB 以下でプリズム効果とレンズ効果が得られる見通しを得ていた。本年度、実際に構造を作製した結果、これらの効果を光波長帯において世界で初めて明瞭に観測することに成功し、理論との対応も確認した。特にレンズ効果は従来の屈折レンズと異なり、実像を結像させる点が興味深く、実際に複数の光源の各位置への並列集光、導波路どうしの接続などが実現された。また以前より提案してきたプリズムとレンズの組み合わせによる超小型合分波回路を作製し、分光動作を観測することにも成功した。現状では収差が集光スポットを制限しているが、複数のフォトニック結晶を用いた組レンズによって収差を相殺させることも検討している。

極微共振器効果については、本研究直前に格子シフト型ナノ共振器において共振波長の三乗の 0.2 倍以下という極限的微小モード体積(現在、世界最小)での室温連続レーザー発振、ならびに幅変調線欠陥型ナノ共振器において約 120 万の Q 値(発表時、ナノ共振器としては世界最大)を実現していた。本年度、前者ではインジウム燐系半導体に作製したナノレーザを導波路と集積化し、外部光ファイバーとの接続損失を除いたとき外部微分量子効率 20%以上を観測した。また、ナノ共振器の高次モードを利用して励起を行い、基本モードでの双安定に近い室温連続レーザー動作を観測した。高次モードの Q 値を向上させて励起光の吸収を大きくし、素子全体の効率を高めることができれば、波長変換動作が可能になると期待される。一方、後者では、得られた Q 値があまりにも高いため、Q 値の正確な評価自体が困難になっていた。そこで本年度は、スペクトル領域と時間領域の両面で十分な精度をもつ評価技術を確認し、両者の結果がよく一致することを確認した。またスペクトル測定に関しては、従来のレーザー掃引による評価法に加え、単一サイドバンド発生器を用いたスペクトル測定技術も開発し、マイクロ波発生器の周波数精度で波長掃引を行うことで、Q 値の評価精度をさらに向上させた。120 万という Q 値に対応する光子寿命 1ns と、全体として数 μm という共振器・導波路結合系の長さは、群屈折率 50000 というスローライト(冷却原子などを用いないオール誘電体としてはこれまでで最も伝播速度が遅い)が実効的に得られたことを表している。本年度はさらに複数の共振器を結合させた結合共振器構造の研究も開始し、Q 値 100 万級のナノ共振器を 100 個連結させ、相互結合したモードが形成されていることを世界で初めて確認した。このような結合共振器は、上記の導波路と共にスローライト材料として従来から期待されている構造であり、今後、単一共振器と同様に光遅延実験を行う予定である。ところで超高 Q ナノ共振器のバリエーションの一つとして、中央に空気スロットをもつ構造(例えば図 2 の B, C)を提案し、スラブ中もしくは空気中により小さな体積と強い光強度ピークをもつモードが形成されることを理論的に示した。このような構造は半導体共振器 QED や中性原子を用いた量子情報処理で実現を望まれている構造である。また、空気中でモードが形成される構造において発生する非常に大きな輻射圧についても理論的に計算し、高効率な光マイクロマシンや波長変換器への応用展開の可能性を示した。

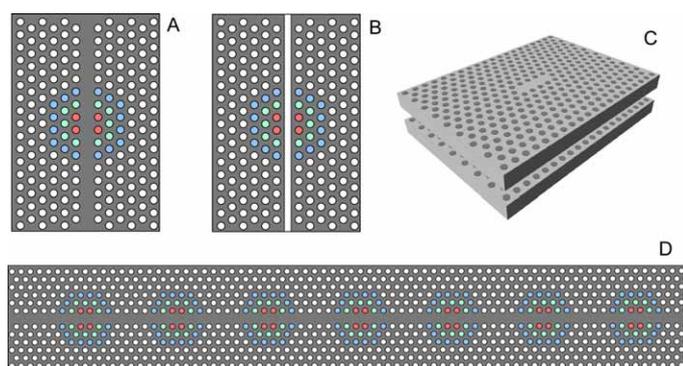


図2 フォトニック結晶幅変調線欠陥型高Q値極微共振器のバリエーション

3. 研究実施体制

馬場俊彦(横浜国立大学)グループ

研究項目

- ・負の屈折デバイスの作製・評価
- ・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

納富雅也(日本電信電話株)グループ

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)

- T. Tanabe, M. Notomi and E. Kuramochi, “Measurement of an ultra-high-Q photonic crystal nanocavity using a single-side-band frequency modulator,” Electron. Lett., vol. 43, no. 3, pp. 187-188, 2007.
- S-C. Huang, M. Kato, E. Kuramochi, C-P. Lee, and M. Notomi, “Time-domain and spectral-domain investigation of inflection-point slow-light modes in photonic crystals coupled waveguides”, Opt. Express, vol. 15, no. 6, pp. 3543-3549, 2007.

(2) 特許出願

平成18年度特許出願:1件(CREST研究期間累積件数:1件)