

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 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

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

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)

主たる共同研究者

納富 雅也 (日本電信電話株式会社物性科学基礎研究所量子光物性研究部 主幹研究員)

(平成 18 年 10 月～平成 24 年 3 月)

3. 研究実施概要

本プロジェクトは、フォトニック結晶デバイスの基本部品(バルク結晶、導波路、共振器)のパッシブ特性向上、巨大な分散や非線形など広義のアクティブ現象探求、それらを利用した機能デバイス開発を目指すものである。そして、特に重要な成果が得られた導波路と共振器について、馬場と納富がそれぞれ集中的に担当した。また、これらをシリコンフォトニクスと融合し、高度な光信号処理に利用し得る高性能・高機能な光集積基盤技術の確立を目指した。

導波路についてはスローライト効果を徹底追求した。従来のスローライトは狭帯域で高次分散が大きく、高速な光信号に適用できなかった。そこで馬場は本研究前に、帯域拡大用チャープ構造と低分散構造の組み合わせを提案していた。本研究では一般的なスローライトの評価理論を構築し、また上の構造を詳細に設計・製作した。その結果、期待する広帯域スローライトパルスを観測し、遅延帯域積110、バッファ容量80という他機関の10倍近い性能を達成した。また、チャープ制御によるスローライトチューニング法を考案し、加熱を用いたパルスの変遅延に初めて成功した。当初報告した変容量8も注目されたが、納富のプロセス協力を得て最終的に36を記録、さらに出射パルスの非線形圧縮を併用して110まで到達し、こちらも他機関の10倍以上となった。これを光相関計に応用し、従来の100倍の高速繰り返しによる相関データ取得に成功した。またスローライトによる光学非線形の増大を探求し、二光子吸収、自己位相変調、四光波混合を評価、導波路として最大の非線形係数(Si細線導波路の200倍)を評価した。この非線形をチャープ制御にも利用し、切り替え時間10ps以下という超高速な変遅延にも成功した。以上の成果はNature Photonics誌の260回以上をはじめ、期間中の発表論文の合計で640回の引用を得ている。

一方、共振器については、導波路に局部変調を加えた独自の構造を利用し、波長サイズの微小モード体積を維持しつつQ値100万以上を達成した。また同共振器を最大400個連結させた大規模結合共振器を製作、群屈折率が170と大きなスローライト伝搬を観測した。この共振器を様々な応用に展開させるため、ビーム構造、屈折率変調構造、1次元構造、ナノスリット構造、二層構造など変形版を考案、高Q値を計算し、いずれも実証した。応用の具体例としては、共振器を小型化した二光子吸収キャリアによる全光スイッチを製作し、スイッチングエネルギー420aJで40Gbps動作を得た。このような超低エネルギーは過去に例がなく、光の高速性を維持しつつ、初めて電子回路のスイッチングエネルギーを下回る重要な成果となった。電気による制御もシリコンpn接合を用いて試し、光変調動作、ならびに暗電流が極めて小さい二光子吸収光検出器動作を得た。また物理的に興味深い現象として、光を捕らえた状態の共振器に動的な屈折率変化を与え、光パルスの放出とそれに伴う断熱的波長変換を初めて明瞭に観測した。さらに共振器に局在する光が力学作用を生むオプトメカニカル効果を調べ、光励起による機械振動の自励発振にも成功した。以上はNature PhotonicsやPhysical Review Lettersなど多くの重要論文誌にて発表、また報道された。

後半、これらのデバイスを大規模集積するため、馬場はシリコンフォトニクス技術による製作に本格的に取り組んだ。ここではシンガポールIMEのCMOSファブとの共同プロセス開発により、従来は困難であったエアブリッジ型フォトニック結晶をシリコンフォトニクスと融合することに成功した。これはファイバー結合損の大幅な低減、ヒータやpn接合によるチューナー、Geフォトダイオードなどの集積を可能にした。本研究ではこ

これらの基本的な製作・評価に加え、CAD やシミュレーションプロセスの環境整備にも取り組んだ。そして上記チューナーを用いた可変遅延、それを組み込んだシンボルレート可変 DQPSK レシーバなどの実証に成功、スローライトと光集積技術を象徴する成果になった。また納富は、ポストプロセスでフォトニック結晶共振器の形成や追加工を行うことができる AFM リソグラフィを開発し、実際に超高 Q 値共振器の製作を実証した。このように大規模集積基盤とその高機能化技術が一定の完成を見たことは、今後のフォトニックナノ構造デバイスを本格的に展開させる上で大きなインパクトを与えたと考えられる。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

可変遅延スローライトデバイス、超高 Q 共振器、シリコンテクノロジーとの融合など、フォトニック結晶デバイス技術の開発でまじめな努力が認められ、具体的な応用を追究しようとしている。世界最高性能を実現したのは、フォトニック結晶導波路の作製技術の成熟によるもので、このチームの技術的優秀性を示している。その結果、自らが提案した精密分散制御によるスローライトの実現をしたことは大きな成果として評価できる。また、NTT グループはさらに優れた技術と同時に、新しい物理提案をしており、将来的な発展を期待できる。

中間評価の時点で指摘された問題点のすべてを解消して、後半で挙げた成果と研究姿勢は評価できる。特に、フォトニック結晶とシリコンフォトニクスを融合し、スローライト DQPSK レシーバーなど大規模集積化の試みを実際に示して、その可能性を示したことは大いに評価できる。

2007 以来、5年間で 71 編の論文、引用数 1567、平均引用数>22 は立派な業績であり、外部発表は適切に行われた。特許出願も適切になされている。

##### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

得られた結果を国内外の研究と比較した場合、光集積回路への統合技術も含めてその水準は高いと評価できる。実際、研究代表者が実現した分散補償スローライトパルスの変遅延では、これまでの記録を大きく上回り、実際に応用可能なレベルの信号弁別を行ったことは重要である。

一方、フォトニック結晶応用技術全般を見ると、その研究集積度に比較して、具体的な応用に関しては、一定の困難に遭遇しているといえる。これは研究代表者だけで解決できる問題ではない。フォトニック結晶という考えだけで、直ちに具体的な応用にまで言及して研究提案をせざるを得ない仕組みにも問題があるかも知れない。

シリコンテクノロジーにおける研究代表者らの実績からすれば、このまま着実な進歩が期待できる。その一方、現在の単なる延長では、真に有用なデバイスとして、応用を開拓できるレベルには不足している印象もある。フォトニック結晶技術で、現在の重要な課題を直ちに解決したり、これからの方向を新しく開拓できる技術的解決策として、大きな流れを作るところまで、どのように到達するかは、大きな課題といえる。

現状はフォトニック結晶導波路の温度勾配を制御して、可変遅延の原理実証に成功した段階である。研究代表者自身が主張するとおり、傾斜させた温度やプラズマキャリア効果で実現するのは容易であるとするが、具体的な応用という点からすれば、原理実証以上のデバイスの開発が必要である。高速信号処理と直接関係する機能発現に向けた努力が今後も必要とされる。

フォトニック結晶デバイスを組み込んだ大規模集積基盤技術の開発は、戦略目標に対する貢献が大きく、社会的インパクトが大きい。もちろん、実際の応用、インパクトが生まれるには、今後も多くの技術的開発、技術的伸縮の理解が必要で、ひとつの技術ですべてが解決するものではないことは明らかである。その上で、本研究が大規模集積基盤技術への挑戦の端緒を切ったことは事実で、それ自身で大きな貢献をしていると評価できる。

##### 4-3. 総合的評価

フォトニック結晶を用いたスローライト導波路および高 Q 共振器に特化した研究で、これらの素子で共に

世界最高レベルの性能を実現したことは大いに評価できる。また、これらの素子は巨大非線形光学や高利得光増幅など、今後の発展が期待できる。