

馬場俊彦

国立大学法人横浜国立大学工学研究院知的構造の創生部門・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／微小共振効果を極限まで高め、従来は困難であった高効率アクティブ光制御の探求と、高密度・高機能な光集積技術の開発を目指している。

巨大分散を担当する横浜国大は、昨年度までにスローライトデバイスの世界最高性能を達成したので、本年度はそれを大規模光集積に展開するべく、シリコン CMOS コンパチブルプロセスによるデバイス作製を開始した。これまで国内外で同様の作製例はほとんどないが、本研究では 8 インチ SOI ウェハ、KrF ステップ、20 層マスクプロセスにより、光入出力用 Si 細線導波路とスポットサイズ変換器、デバイス制御用ヒーターや PIN 接合を同時に集積する技術を開発した。その結果、ファイバー間挿入損失を劇的に低減し、スペクトル振動の抑制に成功した。これによりスローライトによる非線形増大が顕著になり、 $250\mu\text{m}$  と短尺なデバイスでの明瞭な光リミッター応答、四光波混合による波長変換を観測した。またヒーター集積による電流制御でのスローライトチューニング、40Gbps 伝送での 150ps 以上の可変幅、従来の機械駆動式に比べて 100 倍以上高速な応答速度をもつ光相関計を実現した。

一方、微小共振器を担当する NTT は、aJ 級という世界最小エネルギーで動作する光スイッチを実現して Nature Photonics 誌等に発表したほか、連結共振器のファノ共鳴による高コントラスト動作も達成した。またサイドスラブ付き 1 次元フォトニック結晶共振器、フォトニックアモルファス構造など新規の光閉じ込め構造の作製と実証、PIN 接合付きのナノ共振器の電気制御による断熱的波長変換、二層構造フォトニック結晶の光励起による機械振動の自励発振にも成功した。この他、微小共振器に関わる光集積の要素技術として、まずアクティブ素子を含むシミュレーション技術の開発に着手し、二準位系との相互作用を含めた電磁界計算法を確立した。また、AFM によってフォトニック結晶導波路上の任意の場所に共振器を形成するリソグラフィ技術を確立した。

## § 2. 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工学研究院，教授）

② 研究項目

- ・フォトニック結晶導波路の作製技術の開発
- ・フォトニック結晶導波路デバイスの設計，作製，評価
- ・シリコンフォトニクス光集積技術の開発

(2)「納富」グループ(NTT 物性科学基礎研究所)

① 研究分担グループ長：納富雅也（NTT 物性科学基礎研究所，主幹研究員）

② 研究項目

- ・フォトニック結晶共振器の作製、集積化技術の開発
- ・フォトニック結晶共振器デバイスの設計，作製
- ・フォトニック結晶共振器デバイスの評価

### §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、高度な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デバイスを目指している。特にフォトニック結晶やシリコンフォトニクスデバイスの巨大分散効果や微小共振効果によるチューナブルスローライト、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、従来の単純なパッシブ効果を超えた機能的な効果(本研究ではこれをアクティブ効果と総称している)を探求してきた。

本年度は、既の実証してきたこれらの効果をさらに高めると共に、大規模光集積を実現するための基盤技術の確立を目指した。

#### A. 導波路型デバイスをベースとした巨大分散効果の探求(横浜国大の担当)

##### (A-1) シリコン CMOS コンパチブルプロセスによる大規模集積技術の開発

昨年度、巨大分散効果により生み出されるスローライトを用いて、世界最高性能の可変遅延デバイスや非線形デバイスを実証した。さらに本年度、同デバイスを利用したストップライト生成の理論を論文発表した[論文 2]。これらのデバイスは単体利用もあり得るが、他の機能デバイスと組み合わせれば、光通信、光インターコネクション、センシングなどへの応用が広がる。そこで本年度は、シリコン CMOS ファウンドリーと共同で集積技術開発を推進した。ここでは 8 インチ SOI ウェハ、180nm 線幅 KrF ステツパ露光、多層マスクプロセスなどを用い、従来のフォトニックデバイスにはなかった大規模かつ複雑な集積、10 万個規模の大量のデバイス作製を可能にした。スローライトデバイスの基盤構造であるエアブリッジフォトニック結晶は、従来のシリコン CMOS フォトニクス技術では作製が困難で報告例がなかったが、本研究ではマスクプロセスを工夫することでその形成に初めて成功した。これらの成果は国際／国内会議発表済みであり、次年度には論文発表する。これによりスポットサイズ変換器の集積が可能になり、従来、30dB 以上と実用に遠かったファイバー間挿入損を約 10dB まで劇的に低減した。残る損失は露光分解能に制限されるが、多段露光を用いることで 4dB まで減らせる見通しも得た。また Si 細線導波路、カップラー、交差[論文 3]、方向性結合器、マッハツェンダー干渉計、リング共振器、PN 接合、ヒーターなど各種エレメントを試作し、基本動作を確認した。特にヒーターを集積することで電流制御によるスローライトチューニングを実現し、フォトニック結晶型デバイスで可変遅延を初めて実現したほか、マイクロリングオールパスフィルター型スローライトデバイスを新たに提案した。そして IBM が以前に報告した固定の 10Gbps 信号バッファ特性を大幅に上回る 150ps の可変の 40Gbps 信号バッファを実証した。これらについては次年度には論文発表等を行う。個々のデバイスについてはまだ最適化の余地があるが、次年度、さらに高性能化をはかり、高機能集積デバイス実証に結びつける。

##### (A-2) スローライト非線形デバイスの高性能化

上記の低挿入損失により、非線形デバイスが容易になった。本研究では、既に低分散スローライトによって増強された二光子吸収や自己位相変調を実証してきた。本年度はこれらの非線形を

内蔵する光フィルタと組み合わせることで極めて急峻な出力飽和を示す光リミッター機能を実証したほか、250 $\mu\text{m}$  という短尺なデバイスで四光波混合を発現させることにも成功し、1月の国際会議発表予定である。さらに Si の 10 倍と大きな三次非線形係数を有する Ag-As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> カルコゲナイドガラスへのフォトニック結晶形成技術を確立し、スローライトを利用することで単純な Si フォトニクスデバイスの 200 倍の非線形性を実証した[論文 9]。これらはセントアンドリュース大やシドニー大と研究を競っているが、非線形性の高さ、構造の知財権などで本研究が優位にあると考えている。

### (A-3) 高速な光相関計の実証

機械式の変遅延器を内蔵する光相関計は超短パルス計測等に幅広く用いられる。しかし測定のリターン周期が 10Hz 程度と遅く、2次元マッピングなど大量のデータを高速に取得することができなかった。本研究では、スローライトデバイスの可変遅延を応用して機械式の 100 倍以上の周波数を実現し、国際/国内会議に発表した。スローライトデバイスでは帯域制限によるパルス広がり時間が時間分解能を低下させるが、本年度はデバイス外部で自己位相変調と分散補償によるパルス圧縮を行うことで分解能を回復させた。今後、フォトニック結晶自体の自己位相変調と分散補償、二光子吸収によるフォトダイオードを集積すれば、光相関計の全ての機能をワンチップ化することも可能と考えている。これは類似研究がいないため、本研究独自の成果といえる。

## B. 微小共振器効果の探求(NTTの担当)

### (B-1) ナノ共振器によるデバイス動作の低エネルギー化

昨年度、極微小 H0 型フォトニック結晶共振器光スイッチを InGaAsP ウェハに作製し、動作エネルギーを劇的に低減できることを明らかにした。本年度はこのデバイスで aJ 領域に突入する超低エネルギーで動作し、かつ 40Gbps 信号にตอบสนองする高速スイッチングを達成した。このスイッチはこれまで実現されたあらゆる全光スイッチのなかでも最高性能を示しており、Nature Photonics 誌に論文掲載[論文 1]されたほか、新聞 3 紙で新聞報道された。また H0 型共振器を 2 個結合させたファノ共鳴型光スイッチを作製し、高コントラスト化を達成した。さらに、埋め込みヘテロ構造を有する共振器についてもスイッチ動作を検討した。

### (B-2) 新しい光閉じ込め構造の探求

昨年度、高 Q 値をもつビーム型(梁形状)1次元フォトニック結晶共振器を提案、作製し、2次元結晶共振器よりも小型化できること、高屈折率クラッド上でも高 Q 値化できることを明らかにし、ハーバード大やスタンフォード大が類似の研究を開始するなどの反響を得た。本年度は新たにサイドスラブをもつ同型共振器を提案し、高 Q 値を維持されることを明らかにした。この構造はビーム共振器の利点を保ちつつサイドから PIN 接合への電流注入が可能のため、自由度の高い機能デバイスへの展開が期待できる。また以前に提案した 3次元バンドギャップを有するフォトニックアモルファス構造をマイクロ波領域で作製し、ギャップ形成と光局在現象を確認した[論文 5]。

### (B-3) 動的制御とオプトメカニクスの進展

これまで光励起を用いてフォトニック結晶共振器の動的制御を実証してきたが、本年度は PIN 構造の電気制御による動的制御を実現した。具体的には共振器内に光が蓄積されている状態で

電気パルスを印加し、断熱的な波長変換を起こすことに成功した[論文 6]。また昨年度、二層構造フォトニック結晶を作製して巨大なオプトメカニカル結合を実証したが、本年度は同構造を用いた光誘起による機械振動の自励発振に成功し、このような現象が光輻射圧によって制御できることを実証した。これらについてはそれぞれコーネル大、Caltech と研究を競っているが、いずれについても本研究の共振器の方が微小性ゆえに低パワー動作を実現している。

#### **(B-4) 高度な集積のための基盤技術開発**

フォトニック結晶の解析に標準的に用いられる時間領域有限差分法(FDTD 法)は強力なツールであるが、従来は電磁界の解析に限られ、光物質相互作用などアクティブ動作を取り入れられなかった。本年度、量子力学的な電磁双極子相互作用を FDTD 法にとりこみ、二準位系とフォトニック結晶との相互作用を数値的に計算できる手法を初めて開発した。

また昨年度、AFM リソグラフィ技術によりフォトニック結晶の一部を選択酸化し、局所的な屈折率変調を付与することにより、微小共振器が形成できることを世界で初めて見出した。本年度はその研究を推し進め、通常のリソグラフィによって作製される超高 Q 値共振器と同程度の 100 万級の高 Q 値をもつ微小共振器を実現し、超低パワーでの光スイッチ動作を確認した。このプロセスでは面内の任意の場所に所望の共振器を形成でき、AFM 条件によって Q 値や結合度を任意に変えられ、重ね描き追加加工も可能なため、今後のデバイス開発の重要なツールになると期待している。

## §4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ●論文詳細情報

1. Kengo Nozaki, Takasumi Tanabe, Akihiko Shinya, Shinji Matsuo, Tomonari Sato, Hideaki Taniyama, and Masaya Notomi, “Sub-femtojoule all-optical switching using a photonic crystal nanocavity”, *Nature Photonics*, vol. 4, No. 7, pp. 477-483, 2010. (DOI:10.1038/nphoton.2010.89)
2. Yuji Saito and Toshihiko Baba, “Stopping of light by the dynamic tuning of photonic crystal slow light device”, *Optics Express*, vol. 18, No. 16, pp. 17141-17153, 2010. (DOI:10.1364/OE.18.017141)
3. Fumihiro Shinobu, Yuki Arita and Toshihiko Baba, “Low-loss simple waveguide intersection in silicon photonics”, *Electronics Letters*, vol. 46, No. 16, pp. 1149-1151, 2010. (DOI: 10.1049/el.2010.1224)
4. Masaya Notomi, “Manipulating light with strongly modulated photonic crystals”, *Reports on Progress in Physics*, vol. 73, No. 9, pp. 096501, 2010. (DOI: 10.1088/0034-4885/73/9/096501)
5. Eiichi Kuramochi, Hideaki Taniyama, Takasumi Tanabe, Kohei Kawasaki, Young-Geun Roh, and Masaya Notomi, “Ultrahigh-Q one-dimensional photonic crystal nanocavities with modulated mode-gap barriers on SiO<sub>2</sub> claddings and on air claddings”, *Optics Express*, vol. 18, No. 15, pp. 15859-15869, 2010. (DOI:10.1364/OE.18.015859).
6. Shigeki Imagawa, Keiichi Edagawa, Keisuke Morita, Toshiki Niino, Yutaka Kagawa and Masaya Notomi, “Photonic band-gap formation, light diffusion, and localization in photonic amorphous diamond structures”, *Phys. Rev. B* 82, No. 11, pp. 115116, 2010. (DOI: 10.1103/Physrevb.82.115116) *Selected as Editor's Suggestion.*
7. Shota Kita, Shoji Hachuda, Kengo Nozaki and Toshihiko Baba, “Nanoslot laser”, *Applied Physics Letters*, vol. 97, No. 16, pp. 161108, 2010. (DOI:10.1063/1.3505139)
8. Takasumi Tanabe, Eiichi Kuramochi, Hideaki Taniyama, and Masaya Notomi, “Electro-optic adiabatic wavelength shifting and Q switching demonstrated using a p-i-n integrated photonic crystal nanocavity”, *Optics Letters*, vol. 35, No. 23, pp. 3895, 2010. (DOI:10.1364/OL.35.003895).
9. Keiji Suzuki and Toshihiko Baba, “Nonlinear light propagation in chalcogenide photonic crystal slow light waveguides”, *Optics Express*, vol. 18, No. 25, pp.

26675-26685, 2010. (DOI:10.1364/OE.18.026675) *Invited Paper*

10. Masaya Notomi, Akihiko Shinya, Kengo Nozaki, Takasumi Tanabe, Shinji Matsuo, Eiichi Kuramochi, Tomonari Sato, Hideaki Taniyama and Hisashi Sumikura, “Low power nanophotonic devices based on photonic crystals towards dense photonic network on chip”, *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 5, No. 2, pp. 84-93, 2011. (DOI:10.1049/iet-cds.2010.0159) *Invited Paper*
11. Shota Kita, Kengo Nozaki, Shoji Hachuda, Hideki Watanabe, Yuji Saito, Shota Otsuka, Takeharu Nakada, Yoshiki Arita and Toshihiko Baba, “Photonic crystal point-shift nanolaser with and without nanoslots --- design, fabrication, lasing and sensing characteristics”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 17, 2011 (in press). *Invited Paper*

#### (4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 0 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 4 件)