

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13370

研究課題名(和文)モード多重光通信のためのベクトルビーム制御技術の研究

研究課題名(英文) Research of the control of vector beams for mode multiplexing optical communications

研究代表者

大寺 康夫 (Ohtera, Yasuo)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20292295

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は光通信の「モード多重化」技術に関するものであり、OAMと呼ばれる光の軌道角運動量を持つ特殊な光ビームを入出力することのできる、光集積回路を創生することを目的としている。周期構造を持つディスク状光共振器を用い、周期構造による波長選択性の高い共鳴反射現象を利用することで、光共振器内への強い光閉じ込めと、鉛直方向へのビームの取り出しを両立させる。共振物理の解明、素子の試作実験と、電磁界シミュレーションの高効率実行法を研究し、試作に必要な加工プロセスの要素技術を開発するとともに、FPGAを用いた時空間方向並列計算による高速計算アーキテクチャの可能性についても実証した。

研究成果の概要(英文)：This study relates to the mode multiplexing technology for optical communication systems. The main focus is to develop an optical circuit which can emit and receive optical beams having orbital angular momentum(OAM). By utilizing a disk optical resonator with azimuthal periodic structure, we tried to induce highly wavelength selective confinement of optical fields in the disk, as well as the vertical input/output of the OAM beams. During the research period we carried out 1) study of wave physics of the resonance, 2) fabrication experiment, and 3) study of high-performance parallel computing technique for the electromagnetic simulation of the complicated resonance phenomena. As to the last topic, we verified the feasibility of the FPGA-based parallel computing architecture for the highly efficient analysis of such sub-wavelength scale optical wave physics.

研究分野：計算電磁気学、光ナノ構造・現象

キーワード：ベクトルビーム 軌道角運動量 導波モード共鳴 ディスク共振器

1. 研究開始当初の背景

光通信の大容量化の研究が 3M (多値変調技術、多コアファイバ技術、マルチモード技術) と呼ばれる 3 本の柱を軸に進められている。このうち 3 番目のマルチモード多重化においてはいくつかの困難が知られているが、ファイバ伝送中のモード同士の結合は無線通信で発展した MIMO 技術の応用で解決可能と考えられていた。しかしファイバ前後で多数の空間モードをどうやって発生・結合・分離させるのかについては、決定打となる手段が見つかっていなかった。

ファイバモードは、偏光状態がファイバの断面内の場所ごとに異なる「ベクトルビーム」の重ね合わせで表現される。任意のベクトルビームを生成するために、現時点多用されているのは、液晶空間光変調器やスパイラル位相板、フォーク状回折格子を使う方法である。しかしこれらの方式は大規模な空間光学系によるものなので、最終目標である光送信器・受信機の集積化に展開させることができない。波長多重通信用の集積化トランシーバモジュールのように、光集積回路からファイバへ、ベクトルビームを直接入出力できる方法論の発見と確立が急務であった。

2. 研究の目的

光集積回路上の導波モードを任意の次数のベクトルビームに変換し、面外方向に取り出すモード変換技術を確認する。光集積回路状の変換機構として、申請者が見出した光ナノ共振器中の複合ベクトル共振モードを利用する。この共振モードの詳細なメカニズムを解明するとともに、所望のベクトルビームを共振モードとするために必要なナノ共振器の設計指針を確認する。続いて SOI 基板をプラットフォームとして、ベクトルビーム放射素子の多並列集積化手法を実証する。

3. 研究の方法

(1) ベクトルビームの生成と制御に必要な理論基盤の整備を行う。共振モードの選択生成法、ビームの放射効率の制御法、共振線幅の制御法等の指針を得るために、理論検討と、FDTD 法による電磁界シミュレーションの両面から検討を行う。

(2) 素子の試作実験。波長 1550nm 近傍の光通信波長帯向けの素子構造を設計し、微細加工プロセスを用いた試作実験を行う。加工に伴う様々な問題を洗い出し、本提案のデバイスまでに必要な要素技術を整理する。

(3) 高速・高効率光電磁界解析技術の検討。GPGPU (汎用グラフィックプロセッサ) のメモリバンド幅による計算効率の制限を超えるために、新たに FPGA を用いた電磁界シミュレーション専用のアーキテクチャを構築する。OpenCL を用いた高効率な解析プログラムの実装法を研究し、効果を検証する。

4. 研究成果

(1) 周期構造付きディスク光共振器における共振物理の電磁界シミュレーションによる解明と整理。

① 研究開始当初は未知だったディスク共振器の共振モードの全体像を明らかにした。従来型の単純なディスク共振器の共振条件は古くから知られていたが、側壁グレーディングによる導波モード共鳴反射現象が加わることで共振曲線の振る舞いが複雑になる。いかなる構造パラメータで Q 値が高くなるのかは、研究開始当初は不明であった。また共振の偏波モードによる違いも明らかではなかった。この解析を通じて、元々の (側壁グレーディングのない) 共振器の導波モード群が、側壁の付与によりどのように変化するのが明らかになり、見通しの良いデバイス設計に役立つ知見が得られた。以下に、周期構造付き光ディスク共振器の概念図と、我々が共振マップと呼ぶ、光共振器の分散関係 (実質的な光導波部の幅と共振周波数の関係) のシミュレーション結果を載せた。

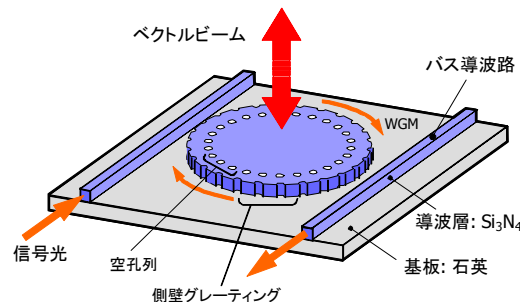


図 1. OAM ビーム入出力用ディスク共振器の概念図. 導波層には Si_3N_4 を想定. WGM は Whispering Gallery Mode の略.

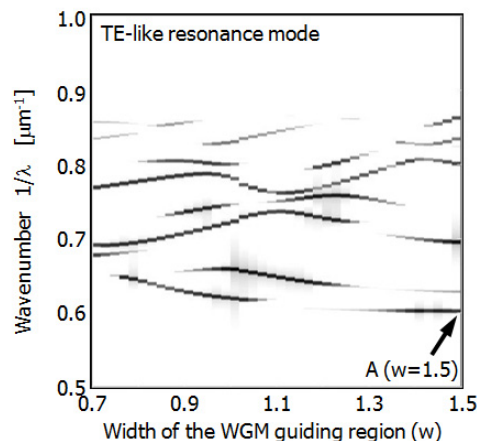


図 2. FDTD 法で求められた、OAM=0 の TE-like モード (ディスク中心付近で E_r と H_z が主成分) の共振曲線. 横軸は円孔列と側壁の間 (導波モードが伝搬する部分) の幅を表す。実線線の存在する波長で共振が起こる。

② 面外結合効率の調整方法を発見した。すなわち光集積回路の面内では強い光閉じ込めを維持しつつ、面外方向との (あるいは面外から到来する OAM ビームの) 結合効率のみ

を高い自由度で設計できることが、実際の応用デバイスの作製では重要となると考えられた。ここでは確立したシミュレーション手法を用いて様々な構造パラメータの共振器のモードを解析することで、グレーティングをどうすれば面外結合効率を制御できるかが明らかになった。以下の図3に示すのは特定のOAMビームにおける回折効率のシミュレーション結果の一例である。また図4には調整後のOAMビームの遠視野像(回折パターン)のシミュレーション結果を示した。下段左側の図で中心付近にある明点は、ディスク共振器から鉛直上方に高い指向性で放射されたOAMビームを表している。

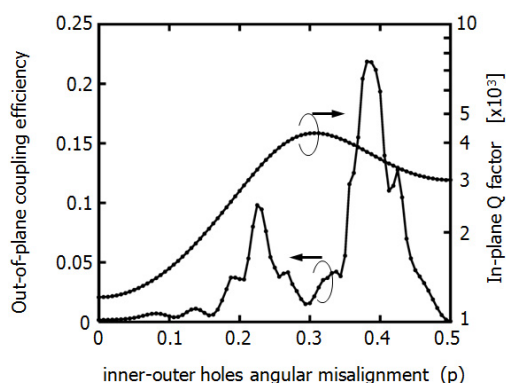


図3. あるTE-likeモードに対し、WGMの導波幅(w)を一定に保ったまま内外円孔列の配置角度差(p)を変えた際の、面外結合効率(左目盛)と面内Q値(右目盛)の変化. pの調整により両者を広い範囲で調整できることが分かった。

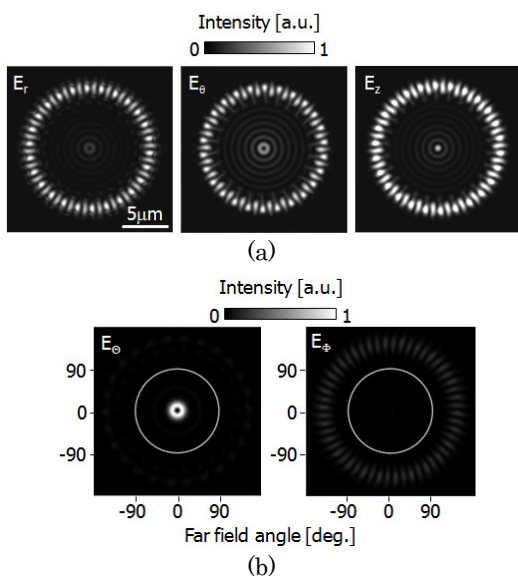


図4. 図2にAで示したTE-likeモードに対して内外円孔列の配置角度差(p)を最適化した際の(a)モードの近視野像と(b)遠視野像の計算結果。ディスク共振器図表面付近の電磁界が(a)で、(b)は放射ビームの角度特性を表す。(b)左側の明点が直上に放射するビームに相当する。

(2) 素子の試作実験と微細加工プロセス上の要素技術の整理。

本学共通利用施設所有の半導体微細加工装置と、産業技術総合研究所のナノテクノロジー・プラットフォームのスキームを利用した微細加工サービスを利用して素子の試作実験を行った。

まず下図には基板上的EBレジストに描画した直後の光導波路と共振器のパターンの電子顕微鏡写真を示す。このように通信波長帯に必要な微細度のパターンの形成可能性については確認できた。

続いて石英基板上にコア層としての Si_3N_4 膜をPECVD法にて積層する実験を行ったところ、所望の厚み1,000nm程度の透明膜が再現性良く形成できることが確認できた。なおこの方法で形成した膜の屈折率は一般的に知られている Si_3N_4 膜のそれより低く、波長1500nm前後で約1.82前後であることが判明した。これに合わせて素子の設計も行った。

続いてこの膜を光導波路・光共振器状にRIE加工する際のマスクとしてのAl膜をスパッタリングで形成し、その後Al膜上に最初に述べたEBレジストをコーティング、導波路パターンを形成して産業技術総合研究所の装置にてRIE加工を行った。本学所有の平行平板型RIE装置では Si_3N_4 膜の加工に困難が見られたが、同研究所でICP-RIE装置による加工を行ったところ良好なレートでの溝加工が確認できた。この実験を通して必要な加工条件やAlマスクの膜厚等を特定することができた。以下にICP-RIE加工後の Si_3N_4 膜断面の電子顕微鏡写真を載せた。

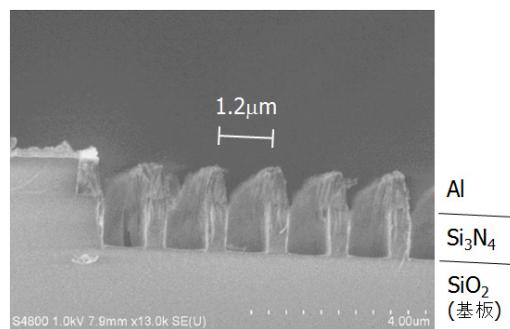


図5. ICP-RIEにより加工した Si_3N_4 膜付き石英基板の断面写真。マスク膜はAl。良好な選択比で垂直溝加工が可能であることが確認された。

(3) FPGAを用いた電磁界シミュレーションのハードウェアアクセラレーションのためのアーキテクチャの提案と実証。

本課題のようなサブ波長の微細構造を持つ光子素子中の電磁界解析を行うのに、FDTD法が多用されている。この手法は比較的シンプルな積和演算からなる方程式を繰り返し、極めて多くの空間サンプル点において繰り返し実行するもので、並列計算には適している。このことから近年、汎用グラフィック・プロセッシング・ユニット(GPGPU)上にFDTD法の処理を実装することで計算速度の向上を図

る試みが活発に行われてきた。しかし上述の通り FDTD 法では1回の計算にかかる演算量が少ないのに対し、繰り返し演算に伴う外部メモリとのデータの授受が膨大になり、これが全体の計算速度を律速してしまうことが知られていた。

そこで本研究ではこれを根本的に解決するために、FPGA 上に FDTD 法のアルゴリズムを時間・空間の二次元方向に並列化するアーキテクチャを実装し、その効果を検討した。下図には、2次元の FDTD 法に対する計算速度の向上の効果を示す。(3次元 FDTD 法についても同様の効果が明らかになったがここでは割愛した)。今回の手法によれば外部メモリとの大規模なデータ送受信の回数が大幅に少なくて済むために、大規模計算空間を限られた計算機資源で効率的に取り扱うことができることが示された。

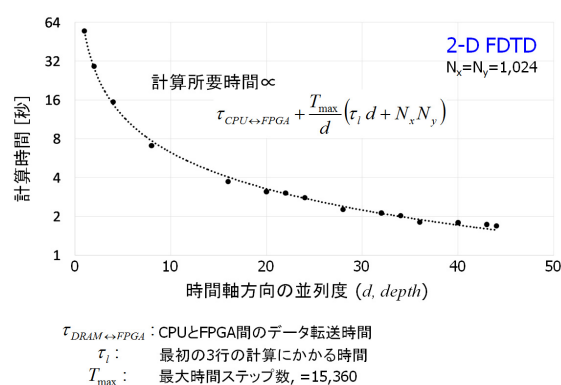


図6. FPGAによるハードウェアアクセラレーションの効果。2次元 FDTD 法シミュレーションにおいて、時空間の両方向に並列化を施す際の、時間軸方向の並列度を横軸に取っている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① H. M. Waidyasooriya, T. Endo, M. Hariyama and Y. Ohtera, “OpenCL-based FPGA accelerator for 3-D FDTD with periodic and absorbing boundary conditions,” *International Journal of Reconfigurable Computing*, vol. 2017, 2017, 6817674
DOI: 10.1155/2017/6817674
- ② 大寺康夫, “円形サブ波長・フォトニック構造の高効率解析のための電磁界シミュレーション手法とその応用,” *電子情報通信学会論文誌 C*, 査読有 vol. J100-C, 2017, 45-52 (招待論文)
- ③ Y. Ohtera, “Accuracy assessment of FDTD method for the analysis of sub-wavelength photonic structures,” *IEICE Transactions on Electronics*, 査読有, vol. E99-C, No. 7, 2016, 780-787.

DOI: 10.1587/transele.E99.C.780

[学会発表] (計 8 件)

- ① Y. Ohtera, H. M. Waidyasooriya and M. Hariyama, “GPGPU and FPGA computation of FDTD method for the analysis of nanophotonic structures,” *The 2016 International Conference for Top and Emerging Computer Scientists (IC-TECS 2016)*, paper ID 13, 2016年12月24日, 台北(台湾), 基調講演.
- ② ウィッデヤスーリヤ ハシタ, 張山昌論, 大寺康夫, “OpenCLを用いた FDTD 計算用 FPGA プラットフォームの開発,” 2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会, CS-2-8, 2016年9月21日, 北海道大学(札幌市) 依頼講演.
- ③ 大寺康夫, “光導波路・共振器の固有モード電磁界と放射界について,” *電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会, EST2016-50*, 2016年9月9日, 石垣市商工会館(石垣市)
- ④ W. M. Waidyasooriya, M. Hariyama and Y. Ohtera, “FPGA Architecture for 3-D FDTD Acceleration using OpenCL,” *37th Progress In Electromagnetic Research Symposium (PIERS 2016)*, 4A-9a, 2016年8月11日, 上海(中国)
- ⑤ Y. Ohtera, “Techniques related to FDTD simulation for the analysis of circular photonic devices having angular periodic structures,” *37th Progress In Electromagnetic Research Symposium (PIERS 2016)*, 2A-12, 2016年8月9日, 上海(中国)
- ⑥ ウィッデヤスーリヤ ハシタ, 張山昌論, 大寺康夫, “OpenCLを用いた FDTD 計算用 FPGA プラットフォーム,” *電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会, EST2016-4*, 2016年5月20日, 機械振興会館(東京都)
- ⑦ 高橋健人, 大寺康夫, 山田博仁, “GMR アシスト型 OAM ビームカプラの結合効率制御に関する検討,” *電子情報通信学会環境電磁工学研究会 EMCJ2015-59*, 2015年10月22日, 東北大学(仙台市)
- ⑧ Y. Ohtera, “Passive light control elements utilizing photonic sub-wavelength structures,” *Nano Science and Technology 2015 (Nano S&T 2015)*, 2015年9月25日, 西安(中国), 招待講演.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大寺 康夫 (OHTERA, Yasuo)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20292295

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし