

令和元年6月24日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06345

研究課題名(和文) シリコン細線導波路による光離散フーリエ変換器の設計と実装

研究課題名(英文) Design and Implementation of Si-based Optical Discrete Fourier Transformer

研究代表者

埴 雅典 (HANAWA, Masanori)

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：90273036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、光符号分割多重(OCDM)に向けた光離散フーリエ変換器(ODFT)のシリコン基板上への実装を企図したものである。4チップODFTをSi基板上に試作し、その評価を行った。試作Si基板では、光ファイバとの結合損失が大きく(20dB)、遅延線の損失に起因する振幅傾斜もあいまって消光比が5.8dBとなった。並行して、フォトリソグラフィによる光導波路(PCW)による光遅延線の小型化と振幅傾斜の補償について、数値シミュレーションによって検討を行い、PCWとSi細線導波路の結合損失の大幅低減(5.9dB→1dB)、振幅傾斜のデジタル補償により0.3dBのペナルティ改善を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

OCDM方式は、符号器・復号器に光ファイバ型回折格子や石英導波路などのこれまでの実装技術では、伝送速度の向上に限界がきている。研究代表者はこれまでに、フーリエ符号化の導入、多値変調方式の導入、デジタルコヒーレント光受信技術の導入などで本方式のブラッシュアップを行ってきたが、この結果、特に多値変調信号の導入には、従来よりも格段に高精度な符号器・復号器が必要であることが明らかになっている。本課題で、Si基板型符号器・復号器を実現することで高精度を図り、伝送速度の向上を目指した。

研究成果の概要(英文)：This research aimed to implement optical discrete Fourier transformers (ODFT) for optical code division multiplexing (OCDM). Four-chip ODFT's were designed and implemented on Si-substrates and characterized. The coupling loss of the Si-substrates were 20 dB and the extinction ratio of the ODFT was 5.8 dB in this trial. At the same time, numerical evaluations on downsizing optical delay lines based on photonic crystal waveguides (PCW) and compensation of amplitude slope due to loss of optical delay lines were performed. By incorporating a specially designed chirp-rod structure the coupling loss between a Si-nano wire and a PCW was estimated around 1.0 dB comparing with 5.9 dB without the chirp structure. Also the digital compensation of the amplitude slope resulted in 0.3 dB improvement in power penalty.

研究分野：光通信システム

キーワード：光符号分割多重 光離散フーリエ変換器 シリコン光チップ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

OCDM は将来のフォトニックネットワークの実装手段の1つとして認知されており、例えば独立行政法人情報通信研究機構と大阪大学がイタリア・ローマ大学の Cincotti 教授らのグループなど共同してアレー光導波路型(AWG)の符号器・復号器を用いる方式の研究を行なっている[1]。他にも英国・ヘリオットワット大学の Wang 教授[2]、中国・精華大学[3]など、国内外広く研究が行われていた。

[1] N. Kataoka et al., in Tech. Digest of OECC2011, 8A2_5, July 2011.

[2] Z. Gao et al., in Tech. Digest of OECC2009, WN1, July 2009.

[3] L. Yang et al., in Tech. Digest of OECC2010, 9A3-5, July 2010.

一方、研究代表者は 2008 年の OECC (光エレクトロニクスと光通信の国際会議)において OCDM 用の新しい直交符号として一般化アダマル行列であるフーリエ行列の各行を符号語として利用するフーリエ符号を提案[4]し、以後の検討[5-7]を通じ、他のグループが用いている 2 相符号に比べて多重干渉を劇的に低減できることを示した。

[4] M. Hanawa, in Tech. Digest of OECC/ACOFT2008, 1P-1, July 2008.

[5] M. Hanawa et al., in Tech. Digest of OECC/ACOFT2008, WeA-2, July 2008.

[6] M. Hanawa, in Tech. Digest of OECC2009, WN4, July 2009.

[7] M. Hanawa et al., in Tech. Digest of OECC2010, 7B2-4, July 2010.

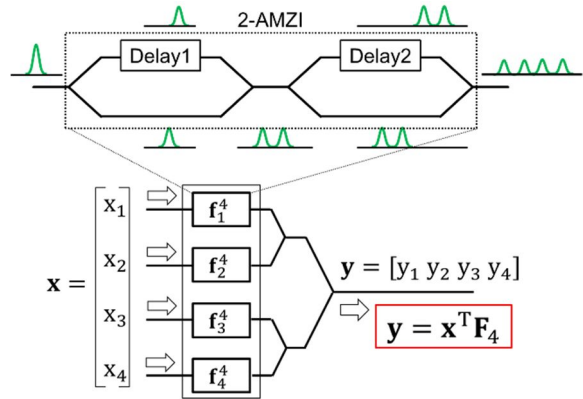
フーリエ行列は離散逆フーリエ変換に用いられる回転子行列と同一であるため、これと送信信号を乗算して得られる符号化信号は送信信号を逆フーリエ変換したものとなる。よって、これを光学的に実現する ODFT は、高速な光通信信号に対して光学的に離散フーリエ変換を実施する光離散フーリエ変換素子 (Optical Discrete Fourier Transformer) となり、フーリエ符号化 OCDM 信号はパルス化された入力信号を直交周波数分割多重 (OFDM) した一種の光 OFDM 信号とみなすことが出来る。OFDM は、昨今では主として無線通信システムにおいて最も高効率に信号多重をする手法として、様々なシステムに実装され実用化されている。光ファイバ通信システムにおいても、電氣的信号処理により生成した OFDM 信号を光直交変調器で光搬送波に乗せる形の光 OFDM 技術の検討が盛んになされているが、OFDM 信号の帯域幅が、FPGA や DAC、光直交変調器などの信号生成・変復調素子で制限されてしまう。また、OFDM 信号のコヒーレント復調のためには高安定で高出力な参照光生成用狭線幅レーザダイオード、高速 ADC・DSP などが不可欠のため、民生向け受動光ネットワーク (PON) 型アクセスネットワークへの適用は、コストのみならず安定性の面で現実的ではない。

これに対し ODFT を用いるフーリエ符号化 OCDM は、受動光学素子によって参照光を用いずに復調が可能であることから、PON への適用に適する。しかし、研究代表者も含め、従来検討がなされてきた光学的符号化/復号化素子は、多重数・精度・設計自由度 (光ファイバ型)、または安定性・コスト (石英導波路型) に難があり、実用化には程遠い状態であった。本研究では、これを Si 細線導波路で実現することによって、多重数増加、高精度、高安定、高設計自由度、低コスト化を図り、一気に実用化に近づけることを目指した。

2. 研究の目的

本課題では Si 細線導波路型 ODFT の設計と評価を行うことで、高精度、高安定、高設計自由度、低コスト化を図り、Si 基板型 ODFT を用いたフーリエ符号化 OCDM 技術の実用性を明らかにすることを目指した。具体的には、以下の様な手順で設計・制作・評価・実証実験を進めた。

研究期間初年度の平成28年度は、右図に示す2段縦続接続型非対称マツェンダ干渉計(2-AMZI)を基礎とするSi基板型4チップODFTの設計と数値シミュレーションによる基本特性の評価と、Siフォトニクスファウンドリサービスを利用した実装を行った。初回設計時にはチップ間隔は50ピコ秒(最小シンボル周期 = 4チップ × 50ピコ秒 = 200ピコ秒、最大シンボル速度5ギガシンボル毎秒)とし、



従来の光ファイバ型ODFTとの比較を可能とする。ファウンドリサービスとしてシンガポールのA*STAR's Institute of Microelectronics (IMEと略)のMPWサービスを想定していたが、ファウンドリサービスが他機関に変更になったことから、価格が当初予定した額の約2倍に変更になり、申請額に対する充当率に応じた研究費減額と合わせて、計画の大幅な変更が必要になった。チップ設計と並行して、Si基板と光ファイバの結合系を設計・構築し、素子特性評価を行う環境を整えた。

平成28年度末～29年度にかけて、納入されたSi基板型4チップODFTの特性評価実験、Si基板型ODFTの符号化/復号化、多重化/多重分離性能の評価を行うことを目指した。当初計画では、(1)位相調整用ヒータを追加して微細な位相調整機能と符号語可変機能を備えた4チップODFT、(2)8チップODFTの基礎となる3段縦続接続型非対称マツェンダ干渉計(3-AMZI)、(3)AMZIの要となるシリコン細線遅延線の短尺化を目的としたフォトニック結晶導波路、(4)シンボルレート向上のための入力短光パルスの繰り返し周波数向上用光時分割多重(OTDM)回路なども搭載したSi基板の設計・制作・特性評価を行う予定であったが、Si細線遅延線が広い基板上のスペースを必要としたことから、(2)と(4)はSi基板設計段階で取りやめた。その後Si基板試作が一度しか実施できなかったことから、8チップODFTについては未着手となった。

OCDM方式は将来のフォトニックネットワークの基幹技術の一候補と目されながら、符号器・復号器に光ファイバ型回折格子や石英導波路などのバルク素子を用いた、極基礎的な実証実験しかされておらず、その真の実力が実証されていなかった。また、これまでの実装技術では、チップ間隔の短縮、すなわちシンボル速度の向上に限界がきており、将来のPONへの適用にはよりチップ間隔を短縮できる小型の符号器・復号器の実現が欠かせない。また、研究代表者はこれまでに、フーリエ符号化の導入、多値変調方式の導入、デジタルコヒーレント光受信技術の導入など、様々な新技術の導入により、OCDM方式のブラッシュアップを行ってきたが、この結果、特に多値変調信号の導入には、従来よりも格段に高精度な符号器・復号器が必要であることが明らかになっている。本課題で、Si基板型ODFTを実現することにより、高精度なOCDM用符号器・復号器を実現するとともに、Si細線型光導波路の精密さに依拠して、チップ間隔の短縮化(シンボル速度の向上)を図る。また、OCDMシステム用短光パルス源として別途研究代表者らが研究を進めている低ジッタ低チャープ利得スイッチ短光パルス源も、将来的に同一Si基板上に集積化することによって、現在研究が進められている光IQ変調を用いる光OFDM方式よりも高速化が見込めるなど、将来のフォトニックネットワークの実現に向けた様々な新しい光技術の研究活性化を目的として研究を行った。

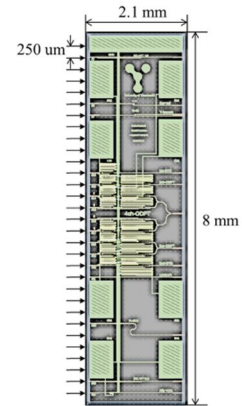
3. 研究の方法

本課題では、Multi-Project Wafer (MPW)サービスを利用して、カスタム光集積回路の作成と評価を行うとともに、ODFTのSi基板上への実装上の課題となるSi細線光遅延線の小型化を目

指したフォトニック結晶導波路型光遅延線の研究を重点的に行った。

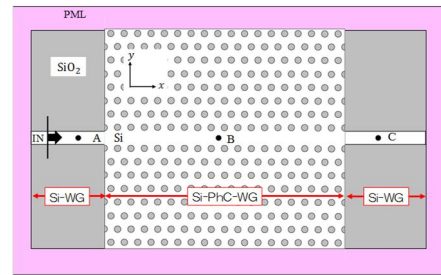
平成 28 年度

研究計画初年度は Si 細線導波路による ODFT 回路の設計と、Si 基板素子評価環境の構築を行った。右図に示す 4 チップ ODFT 回路の理論特性の解析を基本設計行くとともに、CAD 上での詳細設計を行った。充当率に応じた申請額からの減額の影響を受けて、当初予定していた光集積回路設計用 CAD ツールおよび光集積回路解析ツールの導入が不可能となったことから、フリーウェアの CAD ツールと独自開発した数値解析プログラムを用いて設計の妥当性の評価を行うこととなり、当初予定よりも大幅に時間がかかった。また、導波路用調心治具を設計構築し、Si 基板型 ODFT 素子と光ファイバの結合を可能とした。



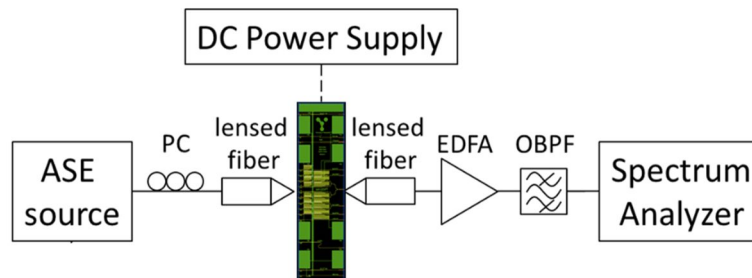
平成 29 年度

MPW サービスに Si 基板型 ODFT を発注するとともに、Si 細線光遅延線の代替を目指して、フォトニック結晶型 (PCW) 光遅延線 (右図) の理論解析を行った。PCW 光遅延線は Si 細線に比べて大きな透過屈折率を有することから、短尺な光遅延線を実現できることが期待されるが、その一方で Si 細線導波路との結合損失は著しく大きくなることが予想された。そこで、この低減を意図して円柱半径チャープ構造による埋め込み細線導波路 - フォトニック結晶導波路間の結合損失低減について、二次元有限差分時間差分法 (2D-FDTD) による数値解析を行った。



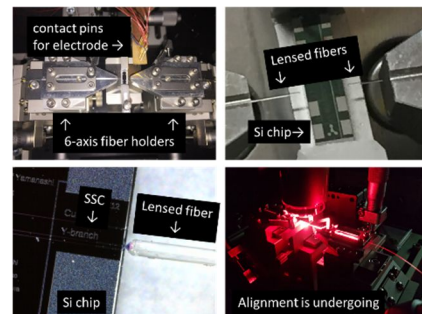
平成 30 年度

Si 基板型 4 チップ ODFT の特性評価実験を行った。下図に特性評価実験系を示す。

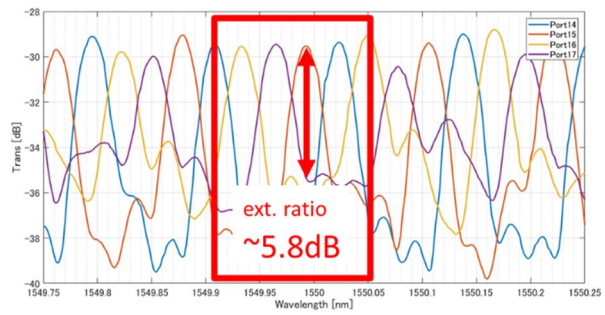


4. 研究成果

構築した Si 基板素子評価環境を右図に示す。レンズ光ファイバを利用した端面結合となっていることから、光ファイバとの結合損失が大きく、Si 細線直線導波路を結合した場合、両端の光コネクタ間の end-to-end 損失は 17~20dB であった。これを用いて 4 チップ ODFT の特性を評価した。

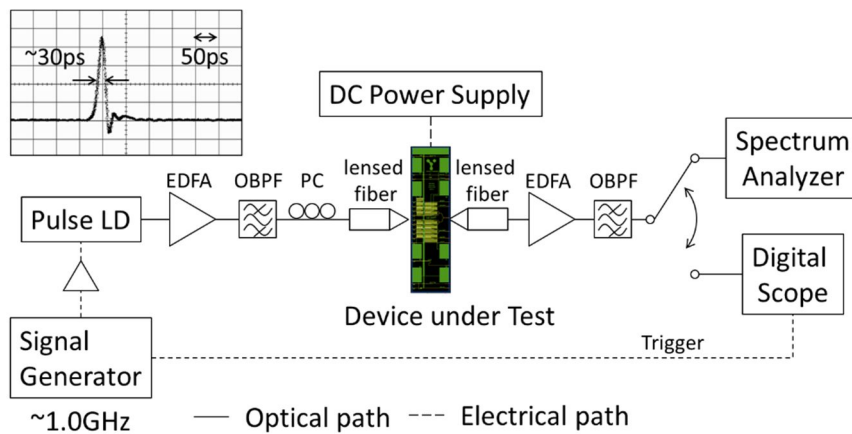


測定結果の一例を右図に示す。4つの各入力ポートに対して中心波長が異なる波長応答が観測されており、挿入損失はおおむね 29dB となっている。これは光ファイバとの結合損失（約 17dB と推定）と ODFT 内で用いられる 4 段の Y カプラの損失（3dB/段×4 段=12dB）の和であると推定され、ODFT 自体の損失は理論通り 3dB×ポート数となることが確認された。一方、消光比は 5.8dB しか無く、OCDM 実験には不十分であることがわかった。この消光比は TiN ヒータによる精密な位相調整が実現できれば改善することが期待されることから、繰り返しチップ作成を行うことができれば改善するものと思われる。

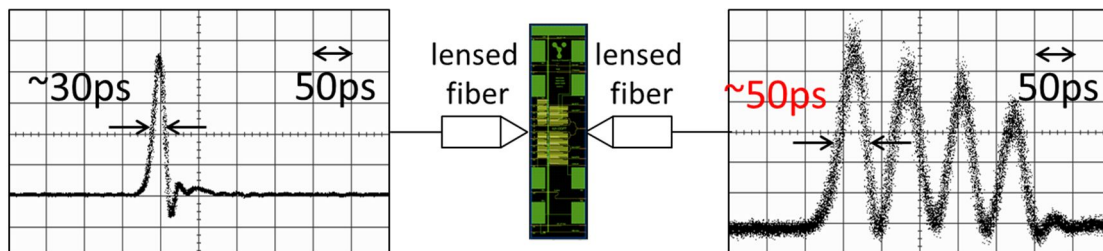


次に、パルス応答を計測した。この時に用いた実験系を下図に示す。光源には、セルフシーディングによる低ジッタ化と狭帯域光フィルタでフーリエ変換限界に近づけた利得スイッチ短光パルス源を用いた。

次に、パルス応答を計測した。この時に用いた実験系を下図に示す。光源には、セルフシーディングによる低ジッタ化と狭帯域光フィルタでフーリエ変換限界に近づけた利得スイッチ短光パルス源を用いた。



この時の出力波形の測定結果を下図に示す。結合損失が大きいことから出力信号光の S/N 比が低下しているが、設計通り等間隔の 4 つのパルスが出力されていることが確認できる。またパルス間隔は設計値の 50ps に対して、70ps 程度となっている。これは作成される Si 細線導波路の実効屈折率が不明であったことから、文献から推測した屈折率を元に Si 細線光遅延線長を決定したことが原因であり、次回作成時には修正可能である。

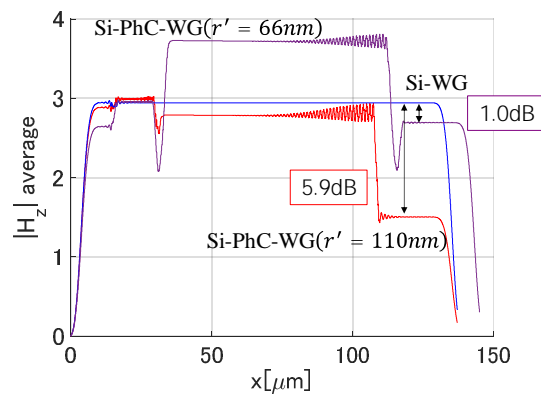
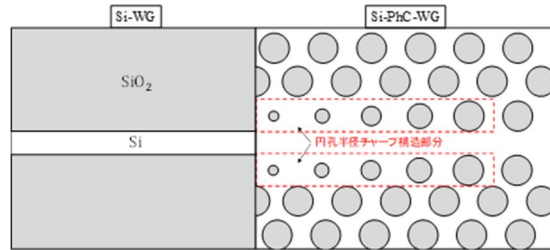


上の出力波形では、時間が遅れるほどパルス振幅が低下していることが確認できる。これも消光比の低下要因となることから、この改善法について数値シミュレーションおよび実験で検討を行った。この成果は下記文献に詳細に記されていることからここでは割愛するが、受信後にデジタル信号処理を行うことでパルス振幅低下に起因する直交性の劣化はある程度補償可能なことが明らかとなっている。

compensation of an inter-chip intensity discrepancy for a 4ch QPSK FE-SOCDM system with Si-based ODFT and electrical DFT," Opt. Express 26, 25909-25920 (2018)

次に、PCW 光遅延線について述べる。2D-FDTD 解析の結果、Si 細線導波路と PCW の結合損失は 5.9dB (Si 細線-PCW-Si 細線とすると 11.8dB) と見積もられた。4 チップ ODFT では 2 段の光遅延線、 $N = 2^M$ (M は整数) チップ ODFT では M 段の光遅延線が伝搬経路に入り得ることから、この場合の損失は $12M$ dB と見積もられ、このような巨大な結合損失は決して許容できない。そこで右図のように結合部の SiO_2 ロッド径を徐々に変化させるチャープ構造を導入して結合損失の低減を図った。Si 細線導波路-PCW-Si 細線導波路(図中では Si-PhC-WG($r' = 110\text{nm}$)), Si 細線導波路-チャープ PCW-Si 細線導波路(図中では Si-PhC-WG($R' = 66\text{nm}$)) に対する平均磁界強度の変化を右図に示す。Si 細線導波路と PCW の直接接続時の結合損失 5.9 dB に対して、チャープ構造の導入により結合損失は 1.0dB まで低減することが確認できる。 $N = 2^M$ (M は整数) チップ ODFT の損失は $2M$ dB となり、大幅な低減可能性があることが確認された。実装の観点からは、最小径が 66 nm の SiO_2 ロッドの製作は現時点の実装技術では現実的ではないと考えられる。実際に試作

Si 基板上に本構成の PCW 遅延線を構成したが、これまでのところ結合損失低減は確認できていない。実装技術の現状を考慮した結合損失低減法の考案と試作評価が今後の課題である。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- [1] Takahiro Kodama, Tomoki Nukanobu, Tatsuya Miyazaki, and Masanori Hanawa, "Collective compensation of an inter-chip intensity discrepancy for a 4ch QPSK FE-SOCDM system with Si-based ODFT and electrical DFT," Opt. Express 26, 25909-25920 (2018) (査読あり)

〔学会発表〕(計 3 件)

- [1] 埴 雅典・小玉崇宏・吉野陽紀・宮崎達也, "フーリエ符号化同期光符号分割多重伝送に向けた離散フーリエ変換器のシリコン光チップによる実装", 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 117, no. 404, PN2017-73, pp. 209-216, 2018 年 1 月. 117 209-216 2018 年 1 月
- [2] 吉野陽紀, 小玉崇宏, 埴 雅典, "Si フォトニック結晶導波路型光遅延線の結合損失低減に関する検討", 2017 年電子情報通信学会 OCS シンポジウム, P-19 2017/12/19
- [3] 吉野陽紀, 小玉崇宏, 埴 雅典, "Si フォトニック結晶導波路型光遅延線のパルス伝搬解析", 2017 年電子情報通信学会総合大会, B-10-52 2017/03/24

6. 研究組織

(1) 研究分担者
なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 小玉 崇宏

ローマ字氏名: KODAMA, Takahiro

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。