

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04689

研究課題名(和文)位相シフト方式石英系導波路型MZIアレイ分光器の開発

研究課題名(英文)silica-based planar waveguide spatial heterodyne spectrometer incorporating a phase shift scheme

研究代表者

高田 和正 (TAKADA, Kazumasa)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：20359590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：マルチモード干渉型(MMI)120°光ハイブリッドカプラーを出力側のカプラーとして組み込んだ石英導波路型MZIアレイ分光器を試作し、幅1nmのフラットトップ型スペクトルを有する狭帯域光のスペクトル再生実験を行った。その結果、フーリエ変換を利用して得られたスペクトル波形は市販の光スペクトラムアナライザで測定した実測値とよく一致しており、ピーク部分の変位は4%、バックグラウンドの残留成分(RMS値)は5%であった。また、DFBレーザから出射光に対して同様なスペクトル再生実験を行い、14GHzという設計通りのスペクトル分解能を本試作品で実現できることを証明した。

研究成果の概要(英文)：We fabricated a silica-based spatial heterodyne spectrometer incorporating 120° optical hybrid couplers as the output couplers of the individual Mach-Zehnder interferometers (MZIs). The free spectral range was 640 GHz. We retrieved a narrow-band light whose width was 1 nm with the spectrometer. The rising and falling parts of the retrieved spectrum agreed well with the actual parts. The deviations of the signals from the actual signals on the flat top were within ±4% and the background noise peaks were 8~17%. We also retrieved the spectrum of a DFB laser light. The spectral width was 14 GHz, which was the spectral resolution of the spectrometer and agreed with the designed value. Since a feature of the spectrometer is that the entire free spectral range is available for the spectral retrieval and the spectrum is derived simply without the use of an interpolation technique, our spectrometer will play an important role in developing the spectrometer to a commercially viable level.

研究分野：光計測

キーワード：光導波路 光集積回路 分光器 フーリエ変換 ハイブリッドカプラー

1. 研究開始当初の背景

光通信ネットワークや環境リモートセンシング、さらにはゲノム、医療診断を含むさまざまな分野において、小型で光スループットが大きく、スペクトル分解能が高い高性能な分光器の開発が強く望まれている。例えば、医療分野において非侵襲型血糖値測定用の有力な手段として、光を指先に照射して指の毛細血管内で反射または透過した光のスペクトルから血糖値を測定する方法がある。本方法においては、患者が自宅や外出先において簡便にスペクトル変化を測定できるように、可搬でありながら高性能な分光器が不可欠である。

バルク型分光器を導波路化することは、小型化・軽量化を実現する有力な方法である。波長合分波デバイスとして開発されたアレイ導波路型回折格子(AWG)を分光器として使用するためには、チャンネル間隔を 10GHz まで狭くする必要が生じるが、この狭チャンネル化はクロストークの増大を招く。増大したクロストークを低減する唯一の手段は、UV 照射による光誘起屈折率変化を利用することであるが、高価で大型なエキシマレーザが不可欠なことから、この方法は実用化の域に達していない。

2. 研究の目的

一定のピッチで光路長差が増加するように導波路型マツハ・ツェンダー干渉計(MZI)を同一基板上に多数配置した構成を特徴とする導波路型MZIアレイ分光器は、各MZIにおける位相差の測定と信号処理のみで分光器として実用化できる可能性を秘めている。フーリエ・コサイン変換のみを用いる従来のMZIアレイ分光器ではスペクトル再生が困難であったので、本研究は、各MZIに  $1/2$  に近い位相をスタティックに誘起する機能を具備しスペクトルを複素フーリエ変換で一意的に導出できる位相シフト型MZIアレイ分光器を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

ポート間に  $1/2$  に近い位相シフトが発生する多モード干渉型(MMI)光導波路カプラをMZIの後段カプラとして使用する導波路型MZIアレイ分光器を試作するとともに、(ii)炭酸ガスレーザ光パルスを各MZIの一方のアームに照射加熱することによって、各出射ポートから得られる光出力を校正し、かつポートにおける位相および各アームを伝播する光のパワー分配比を高精度に測定する技術を開発する。

4. 研究成果

(1) ハイブリッドカプラの試作

スーパーハイデルタ(SH)石英系導波路にて図1に示すテーパ型2入力4出力の90°光ハイブリッドカプラを設計・試作した。出射ポート間の位相関係を測定するため、予め非対称MZI干渉計の後段に当該カプラを設置した構成にてカプラの試作を行っ

た。各出射ポート(#1~#4)における透過スペクトルから#1ポートの位相に対する他ポートの位相を計算した結果を図2に示す。図より、#2~#4ポートの位相は、#1ポートの位相に対してほぼ  $1/2$  の整数倍になっていることが分かった。

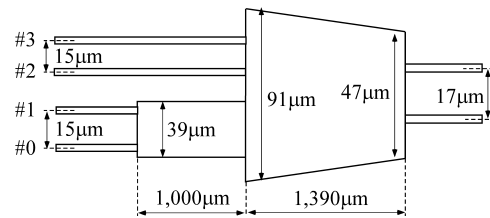


図1 テーパ型90°光ハイブリッドカプラの構成。導波路幅は6μm。

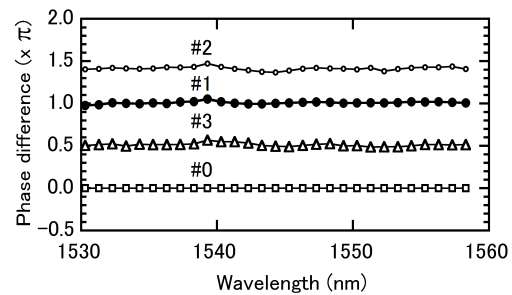


図2 ポート間の位相関係

さらに、図3に示すような長方形スラブ導波路型3入力3出力の120°光ハイブリッドカプラも設計・試作した。#1ポートの位相に対する他ポートの位相を測定した結果を図4に示す。図より、#2及び#3ポートの位相は、#1ポートの位相に対してほぼ理想的な位相シフト  $4/3$ ,  $2/3$  を実現できたことが分かる。

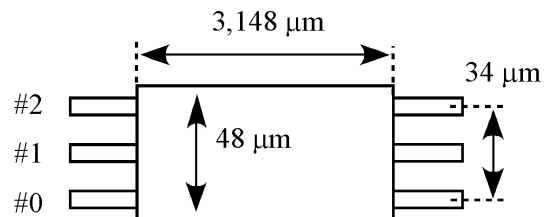


図3 長方形型120°光ハイブリッドカプラの構成

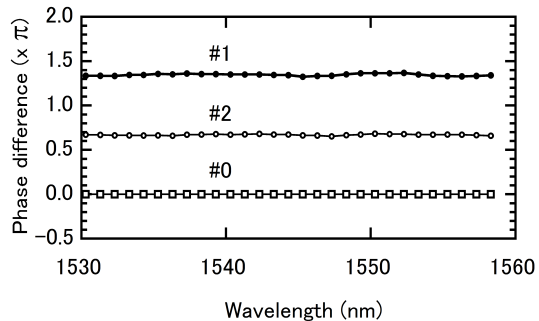


図4 ポート間の位相関係

## (2) 導波路型MZIアレイ分光器の特性

試作した導波路型MZIアレイ分光器においては、32台のMZIが搭載されていた。後段カップラとして90°ハイブリッドカップラを使用すると、各MZIにおいて4出射ポートからの光パワーを測定する必要があり、全MZIでは128回の光パワーを測定しなくてはならない。一方、120°光ハイブリッドカップラを搭載した場合には、各MZIで3回の光パワーを測定する必要があるのみで、全MZIでは96回の光パワー測定でよいことになる。そこで、光パワーの測定回数を最小とするため、後段に120°光ハイブリッドカップラを搭載した波路型MZIアレイ分光器を試作し(図5)スペクトルの再生実験を行った。

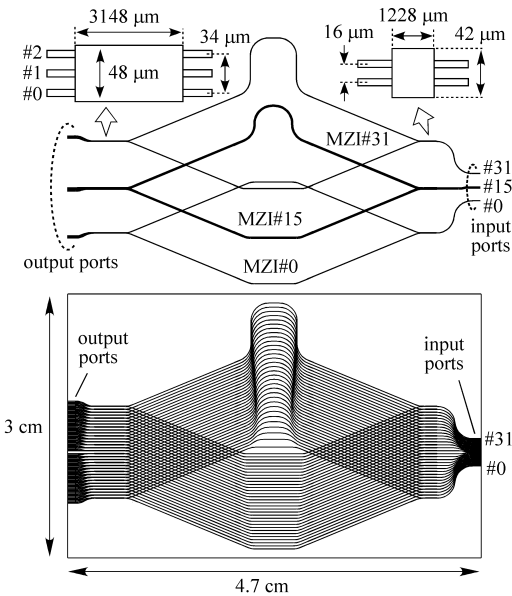


図5 試作した導波路型分光器の構成

実験系の構成を図6に示す。スペクトル再生の対象である狭帯域光をシングルモード光ファイバで各MZIの入力ポートに光結合させ、その3出力ポートからの出力光もシングルモード光ファイバで順次抽出し、トランスインピーダンス増幅器によって光パワーから電圧に変換した。出力電圧をA/D変換してPCで信号処理した。3軸微動台をマニュアル操作して導波路と光ファイバの光結合を行ったため、結合効率の変動によって各MZIからの出力信号が変化してしまう可能性があり、本実験においては測定した出力を精度よく校正することが重要課題であった。そこで、図に示すように、CO<sub>2</sub>ガスレーザとシリンドリカルレンズを用いた照射系を構築した。ここで、レーザからのCW出力パワーは12Wであり、幅0.38msのTTLパルスで駆動した。レーザ光のスポットサイズは4mmであり、ビームエキスパンダーで4倍に拡大した。拡大されたビームは、直径6mmのアパーチャを通過し、焦点距離が4cmのシリンドリカルレンズで各MZI

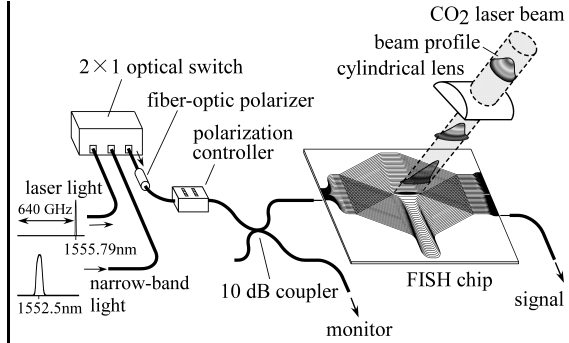


図6 アレイ分光器を校正するための実験系

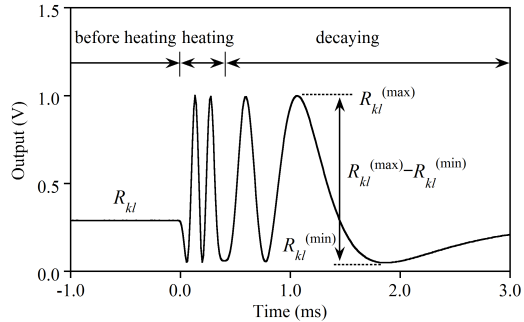


図7 レーザ照射時に観測された波形。MZI # $k(k=0,1,2,,31)$ の出射ポート# $l(l=0,1,2)$ に対する波形において、ピークとボトム値をそれぞれ  $R_{kl}^{(max)}$ ,  $R_{kl}^{(min)}$  とした。

の短い方の導波路アームに集光させた。ここで、光路長が短い方から順番にMZI #  $k(k=0,1,2,,31)$  と全32台のMZIを命名した。また、光ハイブリッドカップラの出射端を# $l(l=0,1,2)$ とした。

各MZIにおいて、狭帯域光を入射させてその出射パワーを測定した直後に、波長が1555.79nmのDFBレーザ光を入射させた状態で短い方のアームにCO<sub>2</sub>レーザパルス光を照射してDFBレーザ出力のピークピーク (peak-to-peak) 値を測定した。このとき観測された典型的な波形を図7に示す。レーザ加熱中では出力波形は急峻に変化して増幅器の帯域を超えてしまいピーク値を正確に測定できない可能性があったので、温度が初期値に戻る時間帯での波形からピーク値である  $R_{kl}^{(max)}$  とボトム値である  $R_{kl}^{(min)}$  を測定し、 $R_{kl}^{(max)} - R_{kl}^{(min)}$  によってピークピークとした。あらかじめ狭帯域光に対して測定した出力電圧をこのピークピーク値で除算することにより狭帯域光に対する校正出力を求めた。

図8(a)と(b)は、狭帯域光およびDFBレーザ光をそれぞれ各MZIに入射させたときに、120°ハイブリッドカップラの各出射ポート ( $l=0,1,2$ ) から得られた出力電圧を測定した結果である。5番目降のMZIに対しては、出力電圧の変化は両者とも同じプロファイルで変化しており、DFBレーザ光によってMZIへの結合効率のみならず光導波路損失をもモニターできていることが分かる。図8(c)は、DFBレーザ光の出力から得られたピークピーク値で狭帯域光

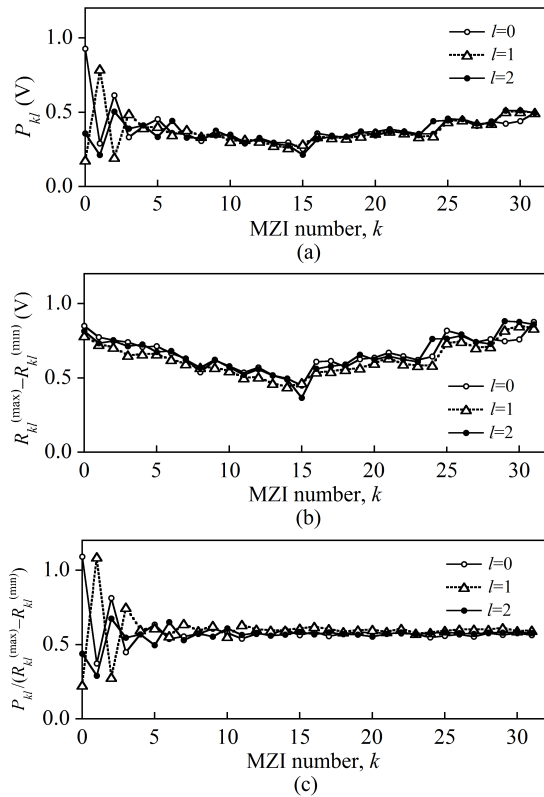


図8 (a) 狭帯域光および(b) DFBレーザ光を入射させたときのMZI出力。(c) 狭帯域光に対する校正値

の出力を校正した結果である。

フリースペクトルレンジの分割数を  $M$ 、狭帯域光のスペクトルデータを  $\{G_m\} (m=0, 1, \dots, M)$ 、DFBレーザ光の強度を  $G_L$ 、MZI #  $k$  における狭帯域光に対する複素フリンジの実数部と虚数部をそれぞれ  $\{X_k\}$  および  $\{Y_k\}$ 、相対光パワーを  $\{Z_k\}$  とすれば、校正された出力値である  $F (l=0, 1, 2)$  を用いて  $X_k, Y_k, Z_k$  は以下の連立線形方程式から一意的に求められる。ここで、 $d_{kl}$  はMZI #  $k$  の  $l$  番目の出射ポートにおけるMZIの両アーム間の位相差である。また、 $d_{kl}$  は両アームを伝播した光波の振幅の比とその逆数の和を表す。いずれのパラメータも、図6に示したレーザ照射系を用いて事前に測定した

$$\begin{pmatrix} 2 \cos \phi_{k0} & -2 \sin \phi_{k0} & d_{k0} \\ 2 \cos \phi_{k1} & -2 \sin \phi_{k1} & d_{k1} \\ 2 \cos \phi_{k2} & -2 \sin \phi_{k2} & d_{k2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{pmatrix} = 4 \begin{pmatrix} F_{k0} \\ F_{k1} \\ F_{k2} \end{pmatrix}$$

図9は、各MZIにおいて、校正した出力値  $F_{kl}$  とパラメータ  $d_{kl}$  および  $d_{kl}$  の値を用いて上式から得られた  $X_k/Z_k$  および  $Y_k/Z_k$  を示す。狭帯域光のスペクトル波形も図中に示す。狭帯域光の幅はフリースペクトルレンジ (640 GHz) のほぼ三分の一であったので、10番目以降のMZIではシミュレーション通り出力変動はほとんどゼロとなった。すなわち、DFBレーザ光を用いた校正によ

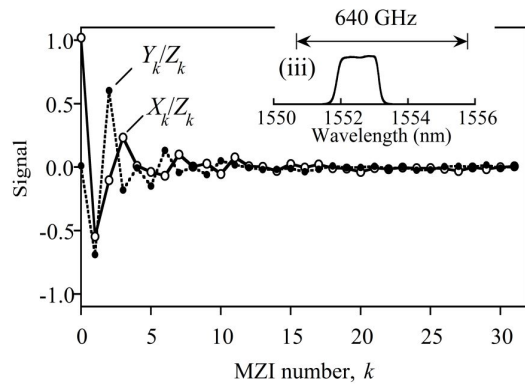


図9 複素フリンジの規格化された実数部と虚数部。スペクトル波形も図中に示す。

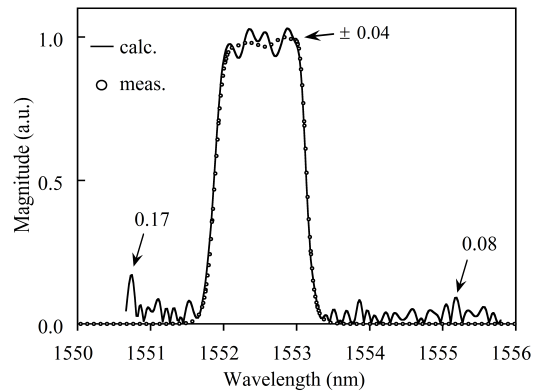


図10 アレイ分光器で再生されたスペクトル(実線)と実測値(白丸)

ってマニュアル結合の変動や導波路損失の影響を受けずに複素フリンジの実数部と虚数部を導出できたことを示す。

図10は、複素データ系列  $\{X_k/Z_k + i Y_k/Z_k\}$  のフーリエ変換を計算し、その絶対値であるスペクトルを計算した結果を実線です。ここで、フーリエ変換を行う際に窓関数は使用せず、またスペクトルデータのピークの値は1に規格した。市販の光スペクトラムアナライザで測定した狭帯域光のスペクトルを白丸で示した。図より、窓関数の使用によるスペクトル平滑化をせずとも、実測値と計算値は全体的にかなり一致することが分かった。特に、スペクトルの立ち上がりおよび立下り部分では、計算値は実測値とよく一致した。一方、スペクトルの平坦部分の変動は4%であった。また、本来スペクトル成分が存在しない波長域においては局所的に17%に相当するピーク、RMS (二乗平均平方根) 値として5.1%の変動が観測された。本方式ではデータ系列  $\{X_k/Z_k + i Y_k/Z_k\}$  のフーリエ変換のみでスペクトルを導出したため、今回のスペクトル再生実験で観測された変動は、連立方程式を解く際の実出力  $F_{kl}$  とパラメータ  $d_{kl}$  および  $d_{kl}$  の実測値に誤差が発生していることに起因することは明らかである。今後は、測定値の誤差要因を解明して再生スペクトル内の変動を抑制するとともに、幅の異なる多数のスペクトル光を用いて再生実験を進め、導波路型分光器の特性向上と実用化を通じた応用分野の開拓を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

R. Uda, K. Yamaguchi, K. Takada, and K. Okamoto, "Fabrication of a silica-based complex Fourier-transform integrated-optic spatial heterodyne spectrometer incorporating 120° optical hybrid couplers" Appl. Opt. 査読宥, vol. 57, 2018, 3781-3787.

DOI:10.1364/AO.57.003781

〔学会発表〕(計3件)

宇田力、他、ハイブリッドカプラーを搭載した複素フーリエ変換型 FISH 分光器の作製、第65回応用物理学会春季学術講演会、2018年3月

齊藤、他、複素フーリエ変換型 FISH 分光器用の光 120°ハイブリッドカプラー作製、第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月

山口、他、複素フーリエ変換型 FISH 分光器用光 90°ハイブリッドカプラーの作製、第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

高田 和正 (TAKADA Kazumasa)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：20359590

(2)研究分担者

なし ( )

研究者番号：

(3)連携研究者

なし ( )

研究者番号：

(4)研究協力者

岡本 勝就 (OKAMOTO Katsunari)

宇田 力 (UDA Chikara)

齊藤 勝文 (SAITOH Katsuhumi)

山口 航平 (YAMAGUCHI Kohei)