

令和元年6月14日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14676

研究課題名(和文) オンチップ型フーリエ変換赤外分光(FT-IR)システムの実証

研究課題名(英文) Demonstration of on-chip Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) system

研究代表者

高 磊 (Kou, Rai)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員

研究者番号：40650429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、可動部品の省略および小型化を目的としたシリコンの熱光学効果(TO)によるフーリエ変換型オンチップスペクトラムアナライザを提案した。シリコンフォトニックプラットフォーム上に形成された素子は高抵抗Taヒータとマッハツェンダ干渉計から構成され、そのサイズはわずか0.88 mm<sup>2</sup>にて実現できた。スペクトル分解能とS/N依存性を明らかにするため、狭線幅波長可変レーザに対してヒータ出力強度1.69 Wでは20 dBを越えるS/Nが得られ、51 cm<sup>-1</sup>のスペクトル分解能(波長12.3 nm)を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

周波数領域におけるスペクトル解析はもっとも基礎的な光計測手段のひとつである。例として、光通信分野では損失や変調帯域、分散、伝送路上の信号対雑音比を含む数値を得られるほか、材料科学や環境計測の分野では分子の回転および伸縮振動に由来する吸収ピークを評価できる。本研究ではシリコンフォトニクス技術による平面光波回路を活用することで、小型かつ低コストで分光器を作製できる可能性を見いだした。

研究成果の概要(英文)：We demonstrate a planar-lightwave optical spectrum analyzer operated by discrete Fourier-transformation processing. The large thermo-optic (TO) coefficient in silicon realized an efficient modulation of optical length in one arm of Mach-Zehnder interferometer. In the device measurement, different conditions in the heater power were investigated with a narrow-line width tunable laser diode (TLD) to figure out the spectrum resolution, as well as SNR dependence up to 1.69 W (corresponding to 62 times of PI phase shift at 500 sampling points). Through the post-processing of discrete Fourier-transformation, the acquired time-domain interferogram is converted to frequency domain spectrum. A minimum frequency resolution of 51 cm<sup>-1</sup> (12.3 nm) at the C-band telecommunication wavelength is obtained. The total size of active region is only about 8.8 mm<sup>2</sup>, and SNR of above 20 dB is observed.

研究分野：光集積回路

キーワード：シリコンフォトニクス フーリエ変換赤外分光(FT-IR) 光集積回路 光センシング 周波数解析

1. 研究開始当初の背景

周波数領域におけるスペクトル解析はもっとも基礎的な光計測手段のひとつである。光通信を例にとると、光変調スペクトルのモニタリングは損失、変調帯域、分散および伝送路上の信号対雑音比（SNR）を含むデータを得られる。また、近～中赤外光領域（波長 1-10  $\mu\text{m}$ ）は分子の官能基における伸縮や変角振動が光エネルギーと一致するため、THz 帯と並んで古くから「指紋スペクトル帯」と呼ばれる。従って、測定対象物の透過もしくは反射光の赤外スペクトルを照査することで分子の定性および定量分析が可能であり、材料科学や環境計測などに幅広く活用される。

一般的な光スペクトル解析装置（分光器）では、そのほとんどが回折格子を有する自由空間光学系から構成されてきた。図 1 に主要な分光器の種類および素子構成を示す。デュアルコム型およびフーリエ変換型は、既存の分光受光型、狭線幅光源型やフィルタ波長掃引型と比較してシステム構成が複雑であるが、周波数分解能や感度、処理時間において優位である。その一方、汎用的なセンシング素子として将来に渡って利用するにあたり、集積化や低コスト化などで課題を有していた。過去の研究報告では、離散フーリエ変換（DFT）処理により微小電気機械システム（MEMS）ベースの小型マイケルソン干渉計が提案されているが、空間光学系による装置と同様、機械的な可動部品による長期信頼性などで懸念があった。

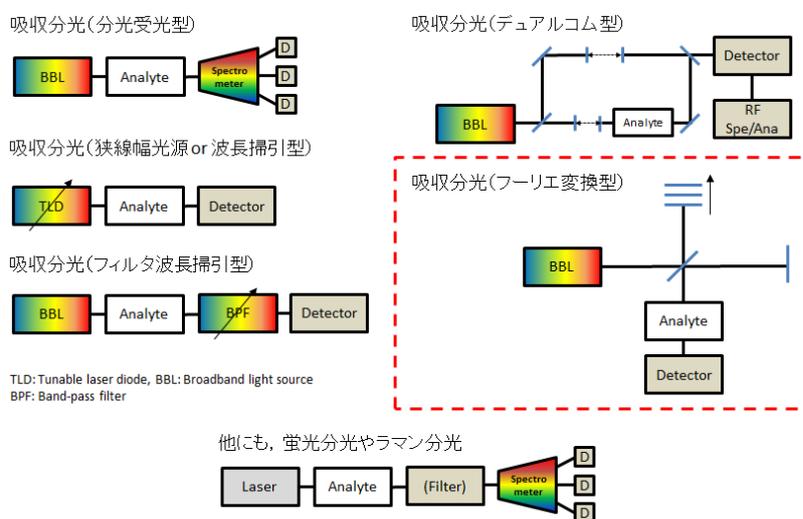


図 1 分光器の種類と素子構成

2. 研究の目的

本研究の目的は、シリコンフォトニクス技術によって構成されたマッシュツェンダ干渉計（MZI）およびシリコン中の熱光学効果（TO）を活用することにより、小型かつ堅牢なフーリエ変換赤外分光（FT-IR）素子の動作を実証することにある。既存の FT-IR 装置は図 2 に示される通り、マイケルソン干渉計より構成され、片アームの光路長可変ミラーにより得られた干渉インターフェログラムを高速フーリエ変換することによって高分解能および高 S/N 比の分光を可能にする。代表的な装置サイズは、幅 80 x 奥行き 50 x 高さ 30  $\text{cm}^3$  以上に及ぶ。それに伴い、精密に設計された光学系は材料や製造コストに反映され、一般的には研究開発機関や大学のみが所有する大型かつ高価な理化学分析機器である。

それに対して、シリコンフォトニクス技術では超小型・集積化、および低コスト化を特徴としており、本研究提案に相応しい基盤技術といえる。特に、従来の石英系材料と比較してコア・クラッド材料間の屈折率差を大きくできること、それにより光導波路を急峻に曲げられ集積密度が向上すること、光変調・受光が可能なアクティブデバイスに成りうること、安価かつ大量生産に適した CMOS プロセスと互換性を有するなどの特徴を持ち、将来的な産業化展開では圧倒的に有利である。本研究における TO 効果はシリコン導波路直上に高抵抗金属配線を形成することで、電力印加により発熱し、シリコンコアの有効屈折率を調整する。その結果、両アーム間に調整可能な光路差を持たせ、干渉インターフェログラムおよび赤外スペクトルを得る仕組みである。図 3 に提案した素子の概要図を示す。Ta の高抵抗ヒータ金属を含む MZI 干渉計であり、設計した素子の面積はわずか横 11 mm x 縦 0.8 mm であった。

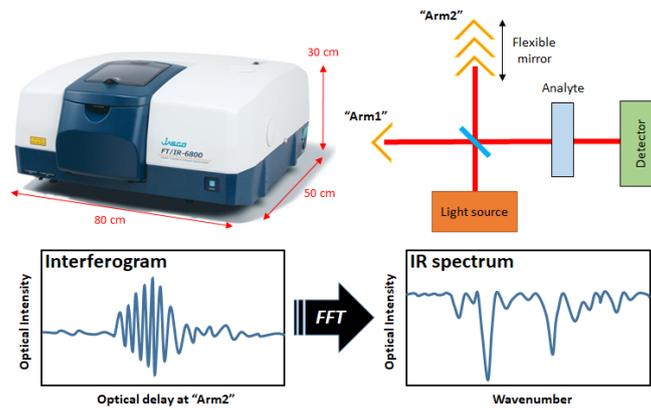


図2 既存システムの構成および自己相関干渉波形と DFT 後の光スペクトルイメージ

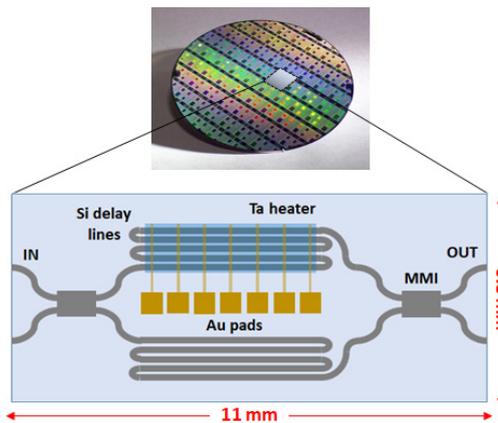


図3 提案するシリコンフォトニクス集積型 FT-IR 分光器の構成

### 3. 研究の方法

周波数領域で期待される単位温度あたりの理論分解能は、上/下アーム間の光路長差 $\Delta L$ 、シリコン導波路の実効屈折率、シリコンの TO 係数 ( $dn/dT : 1.8 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$ ) によって算出できる。図4は $\Delta L$ に対応する周波数分解能を示す。例えば、 $6 \text{ cm}^{-1}$ 以下の周波数分解能を得るためには、 $\Delta L$ は約  $0.4 \text{ mm}$  必要である。素子設計においては、 $8 \text{ mm} \times 7$  回折返しのシングルモード導波路を両アームに設けた。光学設計では、断熱型の逆テーパシリコン導波路が両端に備え、細径 TEC ファイバと導波路間の結合損失を抑制した。スポットサイズ変換器の先端幅は  $210 \text{ nm}$ 、 $\text{SiO}_2$  オーバークラッドの厚さは  $1.2 \mu\text{m}$  とし、TE 偏光に調整された入射光は光結合の後、多モード干渉カップラ (MMI) によって均等に分割され、光路長変調領域へ導波される。本領域のシリコン導波路は、光モードフィールドの重なりを最大化、および熱容量を減らすために幅  $3 \mu\text{m}$  と設定した。MMI によって再び合波した後、所望の周波数スペクトラムは一般的なフーリエ変換赤外分光法と同様、インターフェログラム (すなわち自己相関干渉波形) の DFT 処理を通して与えられる。

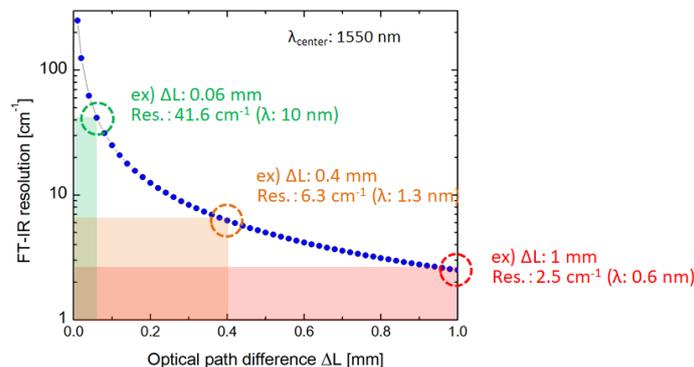


図4 アーム間光路長差 $\Delta L$  と周波数分解能の関係

#### 4. 研究成果

はじめに、 $1.55\ \mu\text{m}$  帯の狭線幅波長可変レーザに対応するインターフェログラムを取得した。図 5 では、周波数分解能と印加電力、および S/N との関係を示すため、ヒータ出力強度： $0.33, 1.00, 1.69\ \text{W}$  で取得された (a) インターフェログラム、および (b) DFT 処理後のスペクトルをそれぞれ示す。その結果、ヒータ電力  $0.33\ \text{W}$  ではスペクトルが広帯域に広がる一方、同  $1.69\ \text{W}$  では  $20\ \text{dB}$  を越える SN が得られ、 $51\ \text{cm}^{-1}$  のスペクトル分解能（波長  $12.3\ \text{nm}$ ）を達成されている。最大電力印加時では、 $62$  回の  $\pi$  位相シフト（約  $27\text{mW}/\pi$ ）に相当し、 $500$  サンプルポイントを取得できる。なお、入出力を含む素子の挿入損失は約  $8.5\ \text{dB}$  であった。

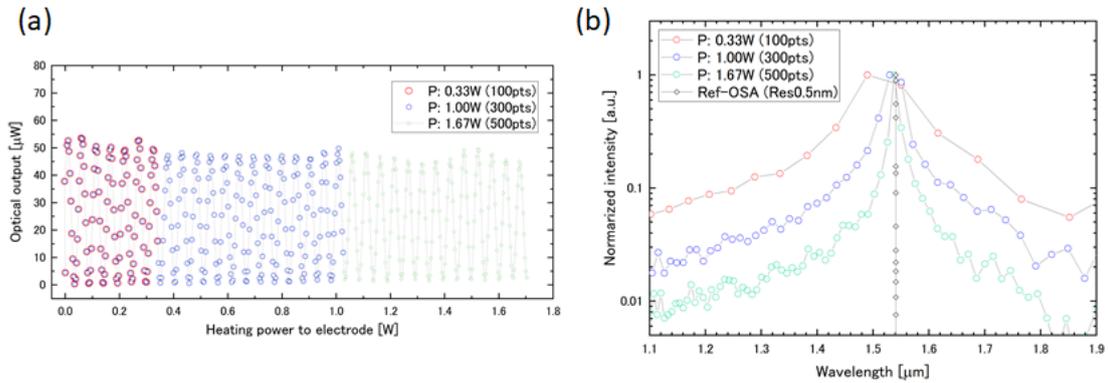


図 5 (a) 単一波長のインターフェログラム (b) DFT 処理後のスペクトル変化

続いて、光通信分野への適用性を探るため、 $2$  波長多重システムを想定した複数光源（ $1.31$  および  $1.55\ \mu\text{m}$ ）を入射し、そのスペクトルを解析した。図 6(a) は同インターフェログラム、および (b) DFT 処理後のスペクトルをそれぞれ示す。ピーク波長は期待通り反映されている一方、 $1.31\ \mu\text{m}$  では大きな波長シフトおよび S/N 低下が観測される。劣化の原因は幾つか考えられ、①導波路分散および材料分散による波長依存性、②Ta ヒータ抵抗の非線形性、③上下アーム間の熱干渉などである。特に、原因③のアーム間干渉に関して、ヒータ電力  $3.06\ \text{W}$ （ $900\ \text{pts}$  に相当）のインターフェログラムを観察したところ、ヒータ電力が増大するにつれて出力光強度の減衰や位相変調の不安定化が顕著となったことから、最優先に解決すべき問題と推測される。本研究は継続して行われており、より低い電力で動作するために設計改善した素子を現在加工中である。その結果、光位相変調効率に貢献し、忠実度の高いスペクトル出力が見込まれている。

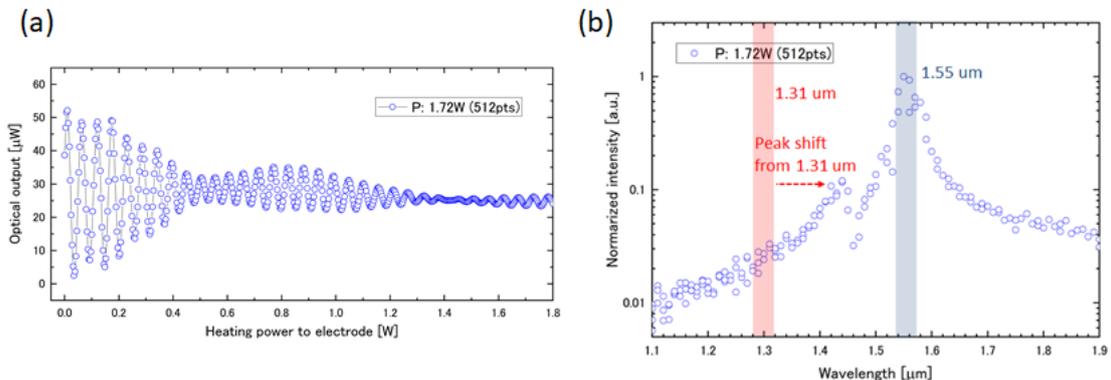


図 6 (a) 複数波長のインターフェログラム (b) DFT 処理後のスペクトル

以上より、シリコンフォトニクス技術を FT-IR システムへ適用することで、既存の機械的な可動部品を排除できるほか、光軸調整フリー、高耐久性、低消費電力、更にはサイズ/コスト低減を期待できる平面光波回路の小型分光器を提案した。シリコンフォトニクス技術は電子回路との集積互換性が高いことから、フーリエ変換処理が可能な ASIC 回路とのモノリシック集積を念頭に、更なる発展を期待したい。

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

- (1) R. Kou, G. Cong, Y. Maegami, M. Okano, N. Yamamoto, K. Yamada  
Discrete Fourier-transformed optical spectrum acquisition in delay-tunable Mach-Zehnder interferometer  
SPIE/COS Photonics Asia 2018
- (2) R. Kou, G. Cong, Y. Maegami, M. Okano, N. Yamamoto, K. Yamada  
Thermo-optically Controlled Silicon Photonic Circuit for Frequency Domain Analysis  
Microoptics Conference 2018
- (3) G. Cong, M. Okano, Y. Maegami, R. Kou, M. Ohno, K. Yamada  
Digital Delay Line for On-Chip Autocorrelator  
OECC/PSC 2019
- (4) 高 磊, Cong Guangwei, 前神 有里子, 岡野 誠, 山本 宗継, 大野 守史, 山田 浩治  
シリコンフォトンクス技術による周波数および時間領域計測  
2019年 電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
- (5) 高 磊  
シリコンフォトンクス干渉計を用いた短パルス光および光波長計測  
国際光デーシンポジウム 2019

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

研究代表者氏名：高 磊

ローマ字氏名：(Kou Rai)

所属研究機関名：産業技術総合研究所

部局名：エレクトロニクス・製造領域 電子光技術研究部門

職名：研究員

研究者番号 (8桁)：40650429

※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。