

MEMS 型ファブリ・ペローフィルタを用いた CO₂/H₂O ガスセンサ

原 仁*, 鈴木 健太郎*, 岸 直輝*, 野呂 誠*, 渡辺 哲也*, 岩岡 秀人**

CO₂ / H₂O Gas Sensor with a MEMS Fabry-Perot Filter

Hitoshi HARA*, Kentaro SUZUKI*, Naoki KISHI*, Makoto NORO*,
Tetsuya WATANABE* and Hideto IWAOKA**

Abstract : A tunable electrostatically driven MEMS Fabry-Perot Filter (FPF) with a wide wavelength range from 2.5 μm to 4.5 μm has been developed for non-dispersive infrared (NDIR) CO₂ / H₂O gas sensors. The FPF has been developed by silicon-CMOS-compatible and MEMS fabrication process. The electrostatic discharge (ESD) test and the long-term repetition-stability test were carried out on the FPF, and no remarkable changes in the FPF's performance were observed in either test. The FPF peak wavelength drift after repetition of applied voltage was observed to be less than 0.9%. An NDIR system was equipped with the FPF, and the principles of the gas sensing method were confirmed. The gas sensor was 12 mm in diameter and 70 mm in length. The resolutions defined by standard deviation were about 13 ppm for 2000 ppm of CO₂, and 0.35 g/m³ for 22.5 g/m³ of H₂O.

Keywords : Fabry-Perot filter, NDIR, gas sensor, carbon dioxide, humidity

1. はじめに

近年, 二酸化炭素ガスは, 居住空間の空気質 (AirQuality) をモニタするのに有効な指標となっている. ビルやホールなどの建築物では, 空調に莫大なエネルギーが費やされているが, 居住空間の二酸化炭素濃度を計測して空気質を確保しながら必要最小限の大气導入の換気を行えば, 消費エネルギーの大幅な削減が可能になる. たとえば, 財団法人省エネルギーセンター資料^{1), 2)}によれば, デパート試算例では外気の取り入れ量を 20%削減すると冷房負荷削減電力は 509,124,000kWh/9.5 ヶ月となっている. このような空調関連のランニングコスト削減は, 「エネルギーの使用の合理化に関する法律 (省エネ法)」の改正に対応する 1 手段となる. さらに, 住宅や建築物の省エネルギー基準の強化による高気密・高断熱への取り組みが進むにつれて, 現代病であるシックハウス症候群や小児喘息などの対策で重要なポイントとなる空気質を確保するための換気と湿度の最適化が要求されるようになってきている. 住居における法的規制はないが, 「ビル衛生管理法」は居住空間の二酸化炭素濃度 1000ppm 以下, 相対湿度 40%RH~70%RH が管理の基準値になっている. これらのモニタリングのために, 二酸化炭素濃度が数 10ppm, 相対湿度が数%RH で検出できる低価格センサが要求されている.

二酸化炭素ガスの計測には, 「赤外線吸収方式」と「固体電解質センサ」が広く用いられているが, 「赤外線吸収方式」は精度と安定性の点で優れている. 湿度も「赤外線吸収方式」で計測が可能で, 感湿膜を用いた電子式湿度センサより結露に強く安定性に優れている. われわれは 2 波長の誘電体多層膜赤外フィルタと単結晶 Si マイクロボロメータを用いた 2 光路 2 波長 NDIR³⁾で動作実証をしてきたが, 更なる構造の簡略化と低コスト化を考え, 参照波長, 水蒸気 (湿度) 吸収波長, 二酸化炭素吸収波長の 1 光路 3 波長 NDIR が構成できる MEMS 型ファブリ・ペローフィルタ^{4), 5)}に着目した. 本論文は, 参照波長, 水蒸気吸収波長, 二酸化炭素吸収波長の 3 波長を静電駆動で選択できる MEMS 型ファブリ・ペローフィルタ^{6~8)} (FPF と略) を組み込んだ 1 光路 3 波長 NDIR ガスセンサについて評価結果を報告する.

2. センサ構成

NDIR ガスセンサの概略を Fig. 1 に示す. 動作原理

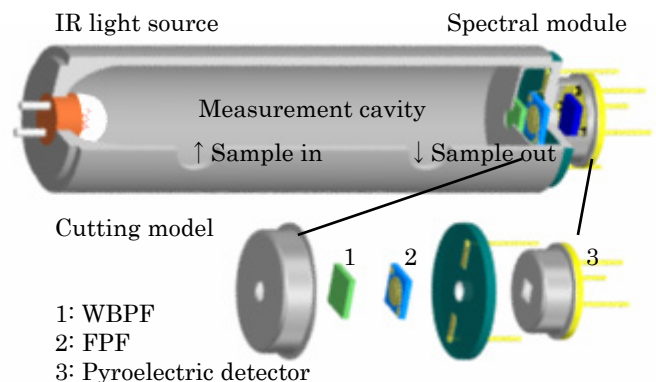


Fig.1. Schematic diagram of the NDIR gas sensor

*横河電機(株) 技術開発本部先端技術研究所 MEMS 研究室
〒399-4394 長野県上伊那郡宮田村 2061
MEMS Laboratory, Advanced Technology Research
Center, Corporate Research and development
Headquarters, Yokogawa Electric Corporation
**横河電機(株) 技術開発本部技術連携推進センター
〒180-8750 武蔵野市中町 2-9-32
Corporate Research and development Headquarters,
Yokogawa Electric Corporation
(Received January 28, 2004)

は、赤外光源から出射された赤外光のうち被測定ガスの特性吸収波長の赤外光は、被測定ガスの濃度とキャビティ長に応じて吸収される。広帯域フィルタ (WBPF) と FPF によって、被測定ガスの特性吸収波長とそれ以外の参照波長の 3 波長を選択し、赤外検出器に到達する 3 波長の赤外光量をそれぞれ測定し比較することにより、キャビティ内の被測定ガスの濃度を測定することができる。湿度 (H₂O) と二酸化炭素 (CO₂) の特性吸収波長はそれぞれ 2.7 μ m と 4.2 μ m 付近にある。

FPF は 1 つのピーク波長を挿引して参照波長と測定波長の 2 波長を選択するのが一般的であるが、ここでは 2 つのピーク波長を挿引して 3 波長を選択する独自の方法を提案した。FPF の波長範囲の仕様を、初期状態の 2 次ピーク波長は参照波長 3.4 μ m、静電駆動による 2 次ピーク波長の挿引範囲は 3.4 μ m \sim 2.5 μ m、1 次ピーク波長の挿引範囲は 6.2 μ m \sim 4.2 μ m とした。1 次と 2 次のピーク波長は、波長 2.5 μ m \sim 4.5 μ m の広帯域フィルタで選択される。Fig. 2 に示すように、初期状態の 2 次ピーク波長を静電駆動により 2.7 μ m まで挿引して H₂O 濃度を測定し、さらに静電駆動により 1 次ピーク波長を 4.2 μ m まで挿引して CO₂ 濃度を測定する。

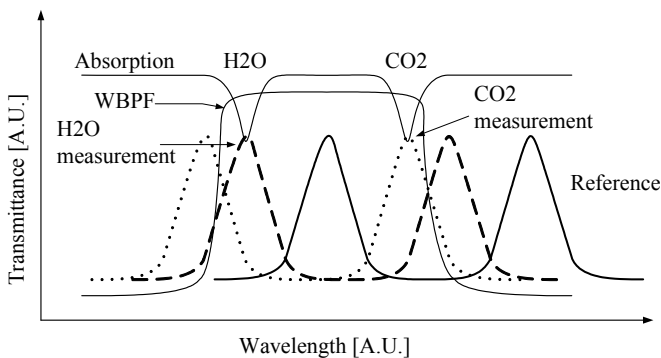


Fig.2. Wavelength used for gas measurement

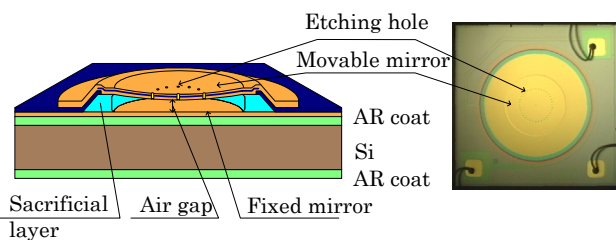


Fig.3. Schematic diagram of Fabry-Perot filter

Movable mirror	Poly-Si/SiN/Poly-Si: $\lambda/4$ 1070 Å/700 Å/1070 Å
Air gap	NSG/PSG/NSG: λ Total: 32500 Å
Fixed mirror	Poly-Si: $\lambda/4$ 2580 Å
AR coat	SiO ₂ : $\lambda/4$ 6120 Å
	Si substrate 525 μ m
AR coat	SiO ₂ : $\lambda/4$ 6120 Å

Fig.4. Cross section of Fabry-Perot filter

3. ファブリ・ペローフィルタ設計

FPF の概略図 (斜視断面) を Fig. 3, 各光学膜の膜厚の構成を Fig. 4 に示す。各光学膜厚は SHW (Single Half-Wave system filter) 型の設計に基づいている^{9), 10)}。設計中心波長 λ は 3.4 μ m である。2 次ピーク波長の可変範囲 3.4 μ m \sim 2.5 μ m に相当するギャップ可変範囲は 3.4 μ m \sim 2.3 μ m となる。フィルタ透過特性の設計は、Fig. 5 に示すように静電駆動によって固定鏡側に引き寄せられた可動鏡の撓みを考慮した透過特性シミュレーションが必要となり、以下の手法を用いた。

- ・可動鏡を同心円状の領域に分割
- ・おのおの領域を平行平板とみなし、薄膜計算プログラムで平行平板シミュレーションを実施
- ・シミュレーション結果の重ねあわせ

可動鏡を 10 分割して透過特性をシミュレーションした結果を Fig. 6 に示す。可動鏡が変形すると、半値全幅の広がりや透過率の低下が生じるが、光束を制限するアパーチャにより可動鏡の平行平板に近い中心部分のみを選択することで CO₂ / H₂O センサに必要な透過特性が得られる。

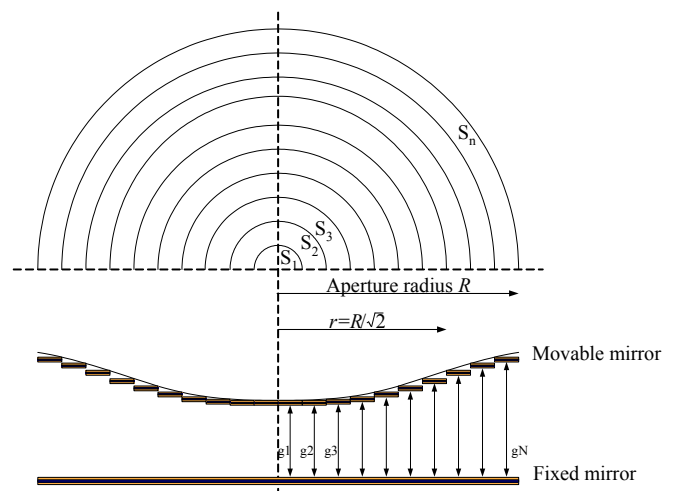


Fig.5. Division of movable mirror into small areas

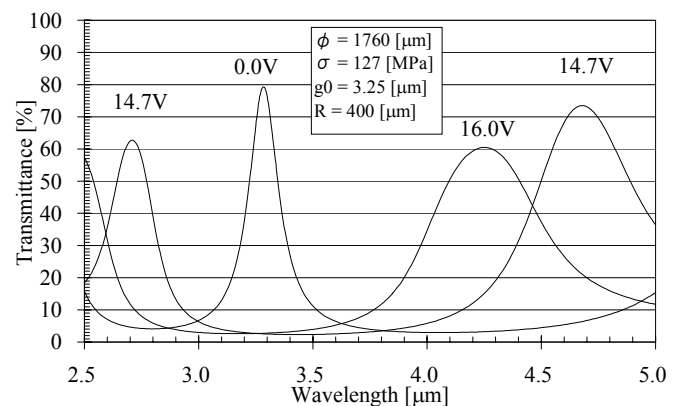


Fig.6. Simulation results of spectrum transmittance considering the deflection of the movable mirror from the ideal parallel plate

一般的に平行平板—静電駆動型アクチュエータでは可動電極は初期ギャップの 1/3 だけ変位させることができる。初期ギャップの 1/3 以上可動電極を変位させると、可動電極が固定電極に引き込まれる Pull-in が発生する。CO₂測定波長のギャップは 2.3μm であることから初期ギャップの上限は 3.4μm、参照波長が H₂O 吸収に重ならないために初期ギャップの下限は 3.1μm となる。この条件を満たし、プロセスマージンを考慮して初期ギャップを 3.25μm に設定した。

エアギャップを形成するためにウェットで犠牲層エッチングを行うが、洗浄、乾燥工程後の可動鏡の付着を防ぐために、可動鏡はある値以上の引張応力を持たなければならない¹¹⁾。このため、可動鏡は LPCVD で成膜される Poly-Si の圧縮応力と SiN の引張応力の膜厚比率で膜応力が制御できる Poly-Si, SiN, Poly-Si の 3 層構造としている。また、3 層膜にアニールを施すと、SiN の引っ張り応力はほとんど変化しないが、Poly-Si の圧縮応力は大きく緩和されるため膜応力が制御できる。また、静電駆動電圧はビル空調システムのセンサ供給電圧 24V を想定して 20V 以下が必要で、この条件を満たすように FEM 解析から 3 層膜の引張応力を 127MPa、可動鏡ダイアフラム直径を 1760μm に設計した。

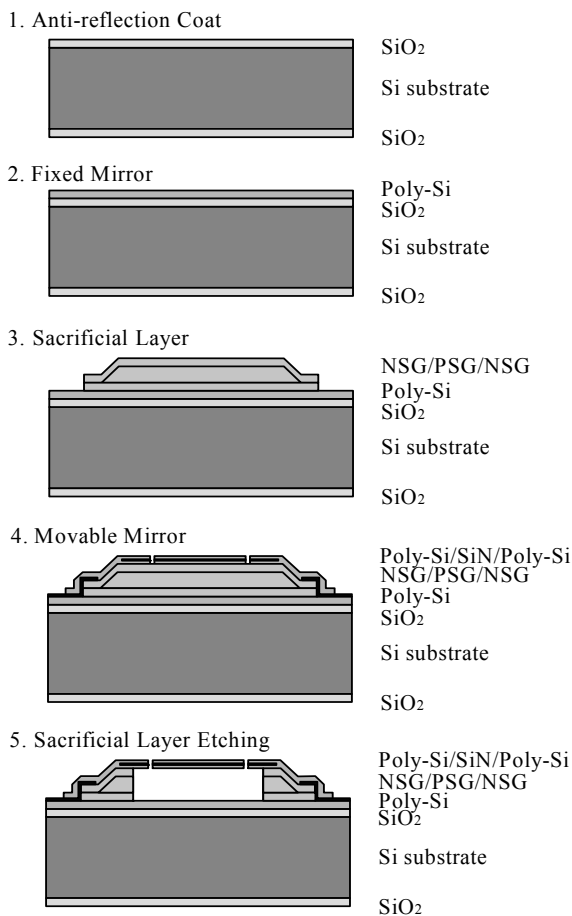


Fig.7. Schematic diagram of process flow

作製プロセスを Fig. 7 に示す。両面ミラー n 型<100>の Si ウエハに、反射防止膜、整合層としての SiO₂を熱酸化で成膜する。次に固定鏡の Poly-Si を LPCVD で成膜し、固定電極形状にリンを拡散して活性化アニールする。犠牲層となる NSG, PSG, NSG は APCVD で成膜し、犠牲層を形成する。可動電極（可動鏡）と固定電極（固定鏡）の層間絶縁層となる SiN を LPCVD で形成する。この上に、可動鏡となる Poly-Si, SiN, Poly-Si を LPCVD で成膜し、可動電極形状にリンを拡散し、活性化アニールと膜応力制御を兼ねるアニールを行う。可動鏡の 3 層膜を貫通するようにエッチングホールを形成し、10 : 1 HF で犠牲層の NSG, PSG, NSG をエッチングする。可動鏡の直径は、エッチング時間で制御する。

4. ファブリ・ペローフィルタの評価結果

作製した FPF の可動鏡の直径、膜応力、初期ギャップに関してシミュレーションと実験結果の比較を表 1 にまとめる。10 : 1 HF で 250 分の犠牲層エッチングを行ったところ、可動鏡の直径は 1734μm であり、設計値 1760μm とほぼ一致した。このときの可動鏡の引張応力は 123MPa で、設計値 127MPa とほぼ一致した。

静電駆動の印加電圧を変化させたときの分光透過特性のシミュレーションと実験結果の比較を Fig. 8 に示す。実験結果はシミュレーション結果と良く一致し、CO₂と H₂O ガスの特性吸収帯に FPF の透過ピークを可変できることを確認した。

Table.1. Dimensions of the fabricated Fabry-Perot filter

	Simulation	Experimental
Diameter of movable mirror (μm)	1760	1734
Membrane stress (MPa)	127	123
Initial air gap length (μm)	3.250	3.254
Diameter of aperture (μm)	800	800

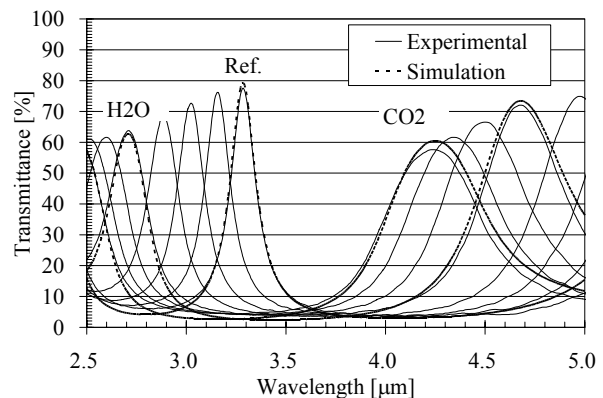


Fig.8. Simulation and experimental results of spectrum transmittance

印加電圧を 0.1V 刻みで変化させたときの, Pull-in ギャップ (可動鏡が Pull-in する直前の, 実現可能な最小ギャップ) は初期ギャップの 65% となった. なお, 本提案のガスセンサにおける FPF の最大ギャップ変位は CO₂ 濃度を測定する場合の 2.3 μ m は初期ギャップの 70% であることから, Pull-in ギャップに対して十分なマージンを有する.

信頼性の評価として, 静電耐量試験, FPF の最大変位における繰り返し電圧印加試験および連続電圧印加試験を実施した. 各試験のサンプル数は 3 個とする.

静電耐量試験 (マシンモデル) は, 200V, 200pF を 1 秒間隔で 5 回, FPF の電極間に印加して, 試験前後の分光透過特性を比較した. 試験前後で特性変化はなく, 良好な結果が得られた.

繰り返し電圧印加試験は, 80 $^{\circ}$ C 恒温槽内で FPF 駆動の最大電圧 (CO₂ 測定波長) を 5Hz 矩形波で印加し, 分光透過特性の経時変化をみる. 3 波長のピーク波長と繰り返し回数の関係を Fig. 9 に示す. 繰り返し回数が 200,000,000 回経過後の各ピーク波長は, グラフの破線で示すガスセンサの分解能仕様を満たす範囲にあり, 変動幅は初期ピーク波長の $\pm 0.9\%$ である.

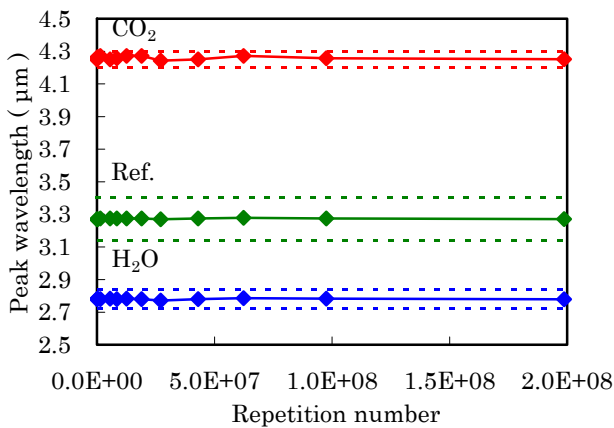


Fig.9. Test results of repetition stability

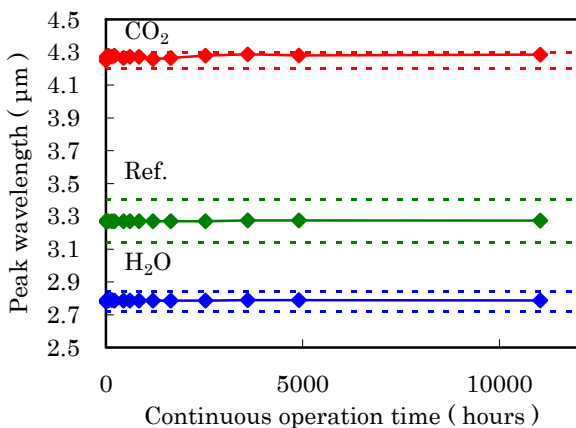


Fig.10. Test results of continuous operation

連続電圧印加試験は, 80 $^{\circ}$ C 恒温槽内で FPF 駆動の最大電圧 (CO₂ 測定波長) を連続して印加し, 分光透過特性の経時変化をみる. 結果を Fig. 10 に示すが, 1 万時間経過後の各ピーク波長は, グラフの破線で示すガスセンサの分解能仕様を満たす範囲にあり, 変動幅は初期ピーク波長の $\pm 0.9\%$ である.

以上の結果より, FPF の信頼性が実証された.

5. CO₂/H₂O センサの構成

ガスセンサの概略は Fig. 1 に示した構成の各要素と組み立てについて記述する.

赤外光源には, 直径 3 mm の汎用小型電球を用いた. これは, 赤外検出器に焦電素子を採用したため, 光のチョッピングが必要となるが, チョッパーなどの機構部品は小型化と低コスト化に整合しないことを考慮して, 自己明滅が可能な小型電球を選択した. 赤外検出器に焦点を結ぶ反射鏡に小型電球を接着し, 0mA-115mA, duty50%, 2.5 Hz で直接変調駆動する.

分光モジュールの写真を Fig. 11 に示す. FPF は中心部に貫通穴が設けられたプリント基板 (PCB) に接着し, ワイヤーボンドする. さらに, WBPf 付きキャップと赤外検出器の焦電素子を PCB に接着して, 分光モジュールを作製する.

赤外光源と分光モジュールは, $\phi 12$ mm のアルミニウムパイプに距離 60 mm で固定する. ガス導入穴から濃度調整したサンプルガスを導入して, 焦電素子の出力を外部アンプで増幅し, コンピュータで平均化処理してセンサ出力の演算を行う (Fig. 12) .

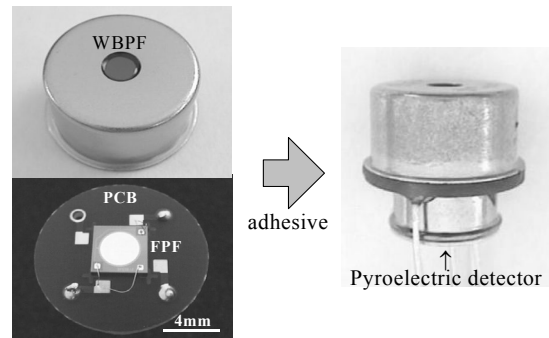


Fig.11. Photograph of the spectral module

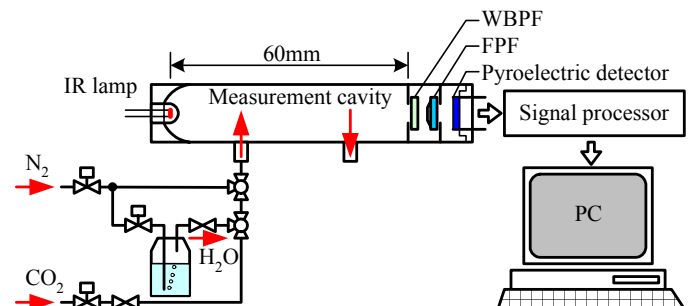


Fig.12. Schematic of the gas concentration measurement system

6. CO₂/H₂O ガス計測

Fig.12 のように, CO₂ 標準ガス (2000ppm), N₂ 標準ガス, H₂O バブリング N₂ ガスをエステック社製分割器 SGD-XC 0.5L で混合したガスをセンサの試料室に導入する. 居住空間における使用を想定し, 評価するガス濃度範囲は, CO₂ 濃度 0~2000ppm, H₂O 濃度 0~22.5 g/m³ (室温 25°Cにおいて 95%RH 相当) とする. センサに導入されたガス中の CO₂ 濃度と H₂O 濃度は LI-COR 社製アナライザ LI-6262 で測定する. CO₂ 測定波長の電圧, H₂O 測定波長の電圧, 参照光測定電圧の 3 条件を FPF に交互に印加し, ガス測定波長時と参照波長時の赤外検出器出力の比をセンサ出力とした. 赤外検出器出力の指数化平均して, 各波長の信号を求めている.

CO₂, H₂O ガスに対するセンサ応答を, Fig. 13 と Fig. 14 に示す. 本センサは, H₂O ガスに対しては絶対湿度センサとして動作するが, 参考のため, Fig.14 にはガス温度 25°Cで相対湿度に換算した値を併記する. センサのガス濃度分解能 (標準偏差相当) は, Fig. 15 に示す CO₂ 濃度 2000 ppm に対して約 13 ppm, Fig. 16 に示す H₂O 濃度 22.5 g/m³ に対して約 0.35 g/m³ であった.

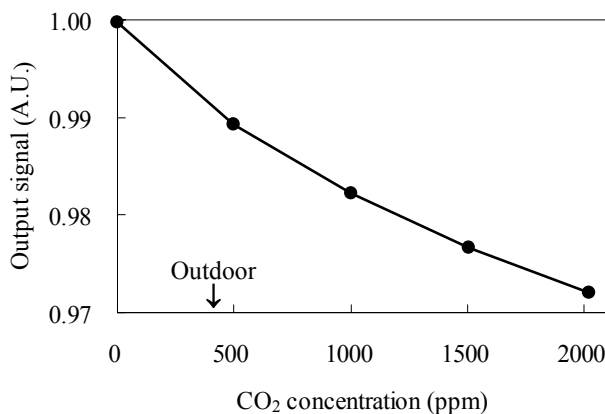


Fig.13. Sensor response for CO₂ gas

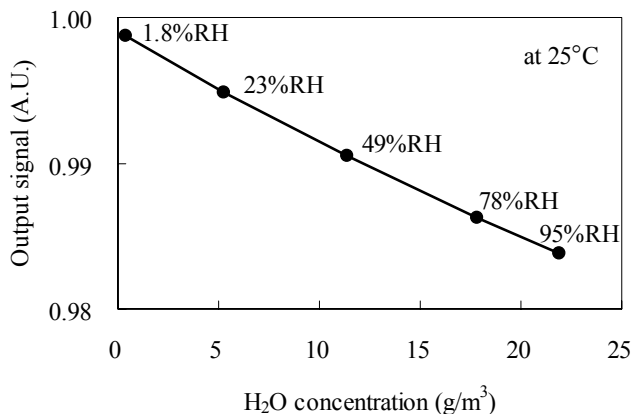


Fig.14. Sensor response for H₂O gas

CO₂ ガスと H₂O ガスは, 互いの特性吸収波長ベースラインに干渉を及ぼす. フルスケールにおける最大干渉は, CO₂ 濃度 2000ppm は H₂O 濃度 7 g/m³ (25°Cで 30%RH 相当), H₂O 濃度 22.5g/m³ (25°Cで 95%RH 相当) は CO₂ 濃度 115ppm 相当の誤差要因となったが, 多変量解析によって干渉誤差を取り除くことができる.

7. おわりに

本論文では, CO₂ と H₂O 濃度測定にMEMS型フリップ・ペローフィルタを波長選択素子に用いた 1 光路 3 波長 NDIR ガスセンサを提案した. FPF は構造設計と光学設計の手法を確立し, 3 層構造とアニールによる可動鏡膜応力が制御できること, 可動鏡と固定鏡の間に電圧を印加した静電駆動で分光透過特性が可変できること, 最大変位となる CO₂ 測定時ギャップが Pull-in ギャップマージンを有することを実証した. この FPF を組み込んだ CO₂ / H₂O ガスセンサの基本動作を確認した. ガス濃度分解能 (標準偏差相当) は, 2000 ppm の CO₂ ガスに対して約 13 ppm, 22.5 g/m³ の H₂O ガスに対して約 0.35 g/m³ であり, 提案した 1 光路 3 波長 NDIR ガスセンサの動作が実証できた. これにより, 居住空間の測定対象である二酸化炭素濃度が数 10ppm, 相対湿度が数%RH で検出できる NDIR 方式の低価格センサの実現に向けた指針が得られた.

今後は, 光学系と周辺回路の最適化と小型化, 2 つの成分間に生じる干渉を補償するために必要な多変量解析アルゴリズムの開発を行う.

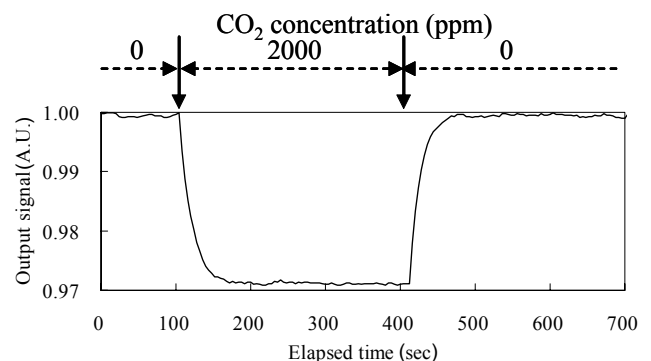


Fig.15. Step response of the sensor for CO₂ gas

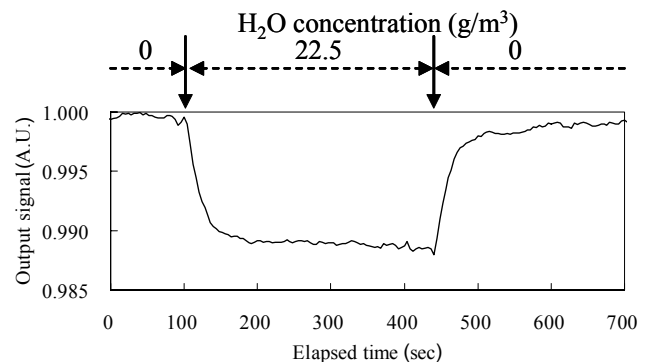


Fig.16. Step response of the sensor for H₂O gas

参 考 文 献

- 1) (財)省エネルギーセンターホームページ:「ビルの省エネガイドブック 2002」(2002)
- 2) 省エネルギー技術動向調査委員会/(財)省エネルギーセンター:「省エネルギー技術動向調査報告書 平成 12 年 3 月」(2000)
- 3) H. Hara, et. Al.: Silicon Bolometer and Micro Variable Infrared Filter for CO₂ Measurement, Proc of Optical MEMS 2000, 139/140 (2000)
- 4) H. Kopola, et. al.: System Integration and Customized Packaging of MOEMS, Proc. of MOEMS '99, 194/204 (1999)
- 5) S. R. Mallinson: Miniature Micromachined Fabry-Perot Interferometers in Silicon, Electronics Letters, 23-20, 1041/1043 (1987)
- 6) K. Suzuki, N. Kishi, M. Noro, H. Hara, T. Watanabe and H. Iwaoka: Tunable Fabry-Perot Filter for Gas Measurement, Proc. of The 19th Sensor Symposium, 103/108 (2002)
- 7) K. Suzuki, N. Kishi, M. Noro, H. Hara, T. Watanabe and H. Iwaoka: Tunable Fabry-Perot Filter with Wide Wavelength Range, Proc. of Optical MEMS 2001, 105/106 (2001)
- 8) 鈴木 他:「ガス濃度分光分析のための広帯域可変波長ファブリ・ペローフィルター」, 電気学会論文誌 E, 123-10, 392/397 (2003)
- 9) J. D. Rancourt: Optical Thin Films Users Handbook, McGraw-Hill, Inc. (1987)
- 10) J. M. Vaughan: The Fabry-Perot Interferometer, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 89/112 (1989)
- 11) C. H. Mastrangelo, et. Al.: Mechanical Stability and Adhesion of Microstructures Under Capillary Forces-Part II: Experiments, Journal of MEMS, 2-1, 44/55 (1993)

著 者 紹 介

原 仁



(正会員) 1962年5月22日生まれ。87年信州大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年横河電機(株)入社。EL素子,抄紙用水分計,赤外線フィルタ,赤外検出素子,ファブリ・ペローフィルタ,マイクロマシンデバイスの開発に従事。工学博士。

鈴木 健太郎



1973年3月22日生まれ。97年東北大学大学院工学研究科機械電子工学専攻修士課程修了。同年横河電機(株)に入社。現在,マイクロマシンデバイスの開発に従事。電気学会優秀論文発表賞(03年)を受賞。

岸 直輝



(正会員) 1966年12月9日生まれ。92年北海道大学大学院工学研究科修士課程修了。同年横河電機(株)入社。赤外線フィルター,赤外検出素子,マイクロマシンデバイスの開発に従事。計測自動制御学会産業応用部門奨励賞(01年)を受賞。

野呂 誠



(正会員) 1965年7月26日生まれ。90年名古屋大学大学院工学研究科応用物理学専攻修士課程修了。同年横河電機(株)に入社。現在,マイクロマシンデバイスの開発に従事。

渡辺 哲也



(正会員) 1960年1月11日生まれ。82年大阪大学工学部電気工学科卒業。同年横河電機(株)入社。マイクロマシン技術を用いた圧力センサの研究開発に従事。現在,技術開発本部先端技術研究所MEMS研究室長。

岩岡 秀人



(正会員) 1946年5月29日生まれ。71年慶応義塾大学大学院工学研究科修士課程修了,同年横河電機(株)入社。核四重極共鳴温度計,核磁気共鳴イメージング,時間計測,光デバイス,光計測,マイクロ波デバイス,マイクロマシンデバイスの開発に従事。現在,技術開発本部技術連携推進センター長。計測自動制御学会より論文賞(88年),技術賞(99年)を受賞。計測自動制御学会常務理事(01年,02年)。工学博士。