

氏名(本籍)	朝日 一平 (香川県)
専攻	知能機械システム工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第105号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成27年3月24日
学位論文題目	ガス濃度計測技術の高度化に向けた機能集積型微細光学デバイスに関する研究
論文審査委員	(主査) 高尾 英邦 (副査) 石丸 伊知郎 (副査) 下川 房男 (副査) 須崎 嘉文

論文内容の要旨

従来から、様々な事業分野において、漏洩監視や大気観測を目的として、ガスモニタリングがなされてきた。近年、事故等発生時の社会的反響がより大きくなっている中で、ガス検知技術の高度化が要請されている。また、次世代エネルギーへの転換が進められている現在、水素をはじめとするこれまで比較的汎用性の低かった物質を特定して検出できる新たなセンシング技術の開発が求められている。

現在、一般に用いられているガスセンサのほとんどはいわゆる接触式ガスセンサであり、装置が小型で低コストであるが、応答が遅く物質の特定ができない等、原理的に解決が困難な課題がある。これに対し、光学式ガスセンサは、被検ガス分子と光の間に生じる相互作用に基づきガス検知を行うものであり、物質の特定が可能であることや、応答速度が速く、被検ガスのマルチ化や自己診断機能の付加が容易であることなど、極めて優れた特徴を有し、これらは将来のガスセンサに求められている多くのニーズを満たすものである。しかしながら、現在市販されている製品は大型高重量でコストも高く、したがってその用途は限定されている。変わって、MEMSに代表されるマイクロマシン技術は、機械系、電気・電子系、近年では光学系をも含む機能を微小領域に集積形成することにより、多彩な機能を有する超小型デバイスが実現できる技術として、既に多くのセンサが実用化されていると共に、更なる応用展開が期待されている。

本論文は、光計測技術とマイクロマシン技術の融合によるガスセンシング技術の高度化を目的とした、機能集積型微細光学デバイスの開発と、これを用いたガスセンサの有効性を検証するものである。

第一章では、本研究に至る背景と目的及び、課題とこれを解決するための具体的手法であるマイクロマシン技術適用の意義について述べる。

第二章では、光学的ガス濃度計測の手法として、紫外吸収分光法とレーザラマン分光法の原理と、これらの原理を適用することの主旨及び具体的な装置構成や測定事例について述べる。紫外吸収分光法は、分子の電子準位間遷移に基づく紫外光の吸収量を計測し、スペクトルのパターンと強度からガス種と分子密度の特定を行うものである。光吸収量の大きい本手法によることで、ガス分子と光の相互作用長を短くすることができるため、システム的大幅な小型化が可能となる。レーザラマン分光法は、レーザ光の照射に伴いガス分子により生じる光散乱の内、分子の内部エネルギーとの相互作用により一部の光が変調されて散乱される現象に基づくもので、散乱光波長とその強度からガス種と分子密度が特定される手法である。本手法が市販のガスセンサの原理として用いられている例はないが、光学系の集積化により高い感度が得られること、光吸収法では計測が困難な水素ガスの検出が可能であることなどの優位性に注目し、ガス計測原理の一つとして適用した。

第三章では、オプティカル MEMS など、従来のマイクロマシン技術を用いた光学デバイスに関する試みと、本研究における光学デバイスの開発コンセプト及び、完成に至る設計・製作プロセスについて述べる。近年、SiOB に代表されるマイクロ光学デバイスの位置決め技術や、MEMS ミラーに代表される、駆動機構を有する光学デバイスの実現など、さまざまな試みがなされ、既に多数の実用化事例がある。ここでは、センサの感度維持の制約を受け、従来のマイクロマシニングのスケールに対し極めて大きいミリメートルオーダーの光学部品を高精度実装できる光学ベンチとして、SU8 を用いた厚膜樹脂構造による光学ベンチを考案した。また、光源や受光器の波長選択に用いる分光系について、SiOB 技術の応用による集積実装を可能とする、面内回転型アクチュエータを用いた MEMS 分光デバイスを開発した。

第四章では、開発した光学デバイスの各種機能の検証について述べる。SU8 を用いた光学ベンチでは、その形状や光学系の集積実装精度について述べる。MEMS 分光デバイスについては、面内回転型 MEMS アクチュエータの動特性と、Si マイクログレーティングの光学特性及び、これらを組み合わせた際の分光特性について述べる。

第五章では、光学デバイスをセンサシステムに組み込み、ガス濃度計測機能の実証結果と、その評価について述べる。紫外吸収分光法とレーザラマン分光法によるガスセンサシステムを、開発した光学デバイスにより構成し、ガス濃度計測機能試験及びその評価を行った。SU8 光学ベンチにより、従来の技術に対しセンシング部の大幅な小型化が実現され、また、光学系の集積化により、小型でありながら高い感度を有するセンサシステムが実現された。また、MEMS 分光デバイスの適用により従来の分光光学系を容易に集積実装することができ、小型且つマルチガス計測機能を有するセンサの実現に大きく寄与した。

第六章では、結論を述べる。

審査結果の要旨

まず背景として、従来から様々な事業分野において、漏洩監視や大気観測を目的として、

ガスモニタリングがなされている。近年、事故等発生時の社会的反響がより大きくなっていく中で、ガス検知技術の高度化が要請されている。また、次世代エネルギーへの転換が進められている現在、水素をはじめとするこれまで比較的汎用性の低かった物質を特定して検出できる新たなセンシング技術の開発が求められている。

現在、一般に用いられているガスセンサのほとんどはいわゆる接触式ガスセンサであり、装置が小型で低コストであるが、応答が遅く物質の特定ができない等、原理的に解決が困難な課題がある。これに対し、光学式ガスセンサは、被検ガス分子と光の間に生じる相互作用に基づきガス検知を行うものであり、物質の特定が可能であることや、応答速度が速く、被検ガスのマルチ化や自己診断機能の付加が容易であることなど、極めて優れた特徴を有し、これらは将来のガスセンサに求められている多くのニーズを満たすものである。しかしながら、現在市販されている製品は大型高重量でコストも高く、したがってその用途は限定されている。

本論文は、光計測技術とマイクロマシン技術の融合によるガスセンシング技術の高度化を目的とした、機能集積型微細光学デバイスの開発と、これを用いたガスセンサの有効性を検証した知見を述べたものである。

第一章では、本研究に至る背景と目的及び、課題とこれを解決するための具体的手法であるマイクロマシン技術適用の意義について述べている。

第二章では、光学的ガス濃度計測の手法として、紫外吸収分光法とレーザラマン分光法の原理と、これらの原理を適用することの主旨及び具体的な装置構成や測定事例について述べている。紫外吸収分光法は、分子の電子準位間遷移に基づく紫外光の吸収量を計測し、スペクトルのパターンと強度からガス種と分子密度の特定を行うものである。光吸収量の大きい本手法によることで、ガス分子と光の相互作用長を短くすることができるため、システムの大幅な小型化が可能となる。レーザラマン分光法は、レーザ光の照射に伴いガス分子により生じる光散乱の内、分子の内部エネルギーとの相互作用により一部の光が変調されて散乱される現象に基づくもので、散乱光波長とその強度からガス種と分子密度が特定される手法である。本手法が市販のガスセンサの原理として用いられている例はないが、光学系の集積化により高い感度が得られること、光吸収法では計測が困難な水素ガスの検出が可能であることなどの優位性に注目し、ガス計測原理の一つとして適用が試みられている。

第三章では、オプティカルMEMSなど、従来のマイクロマシン技術を用いた光学デバイスに関する試みと、本研究における光学デバイスの開発コンセプト及び、完成に至る設計・製作プロセスについて述べられている。ここでは、センサの感度維持の制約を受け、従来のマイクロマシンニングのスケールに対し極めて大きいミリメートルオーダーの光学部品を高精度実装できる光学ベンチとして、SU8を用いた厚膜樹脂構造による光学ベンチが考案された。また、光源や受光器の波長選択に用いる分光系の形成に向けて、SiOB（シリコン光学ベンチ）技術の応用による集積実装を可能とする面内回転型アクチュエータを用いたMEMS

分光デバイスが開発された結果が述べられた。

第四章では、開発された光学デバイスの各種機能の検証について述べている。SU8を用いた光学ベンチでは、その形状や光学系の集積実装精度の検証が行われている。MEMS分光デバイスについては、面内回転型MEMSアクチュエータの動特性と、Siマイクログレーティングの光学特性、及び、それを組み合わせた際の分光特性が述べられている。

第五章では、光学デバイスをセンサシステムに組み込み、ガス濃度計測機能の実証結果と、その評価について述べられている。紫外吸収分光法とレーザラマン分光法によるガスセンサシステムを、開発した光学デバイスにより構成し、ガス濃度計測機能試験及びその評価が行われている。SU8光学ベンチにより、従来の技術に対しセンシング部の大幅な小型化が実現され、また、光学系の集積化により、小型でありながら高い感度を有するセンサシステムが実現された。最終的に、MEMS分光デバイスの適用により従来の分光光学系を容易かつ小型の集積実装技術と、それを応用した小型マルチガス計測機能を有するセンサの実現に寄与する新たな知見が得られている。

第六章では、上記の成果を総括し、光計測技術とマイクロマシン技術の融合によるガスセンシング技術の高度化を目的としたデバイス技術の開発と、その有効性に関する評価結果をもとに結論が導かれている。

以上より、本論文はその新規性、発展性ともに高く評価されるものであり、本審査委員会は、申請者が香川大学大学院の博士（工学）の学位授与に値するものであると判定した。本学位論文に関しては、学会論文誌への掲載論文1編と国際会議Proceedingsへの掲載論文1編を含む複数の学術論文を発表している。研究成果はいずれも独自に完成したものである。

最終試験結果の要旨

平成27年2月16日に公聴会ならびに最終試験を実施した。公聴会では、学位申請者が学位論文の内容に関する発表を60分間実施した。引き続き、審査委員ならびに公聴会参加者からの質疑に対して的確に答えることを求め、学位論文に関する内容の確認を40分間行った。また、公聴会終了後、審査委員のみによる20分間の理解度確認を口述で実施し、微細構造デバイス技術を含む専門知識を確認して最終試験とした。全ての質疑に対して申請者は的確に回答した。以下はその一部を要約したものである。

1) ガスの計測は混合ガスを用いて計測したのか、それとも単一ガスをそれぞれ用いて計測したのか。単一ガスを用いたのであれば、混合したガスを計測する際に必要とされる分解能はどの程度か。

【回答】それぞれ単一のガスを用いて計測した。波長分解能は予測している。メタンと水素のガスについては分解できる程度の精度は実現できる。

2) 必要とされる波長分解能を実現するためにはかなりの加工精度が分光器に必要であると考えられるが、実際の加工精度はどの程度必要か。

【回答】現在開発されているラマン散乱の計測では5 nm 程度の波長分解能が必要である。それを実現するにはグレーティング部に 1200 本/mm 程度の加工が必要であり、現在達成されている。

3) 分光する際の分解能について、グレーティング面の角度精度 0.01° はグレーティング面の回転角度 $\pm 3.5^\circ$ に比較して厳しめだが、そのあたりの精度は十分であるのか。

【回答】改善したいところではあるが、現在実現しているデバイス構造でも十分実現されている。必要に応じて、より分解能の高いデバイスを製作することもできる。

4) 2種類の原理のガスセンサを製作して実現されているが、デバイスだけでなくシステム化の観点で見たときのオリジナリティーはどのあたりにあるか。

【回答】MEMS を用いた光学式ガスセンサは一部前例があるが、実用できるだけの感度は未だ実現されていない。本研究では必要なデバイスのサイズから検討を行い、小型かつ十分な検出性能の光学式センサを初めて実現した。

5) 社会人の博士課程学生として、実用化を目指した内容であることが伺えるが、特許性を含めてどのあたりが特徴になり得るか。

【回答】デバイスの構造を含めて特許性の高い部分は多くある。それらについてはすでに特許化に向けて申請済みであり、今後の実用化に向けてつなげるものとした。

上記の公聴会発表、質疑応答と最終試験を経て、本審査委員会は、提出された博士学位請求論文が博士（工学）の学位に値するものであり、かつ審査申請者が専門領域に関する十分な学識と研究能力を有するものと判断した。以上より、本最終試験の評価を合格とする。