

京都大学	博士（工学）	氏名	栗 根 悠 介
論文題目	量子井戸とフォトニック結晶を用いた中赤外電気変調型光学フィルターの開発 および非分散型赤外センシングへの応用		
(論文内容の要旨)			
本論文は、半導体量子井戸による中赤外光の吸収制御とフォトニック結晶スラブによる透過率制御を行うことにより、印加電圧による高速変調を可能にした次世代型中赤外光フィルターを開発し、そのフィルターを用いたガス分析の実証結果をまとめたものであって、7章から構成される。 非分散型赤外センサーは、中赤外領域におけるガス分子の光吸収特性を利用して、その吸収量からガス濃度の測定を行う、産業上重要な技術である。従来の非分散型赤外センサーでは、信号対雑音比向上のための同期検波用に機械式チョッパーが用いられるが、システムの小型化を妨げるだけでなく、低速動作や不安定動作を引き起こす。本研究ではこれらの課題を解決するために、半導体量子井戸のサブバンド間吸収とフォトニック結晶を組み合わせ、中赤外電気変調型光学フィルターを実現し、さらに開発したフィルターを利用した非機械式な非分散型赤外センサーの実証を行っている。具体的には、サブバンド間吸収を示す量子井戸構造に対しフォトニック結晶の共振モードを組み合わせ、井戸内の電子密度を電圧により制御することで、透過率の高速制御（100 kHz 以上）を可能にしたフィルターを実現している。さらに、開発したフィルターを用いて非機械式の非分散赤外センサーを構築し、ガスの高速定量測定（～100ms）の実証を行うとともに、フィルターの重畳動作による複数波長の同時信号検出を実証することにも成功している。最後に、開発した非分散型赤外センサーの雑音解析を行うことで、信号対雑音比の改善にはフィルターの変調透過率向上が重要であることを見出し、透過率変調量改良設計を通して非機械式非分散型赤外センサーの検出性能向上の可能性を示している。以上の結果は、従来の非分散型赤外センサーの課題を克服し、非分散型赤外センサーの応用領域を広げるものである。 第1章は序論である。まず研究背景として、非分散型赤外センサーに適用可能なデバイスの先行研究とその課題が概観されている。その後、高速制御可能な中赤外透過率変調フィルターデバイスにより、従来の非分散型赤外センサーの課題を克服する非機械式で高速な非分散型赤外センサーの実現が提案されている。 第2章では、印加電圧により透過率を高速に変調可能な中赤外電気変調型光学フィルターが提案されている。具体的には、電子密度の変化により吸収率を変調できる量子井戸と、フォトニック結晶スラブの共振モードを組み合わせ、狭帯域な透過率変調を実現可能であることが、厳密結合波解析により示されている。その際、フォトニック結晶スラブの厚さを調整し、垂直偏光（TM）モードと水平偏光（TE）モードのΓ点共振周波数を近接させ、両モードの放射光の干渉を生じさせることで、面垂直方向からの入射光に対して狭帯域バンドパス透過領域を有するフィルターが設計されている。また、設計したフォトニック結晶スラブに対して、バンドパス領域に吸収を持つGaAs/AlGaAs量子井戸を組み合わせ、さらにpn接合により量子井戸内の電子密度を変化させることで、バンドパス領域の透過率が電氣的に変調可能であることが明らかにされている。さらに、フォトニック結晶構造の調整を行うことで、放射係数と量子井戸吸収係数の整合条件が達成され、透過率変調量が増大可能であることが示されている。 第3章では第2章で得られた設計構造に基づき、様々なガスの吸収が存在する1000cm⁻¹付近に、半値幅11cm⁻¹程度の変調ピークを持つ構造を目標として、中赤外電			

京都大学	博士（工学）	氏名	栗 根 悠 介
気変調型フィルターの作製と性能評価が行われている。作製したフィルターに逆バイアスを印加することにより得られる透過率変調スペクトルは、Q 値 74 程度、目標波数付近にピークを持ち、その透過率変調量は 20 %程度であり、またその変調速度は 180 kHz 程度まで高速に変調可能であることが実証されている。 第 4 章では、第 3 章で実証した電気変調型中赤外フィルターを用いた新たな非分散型赤外システムを構築し、ガス定量と高速検出の実証が行われている。本システムでは、熱輻射光源・ガスセル・赤外検出器を用い、機械式チョッパーとバンドパスフィルターを使用せず、本フィルターが採用されている。変調ピーク波長に吸収を持つ C_3F_8 を測定対象ガスとし、1 kHz の変調信号を入力した状態で検出器信号に対してロックイン検波を行うことにより、信号量とガス分圧との相関関係を取得し、さらに、高速開閉制御が可能なバルブを用いた構成で、100ms の高速パルスガス検出が実証されている。 第 5 章では、第 2 章で示された設計構造をもとに、2 波長を同時に測定可能な非分散型赤外システムが実証されている。具体的には、変調帯域と高透過率帯域が一致した 2 つのフィルターを重畳して使用し、独立して変調させることで単一検出器のみで 2 波長を同時に検出できる構成が提案されている。この構成に基づき、2 つのフィルターを設計・作製し、透過率を独立して変調を行う重畳動作が実証されている。さらに、上記の重畳型変調フィルターと単一検出器による非分散型赤外システムを構築し、C_3F_8 ガスの検出実験が行われている。その結果、ガス吸収波長に対応するフィルター信号からは C_3F_8 ガスの濃度に応じた信号減少が見られる一方、参照用波長に対応する変調フィルター信号からは減少が見られず、2 波長を用いたガス検出が実証されている。さらに、参照用波長の信号を用いてガス吸収波長との信号の比を取ることで、検出器に入射する光量に依存せず、正確にガスの濃度を定量できることが実証されている。 第 6 章では、第 3 章・第 5 章で構築した非分散型赤外システムの性能と従来システムの性能を比較し、本研究で提案した非分散型赤外センサーの雑音特性を調査している。本研究で構築した非分散型赤外システムにおいて、測定される雑音を最小検出吸光度に換算すると、従来の小型非分散型赤外システムと比較して 2 桁短い 0.01 秒の積算時間では、3.8×10^{-3} 吸光度を確認し、また 3 秒の積算時間では 2.7×10^{-4} 吸光度となり、非機械式・小型な構成でありながら従来システムと同等の性能であることが示されている。本章の後半では、雑音解析結果をふまえ、最小検出吸光度の改善を目指し、より大きな変調光量が得られるシステム全体の改良設計が行われている。具体的には、量子井戸のサブバンド間遷移波長とフォトニック結晶の変調周波数を完全に一致させつつ、量子井戸中のドーピング量を増加させることにより、フォトニック結晶の放射係数と量子井戸吸収係数の整合条件に近づき、電圧印加前後の透過率変調量を 2.1 倍まで増大できることが示されている。さらに、光量増大と小さな透過帯域幅を両立するため、フォトニック結晶の分散関係を考慮した集光角の最適化を行っている。以上のフィルター構造の改善と集光角の最適化を適用することにより、改善前のシステムと比較して、最低検出吸光度をさらに 1 / 8 まで低減できる可能性が示されている。 第 7 章では、本論文において得られた成果が要約されるとともに、今後の展望について述べられている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、狭帯域バンドパス透過スペクトルを有するフォトニック結晶スラブと、半導体量子井戸における中赤外領域サブバンド間吸収を組み合わせ、電圧印加により高速変調を可能にした電気変調型光学フィルターを開発し、非機械式の非分散型赤外センサーとしてガス分析に応用したものである。本研究では、フォトニック結晶スラブにおいて中赤外域でバンドパス透過特性を実現する手法と、印加電圧により大きな透過率変調を得るための制御手法が、理論的及び実験的に示されている。また、開発したフィルターを非分散型赤外センサーに適用することで、従来の機械式チョッパを排除することによるシステムの小型化と高速応答を実現し、さらには、複数の波長信号を単一の検出器で同時に扱う重畳動作にも成功しており、非機械式非分散型赤外センサーの応用領域を大きく広げている。主な成果としては以下の3点が挙げられる。

1. フォトニック結晶スラブが有する2つの共振モードを近接させ、両モード間の干渉効果を利用することで、狭帯域バンドパス透過特性が実現可能であることを明らかにした。また、フォトニック結晶の放射Q値と量子井戸のサブバンド間遷移の吸収Q値を整合させた状態で、電圧印加により量子井戸中の電子密度を変調することで、100 kHz以上の周波数で透過率の高速変調が可能になることを実証した。

2. 本フィルターを用いた非機械式の非分散型赤外システムを構築し、機械式チョッパを排除した構成でガス濃度の定量測定を実証した。さらに、100ms程度の短いガス流量の変化に対しても、信号が応答することを確認し、本フィルターの高速ガス検出に対する有用性を示した。

3. 複数の電気変調型フィルターを重畳し、それぞれの変調波長と高透過率帯域を一致させることで、単一検出器による2波長同時検出を実現した。また、ガス吸収波長と参照波長を分離して変調することで、入射光量の変動を補正しつつ高精度なガス濃度測定が可能であることを明らかにした。

これらの取り組みにより、機械的制御を要しない小型・高速・多波長対応の非分散型赤外センサーの有用性が示され、また、雑音解析の観点からも積算時間を短縮しつつ高感度を維持できる可能性が報告されている。さらに、吸収と放射のQ値整合による透過率変調量の増大と、フォトニック結晶の分散の影響を考慮した集光角最適化を組み合わせることで、従来システムに比べ最大で1/8の検出下限を達成できる展望が示されている。以上より、本論文は、中赤外光の新たな制御手法を開拓した点、および、非分散型赤外センサー技術の発展に将来大きく貢献可能である点で、学術・応用上の寄与は少なくないため、博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和7年1月31日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日：2025年 6 月 1 日以降 →授与日より3ヶ月以内の日付