

遠隔ガスセンシング技術の現場適用を可能にする面受光型量子カスケードディテクター

Photonic Crystal Quantum Cascade Detector Facilitating Wider Deployment of Remote Gas Sensing Technologies

中赤外光の分光分析によるガス検出を室温において外付け光学フィルターなしで実現

中赤外光の分光分析によるガスセンシング技術は、高感度検知や遠隔検知が可能なことから、ガス漏えい検知をはじめとする安全確保や、環境保全、医療分野などでの応用が期待されています。しかし、従来の中赤外検出器は、外付け光学フィルターや光学系全体の液体窒素冷却を必要とするため、屋外や工場・プラントなどの現場での適用が進んでいませんでした。東芝は、フォトリソニック結晶を備えた面受光型量子カスケードディテクター（以下、PC-QCD⁽¹⁾と略記）を開発し、室温動作に加え、光学フィルターなしでの波長及び入射角に対する高い選択性を実現しました。これは、中赤外ガスセンシングを高度化するための基盤技術となります。

背景及び技術課題

ガスセンシング技術は、安全性向上や、環境保全、医療への貢献といった観点から、幅広い分野で活用されています。中でも、中赤外波長域のレーザーを用いたガスセンシングは、遠隔検知を可能にすることから、近年注目を集めています。例えば、この技術により、工場やプラント設備内、屋外環境で作業員の接近が難しい場所のガス漏れ検査を効率的に行えます。図1に、遠隔ガスセンシングの原理を示します。空間に照射された特定波長の光は、その波長の光を吸収するガス成分が存在すると、減衰します。減衰による光量変化を検出することで、ガスの有無や濃度を評価できます。

一方、実環境下での中赤外光検出では、周囲の室温物質や光学部材からの黒体輻射（ふくしゃ）が背景ノイズとなり、ガス吸収に起因する微弱なシグナル光の検出を妨げるという問題があります。従来の中赤外ガスセンシングでは、中赤外波長域の受光器としてHgCdTe（テルル化カドミウム水銀）検出器（以下、MCTと略記）が広く用いられてきました。MCTは、高感度な検出が可能である一方、水銀を含有し、液体窒素冷却を要する点が問題となります。更に、背景ノイズを低減させるための外付け光学フィルターを併用した場合、フィルターや周辺光学部材からの熱輻射が新たな背景ノイズとならないようにするために、検出器だけではなく、光学系全体の冷却が必要となります。その結果、装置構成や光学系が

複雑化し、遠隔ガスセンシングシステムの小型化が難しいという問題があります。

こうした中赤外ガスセンシングでの問題を解決する方法として、室温動作が可能で、水銀を含まない中赤外半導体受光素子である、量子カスケードディテクター（以下、QCDと略記）が注目されています。QCDは、量子カスケード構造に基づく中赤外受光素子であり、材料組成や層構造の設計によって特定波長に選択的な検出が可能です。従来のQCDは、主に端面受光型構造でしたが、光を素子端面に導入するための精密な光学調整を要し、光軸合わせや実装自由度の面で制約が大きく、実用的な光学系への適用や、遠隔ガスセンシング用途への展開が課題となっていました。

これらの課題の解決に向けて、東芝は、フォトリソニック結晶（以下、PCと略記）を備えたPC-QCDを開発しました。PCとは、周期的な微細構造によって光の伝搬方向や結合状態を制御できる光学構造であり、QCDでは、PCが入射光を活性層へ選択的に結合させます。ここでは、開発したPC-QCDと従来のMCTとの光学特性を比較し、PC-QCDが中赤外ガスセンシングへの適用に有効なことを示します。

PC-QCDの素子構成

図2に、開発したPC-QCDの素子構成を示します。活性層は、InGaAs（インジウムガリウムヒ素）/InAlAs（インジウムアルミニウムヒ素）から成る量子カスケード構造で構成されてお

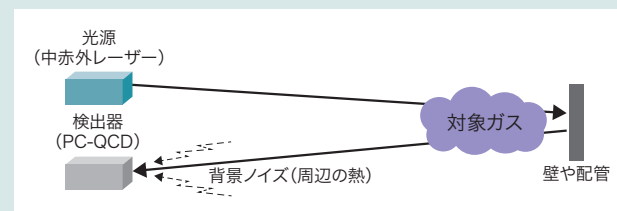


図1. 吸光による遠隔ガスセンシングの原理

空間中のガスによる光吸収に伴い検出光量が変化し、その変化からガスの有無や濃度を評価します。

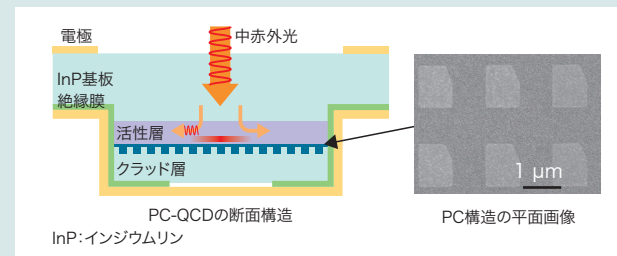


図2. PC-QCDの素子構成

PC構造は、基板側から垂直に入射した光を回折させて活性層面内方向へ効率的に導く役割を果たします。

り、サブバンド間遷移による光吸収を原理としています。活性層に隣接してPCを形成することで、素子表面に垂直に入射した光を活性層面内方向へ結合させ、QCDにおいて面受光型の検出を可能にしました。更に、PCの周期及び形状に起因する光の結合特性により、素子には波長選択性及び入射角に対する選択性が付与されます。これらの光学特性は、PCの幾何学的設計によって制御できます。電極は、受光側を開口電極とし、その反対側に全面電極を配置する構成としました。

PC-QCDの光学特性評価とガスセンシングの実証

MCT及びPC-QCDを回転ステージに設置し、レーザー光の入射角を変化させながら光電流を測定しました。MCTは液体窒素冷却下で、PC-QCDは室温で、動作させました。

まず、垂直入射条件における両者の波長選択性を評価した結果を、図3(a)に示します。MCTは3～6 μmの波長域でおおむね均一な受光強度であったのに対し、PC-QCDは半値幅12.2 nmの狭帯域な波長選択性が確認できました。このような狭帯域検出により、ガス固有の吸収波長近傍の光だけを選択的に検出できます。次に、背景ノイズ低減効果を確認するため、入射角に対する選択性を評価しました。MCTはこの測定条件で、入射角に対する依存性が小さいことが分かっています。一方、PC-QCDは、図3(b)に示すとおり、半値幅1.0°×13.8°の顕著な入射角選択性が確認できました。更

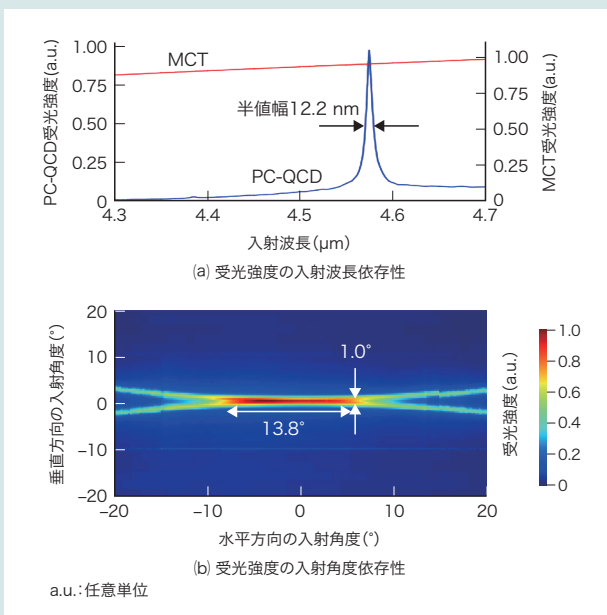


図3. PC-QCDの光学特性評価結果

鋭い半値幅を持つ波長依存性と、高い指向性を示す入射角度依存性が確認できました。

に、この入射角特性に基づき、入射角±20°までの範囲から検出器に入射する背景放射成分を積分し、背景ノイズ強度を評価しました。その結果、PC-QCDはMCTと比較して、周辺環境からの背景ノイズを約1/14に低減できたことを確認しました。

これらの結果から、PC-QCDは室温動作下でも外付け光学フィルターを用いることなく入射角を制御可能であり、背景放射などの背景ノイズを低減して、中赤外ガスセンシングに有効なことを実証しました。

まとめと今後の展望

PC-QCDは、冷却機構や外付け光学フィルターを必要としない簡素な光学系の構成で動作可能であり、波長及び入射角に対する選択性を備えたガスセンシングを実現できる点が特長です。今後は、PC-QCDのこれらの特長を生かし、特定ガスに最適化した小型・高機能な遠隔ガスセンシングシステムの実用化に向けた検討を進めていきます。

文 献

- (1) 東芝、斎藤真司、ほか、量子カスケード素子、特許第7783738号、2025-12-10。

金子 桂

総合研究所 生産技術センター 光学・検査技術研究部
日本赤外線学会会員