

## 論文の内容の要旨

論文題目 直接接合擬似位相整合  $\text{LiNbO}_3$  リッジ導波路を用いた中赤外差周波発生に関する研究

氏名 忠永 修

近年の環境や医療への関心の高まりにより、温室効果ガスなどの大気中ガス分析や医療分野では呼気中の成分分析など微量ガス濃度計測の需要が高まっている。工業プロセスや燃焼制御においても対象ガスの濃度変化を監視する必要がある。このようなガス分析装置には、物質選択性が良く、高感度にかつ瞬時に濃度計測を行う事が求められ、環境ガスの地域分布など計測を行う場合には可搬性も求められる。このような特性を満足できる高感度ガス検出手法として赤外レーザ分光法が最適であり、ガスの強い吸収が存在する中赤外域レーザ光源の需要が高まっている。特に  $3 \sim 4 \mu\text{m}$  の中赤外域では半導体レーザでは室温連続動作が困難であり、非線形光学結晶を用いた差周波発生による中赤外光源が有望だと考えられる。

中赤外域を発生する方法として二次非線形光学結晶を用いた差周波発生がある。非線形光学定数の大きさから  $\text{LiNbO}_3$ (LN)が結晶材料として用いられ、最大の非線形定数を用いる事ができる周期分極反転構造を施した擬似位相整合(Quasi-Phase-Matching, QPM)技術を用いて差周波発生が行われている。このような非線形光学結晶を用いた差周波発生では、入力光に技術の成熟した近赤外域のレーザを入力光として用いる事ができる。しかしながらこれまで用いられてきた非線形光学結晶はバルク型であったために差周波発生効率が低く入力光強度を強くする必要があったため大型なものとなっていた。実用的な小型の中赤外差周波光源を実現するためには差周波発生効率を高めるために

導波路型素子を作製することが有効であるが、これまで中赤外波長域への波長変換は報告例がなく素子の設計指針も明らかにされていなかった。そこで高効率な波長変換素子を実現するための導波路作製法の選択とその設計指針を明らかにするとともに実際に中赤外発生のための素子を作製し、その波長変換特性を明らかにする必要がある。

本研究は、以上述べた背景を考慮し、導波路作製法として直接接合法を用いた導波路型擬似位相整合素子を用いた差周波発生によりガス検知用の中赤外光源を実現することを目指して行われたものである。

以下、本論文の成果を要約する。

### (1) 中赤外用直接接合 QPM-LN リッジ導波路の素子設計及び $3\ \mu\text{m}$ 光発生

直接接合擬似位相整合リッジ導波路の作製方法を明らかにした。直接接合法とはコア層となる LN 基板とクラッド層となる  $\text{LiTaO}_3$  基板とを接着剤などを用いずに直接に接合する方法である。この直接接合法を用いた中赤外差周波発生用素子における導波路作製誤差を許容するサイズを元に設計手法を示した。さらに実際に作製したリッジ導波路により作製パラメータの最適化を行った。本論文では励起光波長を固定し通信波長帯である  $1.55\ \mu\text{m}$  帯信号光を可変することによって差周波光を可変発生する方法をとった。 $3.3\ \mu\text{m}$  発生において  $40\%/W$  という高効率波長変換を達成した。本効率は、バルク型 QPM-LN 素子より 2 桁、APE 導波路よりも 1 桁大きな効率であった。さらに本リッジ導波路を用いてメタンガスの吸収線測定を行い、吸収線が観測可能であることを確認した。これにより炭化水素系分子の吸収線が多数存在する  $3\ \mu\text{m}$  帯において直接接合リッジ導波路による差周波発生は有望な光源になりうる事を確認した。

### (2) 直接接合リッジ導波路による中赤外発生における諸特性

中赤外差周波発生における懸念問題に関して議論した。測定対象となるガスの種類・用途によって様々な中赤外波長やパワーレベルの光源が必要とされる。しかしながら発生する波長やパワーレベルによっては波長変換に用いる LN あるいは導波路形成法に起因する様々な特性の影響を受けると考えられる。従ってそれぞれ特徴的な条件下での波長変換特性を明らかにする必要がある。

LN 結晶には  $2.8\ \mu\text{m}$  帯に結晶中の O-H 基に起因する吸収が存在する。本吸収の影響を調べると共に  $2.7\ \mu\text{m}$  帯発生の波長変換特性について評価した。 $0.98\ \mu\text{m}$  の励起光を用いた  $2.7\ \mu\text{m}$  帯発生では  $87\%/W$  の高変換効率を達成した。さらに空気中の水の吸収線の観測を行った。続いて同じ  $2.8\ \mu\text{m}$  帯発生において懸念される LN 結晶中の O-H 吸収について  $0.98\ \mu\text{m}$  励起光を用いた差周波発生により調べ、長い導波路においても本作製法を取ることで O-H 吸収の影響が出ないことを確かめた。

続いて  $3\ \mu\text{m}$  帯発生素子を用いて高出力特性について評価した。導波路素子では高強度光によりフォトリフラクティブダメージによる位相整合波長のずれが発生し効率

低下を招くと言う懸念がある。高耐性 ZnO ドープ LN をコア層に用いることにより 65mW という非常に高い中赤外出力を達成した。

最後に広帯域波長変換特性について明らかにした。0.937  $\mu\text{m}$  を用いて 2.3  $\mu\text{m}$  帯発生を行い 100%/W の高い規格化変換効率達成とともに 100nm に及ぶ差周波発生帯域が導波路素子で可能であることを示した。本広帯域性を利用し CO アイソトポマー一括観測を実現した。続いて 2～3  $\mu\text{m}$  の各発生波長帯の波長変換特性を比較し、各波長帯における波長帯域幅及び規格化変換効率の値の差に関して考察した。発生波長による原理的な数値の差と各波長帯での作製誤差緩和に必要なコアサイズの違いにより変換効率に差が出ていることを明らかにした。また発生波長帯域幅は LN の材料分散の特性に加えて導波路化による構造分散の影響を反映している事を明らかにした。特に構造分散の影響は、広帯域特性の得られる 2.3  $\mu\text{m}$  帯発生で大きく、高効率発生素子では広帯域性を抑制していることを示した。

### (3) 導波路分散制御による広帯域特性への影響

2.3  $\mu\text{m}$  帯発生では広帯域波長変換が可能であるが、導波路分散によりその広帯域性が制限されていた。そこでコアサイズを変化させることにより導波路分散を制御し、広帯域性の制限の緩和を行った。まず様々なコアサイズの導波路分散特性を計算により求め、広帯域性制限が緩和するための実現性を確認し、励起光波長 0.934  $\mu\text{m}$  に固定した場合に大きなコアサイズを用いることにより変換効率を低下させること無く 1.55  $\mu\text{m}$  帯の信号光波長の広い波長域での差周波変換が可能であることを示した。つぎに計算による予測を元に実際にデバイスを作製し波長変換特性を比較した。15.2  $\mu\text{m}$  厚×21.7  $\mu\text{m}$  幅導波路において、173nm にもおよぶ 2.3  $\mu\text{m}$  帯広帯域波長変換および 56%/W の高い波長変換効率を確認した。本導波路を用いて通信波長帯信号光を波長掃引することによる CO ガスの吸収線測定を行い、44 本もの 2.3  $\mu\text{m}$  帯域の吸収線を確認した。

### (4) 中赤外モジュールおよび中赤外光源

炭化水素系ガスの検出に重要な 3  $\mu\text{m}$  帯素子に絞って中赤外光源の作製について明らかにした。まず光源化を行うにあたりその要素技術としてファイバピグテール型中赤外モジュールの作製について明らかにした。V 溝接続法を用いて、ファイバ入力光に対する外部変換効率として 9.7%/W を達成した。また V 溝接続法を用いることで温度による入力の光結合効率の変動が少なく、出力光強度が素子温度を変化させても変動が小さいことを示した。次にこの中赤外波長変換モジュールを用いて、半導体 LD を信号光及び励起光として用いた中赤外光源について明らかにした。各要素部材を偏波保存ファイバで接続し、100×100×180mm のヘッドに収容した。ファイバレーザや固体レーザ等の大出力レーザを用いることなくサブ mW 出力の得られることを示した。また外部入力端子により信号光 LD の注入電流を変調し、簡易にメタンガス吸収スペクトルが

測定できることを確認した。

以上、本研究で得られた結果は、直接接合 QPM-LN リッジ導波路が、高効率、高光耐性（高出力）、付加吸収の影響が無いという利点を持ち合わせ、ガス検知用を目的とした 2 次非線形光学効果を用いた差周波発生による 2 ~ 3  $\mu\text{m}$  帯中赤外光発生に現状では最適な素子であると結論付けられる。これらの利点により励起光源及び信号光源の出力を低減でき、小型のサブ mW 出力の光源化に成功をした。