

中赤外リモートセンシングのための

電子波長可変 Cr:ZnSe レーザー励起 6-10 μm コヒーレント光源

Electronically tuned Cr:ZnSe laser pumped
all-solid state 6-10 μm coherent light source for mid-IR remote sensing

湯本正樹, 斎藤徳人, 和田智之

Masaki Yumoto, Norihito Saito, Satoshi Wada

理化学研究所 光子制御技術開発チーム

Photonics control technology team, RIKEN

Abstract

All-solid-state, tunable mid-infrared, and high-energy pulsed 6-10 μm coherent sources have a critical role in mid-IR remote sensing. Optical parametric oscillation (OPO) pumped with a tunable laser in the wavelength region from 2 to 3 μm is a possible candidate to realize such coherent sources. Here, we show an effective method to accomplish the tuning range from 6 to 10 μm and high-energy pulse generation more than 10 mJ required for mid-IR remote sensing. We choose Cr:ZnSe, which is pumped with a pulse Tm:YAG laser, as a laser medium to obtain oscillation in the wavelength region from 2 to 3 μm . We also introduce a high-speed tuning method by use of an acousto-optic tunable filter (AOTF) into the Cr:ZnSe laser.

1. はじめに

中赤外線領域には分子の振動および回転準位に起因する吸収線（分子の指紋スペクトル）が無数に存在する。そのため、分子の指紋スペクトルに波長同調が可能な中赤外レーザーを用いた環境計測や病理診断等の先進的な応用研究が盛んに行われている。中でも、我々は、様々な大気汚染物質の吸収線へ波長同調することで、物質の検出、同定、識別が可能な中赤外リモートセンシングへ、応用できる新しい中赤外コヒーレント光源の開発を推進している。

一般に 3~10 μm の中赤外線領域に、多くの大気汚染物質の指紋スペクトルが存在する。CH₄、C₂H₆、CO、CO₂、HCl、H₂S、N₂O 等の物質については、その指紋スペクトルは 3~5 μm の中赤外線領域に存在する¹⁾。この波長域を対象とするセンシング技術には、希土類元素が添加されたレーザー媒質を用いたレーザーに、光パラメトリック発振 (Optical parametric oscillation: OPO) などの非線形周波数変換を組み合わせた光源が既に利用されている²⁾。一方、化学剤のセンシングでは、それらの指紋スペクトルが数多く存在する 5~10 μm の中赤外線領域を測定対象とする必要がある³⁾。また、複数種類の化学剤のセンシングを実現するためには、この広い中赤外線領域で高速に波長がスキャンでき、かつ高いパルスエネルギーを持つコヒーレント光源を導入する必要がある。しかしながら、5 μm を超える中赤外線領域でリモートセンシングへ応用可能な全固体コヒーレント光源は、

その光制御の困難さ故に実現していなかった。本研究では、2~3 μm の波長域で波長選択が可能な Cr:ZnSe レーザーに、光増幅技術と非線形周波数変換技術を駆使して、中赤外リモートセンシングへ実用可能な新しい光源を実現したのでその詳細を報告する。

2. 中赤外コヒーレント光源の構成

中赤外コヒーレント光源の概略図を図 1 に示す。この光源は、電子波長可変 Cr:ZnSe レーザー、Cr:ZnSe 多段増幅器、及び非線形周波数変換システムから構成される。電子波長可変 Cr:ZnSe レーザーの開発では、波長選択素子として音響光学波長可変フィルター (Acousto-optic tunable filter: AOTF) を利用した電子波長制御方式⁴⁾を採用することで、プリズムなどの光学素子の機械的動作を一切伴うことなく電氣的にレーザーの波長が変えられる。これにより 2~3 μm の波長域で高速な波長掃引が可能となる。Cr:ZnSe 多段増幅器の開発では、Cr:ZnSe 増幅器を 3 段直列に構成し、2~3 μm 帯でのパルスエネルギーを 50 mJ 以上まで増幅した。これにより世界に先駆けて 2~3 μm の波長域で高速波長掃引が可能な高エネルギー電子波長可変 Cr:ZnSe レーザーの開発に成功した。最後に、これらに光パラメトリック発振 (OPO) を利用することで、波長可変域を 6~10 μm へ拡張する。OPO の励起光として用いる Cr:ZnSe レーザーの波長を高速に掃引することで、OPO に利用する非線形光学結晶の位相整合角を固定した状態で、出力する中赤外光を 6~10 μm の波長域で高速に切り換

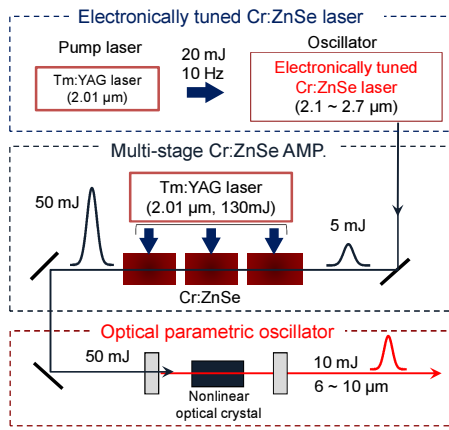


Fig1. Schematic diagram of Electronically tuned Cr:ZnSe laser pumped all-solid state 6-10 μm coherent light source.

えることが可能となる。この技術を計測に応用することで、複数の測定対象物質の濃度変化等もリアルタイムで計測することが可能となる。

3. 中赤外コヒーレント光源の基本性能

Cr:ZnSe 多段増幅器を搭載した電子波長可変 Cr:ZnSe レーザーの波長可変域と波長掃引特性を図2に示す。電子波長制御法を Cr:ZnSe レーザーの波長掃引に利用する場合、レーザーの共振器内に挿入されている AOTF に印加する高周波(Radio frequency: RF)の周波数を制御することで、出力するレーザー光の波長を変化させることができる。その RF の周波数を 36.8~43.7 MHz の間で制御することで、2.26~2.66 μm の波長可変域を実現した。2.4 μm の中心利得近傍で 52.2 mJ の最大パルスエネルギーを達成した。また 100 μm を超える波長可変領域で 50 mJ 以上のパルスエネルギーが得られており、2 μm 帯における波長可変レーザーとして世界最高クラスのパルスエネルギーを持つ光源の実現に成功している。

図3に OPO 光共振器の概略図と中赤外光(アイドラー光)の出力特性を示す。電子波長可変 Cr:ZnSe レーザーと Cr:ZnSe 多段増幅器から構成されるシステムに、OPO を利用することで、波長が 5 μm を超える領域へ波長可変域の拡張を行っ

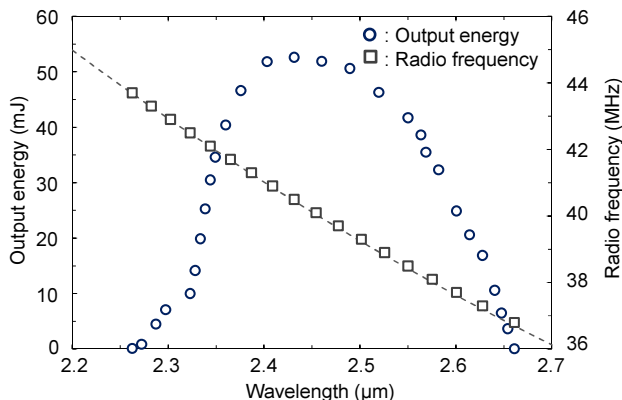


Fig. 2. Tuning range and filter tuning curve of electronically tuned Cr:ZnSe laser with multi-stage Cr:ZnSe power amplifier.

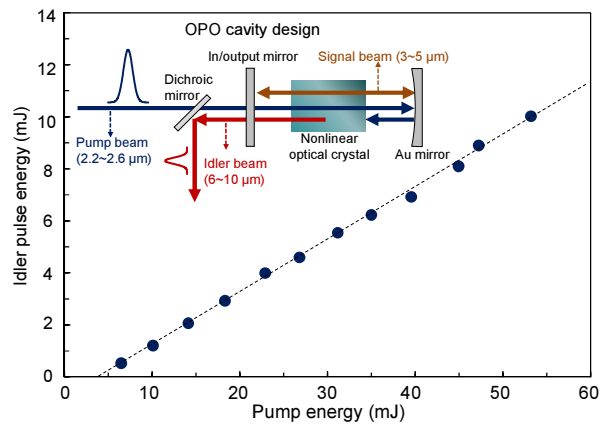


Fig.3. Schematic diagram of ZnGeP₂-OPO cavity and output characteristics of idler pulse energy.

た。OPO 用の非線形光学結晶には Type I 位相整合用 ZnGeP₂ を用いた。ZnGeP₂ には励起光とアイドラー光に対して AR コーティングが施されている。OPO 共振器は入出力ミラーと Au ミラーを用いて構成し、シグナル光のみを共振させるシングルレゾナンス共振器を採用した。入出力ミラーより出力するアイドラー光をダイクロイックミラーを用いて分離してパルスエネルギーを計測した。図3にアイドラー光の波長が 6.1 μm の場合の入出力特性を示した。励起エネルギー 53.2 mJ の時に 10.0 mJ のパルスエネルギーを得た。この時のエネルギー変換効率 は 18.8% であった。またアイドラー光の波長掃引は、ZnGeP₂ の位相整合角を固定し Cr:ZnSe レーザーの波長を変化させることで実現した。Cr:ZnSe レーザーの波長を 2.44~2.34 μm の領域で制御することで、4.9~8.2 μm の波長可変域を確認した。

4. おわりに

本研究では、中赤外リモートセンシングのための電子波長可変 Cr:ZnSe レーザー励起 6-10 μm コヒーレント光源の開発に成功した。現在、本光源を利用したアセトンの遠隔検知にも成功しており、今後は光源と計測の双方の高度化を進める。

謝辞

本研究は、文部科学書の化学技術戦略推進費による「安全・安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラム」の一環として実施されました。

参考文献

- (1) T. Topfer, K. P. Petrov, Y. Mine, D. Jundt, R. F. Curl, and F. K. Tiittel, *App. Opt.* **36**, 8042 (1997).
- (2) D. Richter, P. Weibring, A. Fried, O. Tadanaga, Y. Nishida, M. Asobe, and H. Suzuki " *Opt. Express* **15**, 564 (2007).
- (3) J. M. Ingram and A. W Fountain III, *Appl. Spectroscopy* **61**, 1254 (2007).
- (4) S. Wada, K. Akagawa, and H. Tashiro, *Opt. Lett.* **21**, 731 (1996).