

深紫外波長域におけるラマン光の遠隔計測用受光系の開発

江藤 修三¹, 市川 祐嗣², 荻田 将一², 朝日 一平²

¹一般財団法人電力中央研究所 (〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂二丁目 6 番 1 号)

²株式会社四国総合研究所 (〒761-0192 香川県高松市屋島西町 2109 番地 8)

System development for remote measurement of Raman spectrum in deep-ultraviolet wavelength region

Shuzo ETO¹, Yuji ICHIKAWA², Masakazu OGITA², and Ippei ASAH²

¹ Central Research Institute of Electric Power Industry, 2-6-1 Nagasaka, Yokosuka city, Kanagawa 240-0196

² Shikoku Research Institute Inc., 2109-8 Yashima-nishimachi, Takamatsu city, Kagawa 761-0192

Abstract: Remote measurement of hazardous materials is required to eliminate the materials safely. Raman spectroscopy in deep-ultraviolet (DUV) wavelength region is a candidate for classification of materials. We have developed the light receiver system for measurement of Raman spectra in the DUV wavelength region at 20 m from the system to a target. The experimental results show that the Raman spectrum of molecules in atmosphere in the DUV wavelength region can be measured by using the light receiver system at 20-40 m from the system.

Key Words: Raman scattering, Deep Ultraviolet, Spectroscopy, Telescope, Optical design

1. はじめに

可燃物質や毒物等を遠隔で検知及び識別する方法として、ラマン分光法による遠隔計測法の開発を進めている¹⁾。本研究では、共鳴ラマン効果によりラマンスペクトル強度が著しく増加することに着目して、200~300 nm の深紫外波長域の光を計測する。多種類の物質同定を行うことを目的とする場合、ラマンスペクトルの詳細な形状を把握する必要がある。そのため、散乱光を計測する受光系では、望遠鏡で光を集光し、分光器と ICCD を用いて分光計測する方法が用いられてきた²⁾。これらの研究では、可視波長域の光を計測する LIDAR 装置を用いる。一方、深紫外波長域の光を計測する場合は、分光するために色収差を抑制すること、受光系としての伝送効率を高くすることが必要となる。

本研究では、深紫外波長域のラマン光を遠隔で分光計測するための受光系の製作とその性能について検証した結果について報告する。

2. 受光系の開発

2.1 望遠鏡

信号ノイズ強度比の試算結果³⁾より、望遠鏡の主鏡から計測対象物までの距離(物体距離)20~100 m を計測範囲とした場合に、十分な信号ノイズ強度比のラマンスペクトルが計測できる見通しが得られた。この結果を踏まえて、望遠鏡を製作した。主な特徴は以下の通りである。

1. 2 枚のミラーのみで構成される口径 300 mm のカセグレン式望遠鏡を製作した。レンズ等

の透過型素子を用いないため、本望遠鏡では色収差がなく、分光計測に適している。

2. 望遠鏡の副鏡と主鏡の間隔を調整できる構造にした。これにより、物体距離によらず、望遠鏡で集められた光は Fig.1 に示す様に常に同じ位置で結像する。したがって、分光器等の各機器の配置を変更することなく、物体距離を変えて計測することが可能となる。

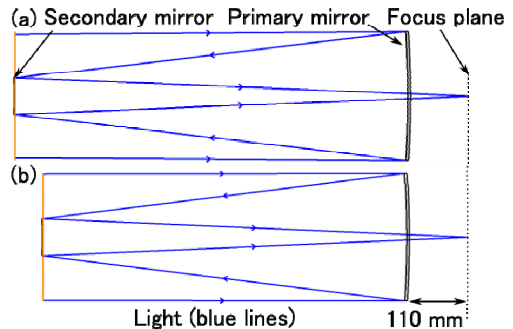


Figure 1. Optical layout of the telescope when the object distance is focused at (a) 20 m and (b) 100 m.

2.2 深紫外光の伝送

レーザ散乱光の時間分解計測を行う一般的な LIDAR 装置では、望遠鏡の視野を変更する場合に、望遠鏡から検出器へ光を伝送させるために光ファイバを用いることが多い。しかし、深紫外波長域の光ファイバの透過率は著しく低いため、次に示す 2 つの方法を組み合わせることで、任意の物体距離及び望遠鏡のあおり角で、望遠鏡で集めた光を分光器まで伝送することにした。

一つ目に、受光系に使用する機器全てを一つの架台に設置し、その架台ごとあおり角を調整する機構を設けた。これにより、再アライメントせずに望遠鏡の視野を変更することが可能になった。

二つ目に、軸外し放物面鏡 2 個を用いて、望遠鏡から分光器まで光伝送できるリレー光学系を製作した。2 個の軸外し放物面鏡の焦点は、それぞれ望遠鏡の像側の焦点及び分光器の入射スリットに位置し、Fig.2 に示す様に放物面鏡は対向に配置した。放物面鏡の間には、フィルタを挿入できるホルダを用意した。軸外し放物面鏡の間隔をマイクロメータで調整することにより、分光器の入射スリットにて結像する光の位置を 1 mm 以下の精度でアライメントする。

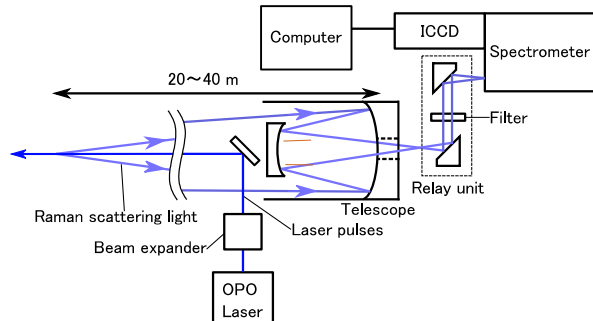


Figure 2. Experimental setups for the remote measurement of Raman scattering light.

2.3 受光系の構築

望遠鏡、リレー光学系、分光器、検出器及びこれらを搭載する架台からなる受光系を構築した。受光系には、ツェルニターナ型分光器 (Andor, Kymera 328i) と ICCD (Andor, iStar DH334) を用いた。視野及び光軸調整に必要な最低限のミラー枚数にしたことで、望遠鏡とリレー光学系を合わせた伝送効率は 210 nm で 45.3 % となった。

3. 受光系の性能確認

3.1 実験配置

受光系を用いて深紫外波長域のラマン光を計測できることを確認するために、Fig.2 に示す実験配置で大気中分子のラマン散乱光を計測した。レーザー光を遠隔伝搬させるために、210~250 nm のレーザー光を物体距離 20 m 以上の任意の位置で集光させることが可能なガリレイ型ビームエキスパンダを製作した。

実験では、光パラメトリック変換レーザー (Opotek, Radiant HE 355 LD) を用いて、217 nm のレーザー光を発生させた。レーザー光をビームエキスパンダに入射した後に、望遠鏡の副鏡の背面に設置した平面ミラーで反射することにより、レーザー光と受光系の光軸が一致するようにした。物体距離 20~40 m の範囲において、集光点でのレーザーエネルギーは 1.13~1.27 mJ/pulse であった。

レーザー散乱光を遮断するために、特注のロング

パスフィルタ(カットオン波長 223 nm)を製作し、リレー光学系の内部に設置した。フィルタを通過した光は、刻線数 1200 grooves/mm の回折格子を用いて、スリット幅 50 μm 、ICCD ゲート幅 5 ns、スペクトル積算回数 200 回の条件で計測した。ICCD のゲート遅延時間を調整することにより、物体距離 19.7~20.4 m, 39.7~40.4 m の範囲で生じる散乱光を物体距離 20 m, 40 m でのラマン散乱スペクトルとして計測した。

3.2 実験結果

物体距離 20 m 及び 40 m の位置の大気分子からのラマン散乱光を遠隔計測した結果を Fig.3 に示す。効率的に散乱光を望遠鏡にて集光できたことにより、酸素分子及び窒素分子のラマンスペクトルが観測された。これより、本受光系を用いて、深紫外波長域のラマン光の遠隔分光計測が可能であると評価した。

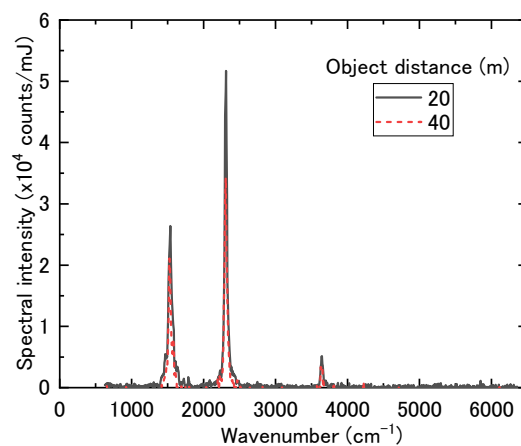


Figure 3. Raman spectra obtained from particles in the atmosphere when the object distance is focused at 20 m and 40 m.

4. まとめ

深紫外波長域のラマン光を遠隔計測するための受光系を製作し、物体距離 20 及び 40 m にて大気中分子のラマン光を計測できることを確認した。現在、各種物質の遠隔計測行っており、その初期結果も報告する予定である。

謝辞

本研究は防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものです。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) S. Eto *et al.*, Proc. SPIE **11160** (2019), 111600G.
- 2) A. J. Hopkins *et al.*, Appl. Spectrosc., **70** (2016), 861-873.