

高速広帯域分光に向けた分散素子を用いた光コム分光計

A dispersive direct frequency comb spectrometer
for rapid and broadband spectroscopy

(JILA^a, Canon Inc.^b) Kana Iwakuni^a, Thinh Q. Bui^a,
Justin F. Nidermeyer^a, Takashi Sukegawa^b, Jun Ye^a

We have developed a new dispersive direct frequency comb spectrometer with an immersion grating in the long-wave infrared region of 8–10 μm . Owing to the high resolving power of the immersion grating, we achieved the frequency resolution of 460 MHz, the highest resolution in this wavelength region with a dispersive spectrometer. This spectrometer enables us to do precise spectroscopy of transient and large molecules in the long mid-infrared region.

【序論】光コムを分光計の光源として使う「光コム直接分光」は、短時間で広帯域スペクトルを高分解能で観察できることから、近年非常に盛んに研究されている。光コム直接分光を実現する上での技術的な問題点は、繰り返し周波数 100 MHz 程度で数 10 THz にわたるコムスペクトルをいかに高分解能に観察するか、である。それを実現する方法として、フーリエ分光、デュアルコム分光、Virtually Imaged Phase Array (VIPA) など分散素子を用いた分光法が考案されてきた。分散素子を用いた分光法は、高速に広帯域スペクトルを取得することを得意とし、10 μs でスペクトルを観察することができる [1, 2]。

本研究では、中赤外領域の長波長側で分散素子を用いた新しい分光計を開発した。この波長域には基礎物理や大気解析に重要な分子が存在し、開発した分光計はこれらの精密分光を可能にする。

【実験】図 1 (a) は本研究で開発したイメージング分光計の概念図を示す。光源には波長同調範囲 8–10 μm 、出力パワー約 100 mW を持つ光コムを用いる [3]。光源の出力はレンズペアでビーム径が拡大されたのち、イメージング回折格子に入射する。図 1 (b) はイメージング回折格子の写真を示す。横から見ると、直角三角形の形をしており、その斜辺に回折格子が加工してある。光は図中の矢印の方向から入射し、回折光は逆向きの方向に出力される。イメージング回折格子では、材料として用いる物質中での回折を利用するため、その屈折率分だけ位相差が増幅される。また、ブレイズ角が大きいので、実効的なビーム径がその分大きくなる。これらの効果により、イメージング回折格子では通常の反射型回折格子に比べ、約 100 倍高い分解能が得られる。さらに、イメージング回折格子の利点として、VIPA に比べてスループットが 2 倍以上高いことが挙げられる。本研究では、Ge イメージング回折格子を用い、その屈折率は 4、ピッチは 476 μm 、ブレイズ角は 75° である。イメージング回折格子のフリースペクトラルレンジ (FSR) は約 20 nm で、光コムのスペクトル帯域の 1/10 程度である。イメージング回折格子の出力は、複数の高次回折光が空間的に重なっている。そのため、分散方向がイメージング回折格子と直交するように反射型回折格子を挿入し、光コムのスペクトルを 2 次元的に分散させることで、光コムのスペクトル全体を観察する。反射型回折格子の 1 次回折光をイメージングレンズで集光し、赤外カメラで結像する。

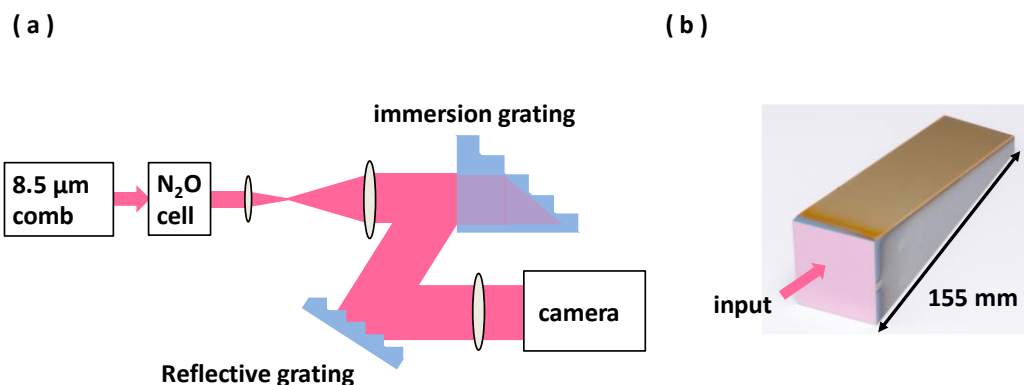


図1 実験系の概念図。(a)イマージョン分光計のセットアップ概念図。(b)イマージョン回折格子の写真。

【結果】図2は観察した2次元イメージである。縦軸はイマージョン回折格子の分散方向、横軸は反射型回折格子の分散方向を示す。光コムの繰り返し周波数110 MHzに対し、イマージョン回折格子の分解能が低いので、コムモードは分離されずに線状に見える。黒点は図1(a)のガスセルに封入したN₂O分子の吸収を示す。2次元イメージで観測される吸収線のパターンからイマージョン回折格子のFSRを見積もり、スペクトルを得た。本研究では、様々な試料圧力下で線幅を測定し、イマージョン回折格子の周波数分解能を測定した。ビーム直径が34 mmのとき、分解能460 MHzが得られ、これはこの波長域での分散系分光計としては最高性能である。さらに、コムモードを光共振器でフィルタリングすることで実効的な繰り返し周波数を2 GHzまで大きくし、コムモードが分離した2次元イメージの取得にも成功した。

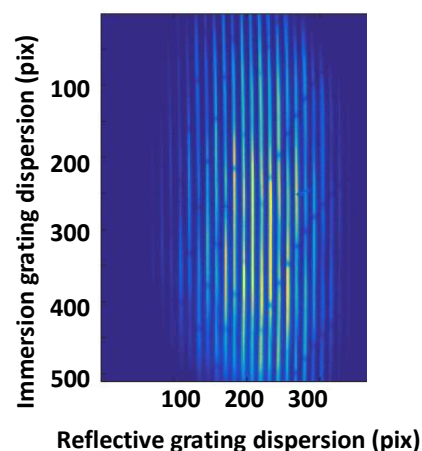


図2 取得したN₂O吸収線を含む2次元イメージ。

【まとめ】本研究では、イマージョン回折格子を用いた光コム分光計を波長8–10 μm帯で開発した。この波長域で最も高い周波数分解能を実現した。この分光計は、中赤外領域の長波長側での精密コム分光を可能にする。例えば、構造異性体のリアルタイムの精密分光や、冷却技術と組み合わせで質量の大きな分子の精密分光の実現が期待される[4]。

【参考文献】

- [1] B. J. Bjork, T. Q. Bui, O. H. Heckl, P. B. Changala, B. Spaun, P. Heu, D. Follman, C. Deutsch, G. D. Cole, M. Aspelmeyer, M. Okumura, and J. Ye, *Science* **354**, 444-448 (2016).
- [2] T. Q. Bui, B. J. Bjork, P. B. Changala, T. L. Nguyen, J. F. Stanton, M. Okumura, and J. Ye, *Sci. Adv.* **4**, 4777 (2018).
- [3] K. Iwakuni, G. Porat, T. Q. Bui, B. J. Bjork, S. B. Schoun, O. H. Heckl, M. E. Fermann, and J. Ye, *Appl. Phys. B* **124**, 128 (2018).
- [4] P. Bryan Changala, M. L. Weichman, K. F. Lee, M. E. Fermann, J. Ye, *Science* **363**, 49 (2019).