

Performance Evaluation of Mid-IR Spectrometers by Using a Mid-IR Tunable Optical Parametric Oscillator

Hee Jin Nam^{1,4}, In-Ho Bae¹, Seung Kwan Kim^{1†}, Young-Jun Choi^{2,3}, and Jae-Hyeon Ko^{4†}

¹Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, 267, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

²Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute, 776, Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34055, Korea

³University of Science and Technology, (UST), 217, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

⁴School of Nano Convergence Technology, Nano Convergence Technology Center, Hallym University, 1, Hallymdaehak-gil, Chuncheon 24252, Korea

(Received June 17, 2019; Revised July 23, 2019; Accepted July 25, 2019)

We have used a mid-IR (mid-infrared) continuous-wave (cw) optical parametric oscillator (OPO), developed previously and described in Ref. 12, to build a performance-evaluation setup for a mid-IR spectrometer. The used CW OPO had a wavelength tuning range of 2.5-3.6 μm using a pump laser with a wavelength of 1064 nm and a fan-out MgO-doped periodically poled lithium niobate (MgO:PPLN) nonlinear crystal in a concentric cavity design. The OPO was combined with a near-IR integrating sphere and a Fourier-transform IR optical spectrum analyzer to build a performance-evaluation setup for mid-IR spectrometers. We applied this performance-evaluation setup to evaluating a mid-IR spectrometer developed domestically, and demonstrated the capability of evaluating the performance, such as spectral resolution, signal-to-noise ratio, spectral stray light, and so on, based on this setup.

Keywords: Optical parametric oscillator, Mid-IR, Mid-IR tunable laser, Mid-IR spectrometer, Performance evaluation

OCIS codes: (190.4410) Nonlinear optics, parametric processes; (190.4970) Parametric oscillators and amplifiers; (140.3070) Infrared and far-infrared lasers; (140.3600) Lasers, tunable; (120.3930) Metrological instrumentation

중적외선 광 파라메트릭 발진기를 이용한 중적외선 분광기 성능 평가

남희진^{1,4} · 김승관^{1†} · 배인호¹ · 최영준^{2,3} · 고재현^{4†}

¹한국표준과학연구원 광학표준센터

☎ 34113 대전광역시 유성구 가정로 267

²한국천문연구원 우주과학본부

☎ 34055 대전광역시 유성구 대덕대로 776

³과학기술연합대학대학교대학원

☎ 34113 대전광역시 유성구 가정로 217

⁴한림대학교 나노융합스쿨

☎ 24252 강원도 춘천시 한림대학길 1

(2019년 6월 17일 받음, 2019년 7월 23일 수정본 받음, 2019년 7월 25일 게재 확정)

기존에 개발되었던 광 파라메트릭 발진기를 이용해 중적외선 분광기의 성능 평가 장치를 구축하였다. 사용된 중적외선 광 파라메트릭 발진기는 파장 1064 nm의 연속파 레이저로 펌핑되는 fan-out형 MgO-doped periodically poled lithium niobate (MgO:PPLN) 비선형 결정을 사용하여 파장가변 영역이 2.5~3.6 μm 인 공중심 공진기 구조를 가지고 있다. 이 광 파라메트릭 발진기에 중적외선용 적분구 및 푸리에 변환 적외선 광 스펙트럼 분석기를 결합하여 중적외선 분광기 성능평가 장치를 구축하였다. 구축된 평가 장치를 국내에서 개발한 중적외선용 분광기에 적용, 성능 평가를 진행함으로써 본 평가 장치를 분광기의 파장 분해능, 신호대잡음비, 분광 떠돌이광 등의 성능을 평가하는데 활용할 수 있음을 보였다.

Keywords: 광 파라메트릭 발진기, 중적외선, 중적외선 파장가변 레이저, 중적외선 분광기, 성능평가

OCIS codes: (190.4410) Nonlinear optics, parametric processes; (190.4970) Parametric oscillators and amplifiers; (140.3070) Infrared and far-infrared lasers; (140.3600) Lasers, tunable; (120.3930) Metrological instrumentation

†E-mail: sk@kriss.re.kr, ORCID: 0000-0003-3022-4059

E-mail: hwangko@hallym.ac.kr, ORCID: 0000-0001-7766-2385

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

중적외선(mid-IR) 영역은 파장이 2.5~10 μm 정도인 적외선 대역을 일컫는다. 이 대역에는 물 분자를 포함한 많은 분자들의 내부 진동에 의한 흡수 스펙트럼이 존재하기 때문에 분자의 존재 여부 및 함량을 알아내는데 있어 유용하게 사용될 수 있다^[1,2]. 또한 중적외선 영역은 흡수 스펙트럼 분석에 기초한 원격 장비에 활용하거나 비침습적으로 인체의 신호를 확인할 수 있기 때문에 의학 진단 분야에서의 활용 가능성도 높다^[3,4]. 이 외에 환경 모니터링 분야나 천문학, 통신 등 많은 응용 분야에서 중적외선 영역의 이용에 관심을 갖고 있다^[5-9].

이러한 응용에는 중적외선 분광기가 필수적이므로 이에 대한 연구 개발도 활발한데, 그 성능을 평가하기 위해서는 중적외선 영역에서 좁은 선폭을 갖는 파장가변 광원이 필요하다^[10]. 현재 중적외선 영역의 광원으로는 quantum cascade laser (QCL), interband cascade laser (ICL) 등을 활용할 수 있으나 파장 가변 영역이 좁아 넓은 파장 영역을 포함하기 위해서는 다수의 레이저를 확보해야 하므로 비용이 많이 든다. 한편 광파라메트릭발진기(optical parametric oscillator, OPO)는 주기적으로 분극된 비선형 결정과 공진기 최적화를 통해 넓은 영역의 파장가변 레이저를 저비용으로 만들 수 있으므로^[11] 그 기술을 활용하여 중적외선 파장가변 광원을 구현할 수 있다. 물론 OPO를 이용한 중적외선 파장가변 광원도 상용화되어 있으나 대부분 고출력을 위한 펄스 구동 형태여서 좁은 선폭을 필요로 하는 분광기의 성능 평가에 활용하기는 어렵다.

본 논문에서는 기존에 개발된 중적외선 OPO를 활용해 중적외선 분광기의 성능 평가 장치를 개발한 연구 결과를 보고한다. 사용된 중적외선 OPO는 fan-out형 MgO:PPLN 결정을 사용하여 좁은 선폭을 갖도록 연속 발진하는 파장가변형 OPO이다^[12]. 파장가변영역은 물 분자의 흡수파장을 고려하여 $3.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 하였다. 또한 여기서 개발한 중적외선 분광기 성능 평가 장치를 사용하여 국내에서 개발이 진행되고 있는 중적외선 분광기의 성능을 평가한 예를 보여주고자 한다.

II. OPO를 이용한 중적외선 분광기 성능 평가장치 개발

2.1. 평가 장치에 사용된 중적외선 광원

본 연구에서 사용된 중적외선 OPO는 참고문헌 [12]에서 개발된 OPO이다. 본 논문에서는 본 연구의 이해를 위해 필요한 내용만을 최소한으로 요약하여 서술하고자 한다. 그림 1은 연속 발진형 DPSS (diode pumped solid state) Nd:YAG 레이저를 펌프 광원(Mephisto, Coherent)으로 사용하고 MgO:PPLN 결정을 이용하여 연속 발진하는 OPO의 설계도로서 참고문헌 [12]에서 개발된 OPO의 구성을 개략적으로 나타낸 것이다. Nd:YAG 레이저의 중심파장은 1064 nm, 선폭은 1 kHz 이고 최대 출력은 약 1.1 W이다. OPO의 출력을 높이기 위하여 공진기를 이용해 펌프의 출력을 올리는 pump-enhanced (PE) 방법을 사용하였다. 공진기를 구성하는 곡률 50 mm인 거울 M1과 M2 중 M1은 signal에 대해서는 99% 이상의 반사율을, 펌프에 대해서는 5%의 투과율을, 그리고 idler에 대해서는 85% 이상의 투과율을 가졌고 M2는 signal에 대해서는 2%의 투과율을, 펌프에 대해서는 99%의 반사율을, 그리고 idler에 대해서는 85% 이상의 투과율을 가진 것을 사용하였다^[12]. 공진기 내부의 비선형 결정으로는 fan-out 형태의 MgO:PPLN을 사용하였다. 결정의 온도가 변하면 결정의 굴절률과 주기도 변하기 때문에 안정적인 온도 유지를 위해 오븐을 사용하였고 온도는 75°C로 유지하였다. 결정을 미세 선형이동장치에 고정하여 공진기 광 축에 수직인 방향으로 이동하여 공진기의 정렬을 깨지 않는 상태에서 결정의 주기를 바꿀 수 있도록 하였다. 출력되는 빔으로부터 중적외선 idler 빔만을 사용하기 위해 dichroic mirror (DM)를 사용하였다. DM1은 펌프 광, DM2는 signal만을 선택적으로 반사하여 경로를 바꿔 주었고 idler는 똑바로 출력되도록 설계하였다. 그림 1에는 나와 있지 않지만, Fourier-transform-infrared (FTIR) optical spectrum analyzer (OSA)를 사용하여 idler의 파장과 출력을 측정하였다. 펌프 광을 공진기에 입사하여 증폭시키는 것은 이점이 많지만 공진기가 안정적이지 않아 다루기 힘들다는 단점도 있다. OPO의 출력을 높이기 위해 펌프광이

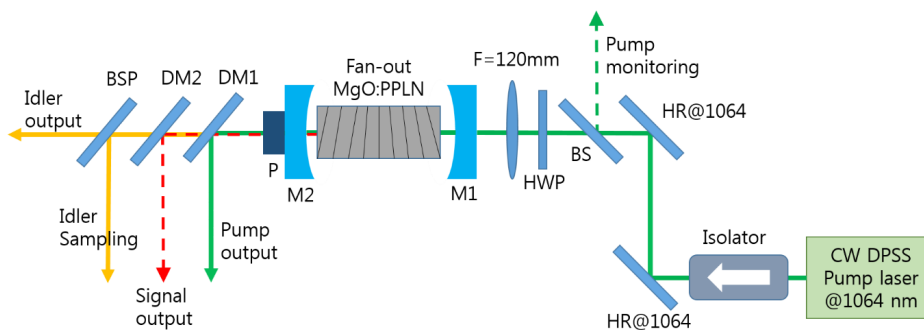


Fig. 1. Schematic diagram of the OPO setup by using MgO:PPLN single crystal and a DPSS pump laser (Nd:YAG) for generating continuous-wave output in the mid-IR range (BS, beam splitter; CW DPSS, continuous-wave diode pumped solid state; HR@1064, high-reflectivity mirror at 1064 nm; HWP, half-wave plate; M, mirror; DM, dichroic mirror).

공진되도록 하였고, 펌프광의 공진 상태를 유지하여 안정된 OPO 출력을 확보하기 위해 Pound-Drever-Hall (PDH) 방법을 변형하여 공진기를 안정화하였다.

참고문헌 [12]에 상술된 것처럼 fan-out grating 형태의 40 mm × 10 mm × 0.5 mm 크기의 MgO:PPLN 결정의 주기를 28 μm에서 32 μm 사이에서 바꿈에 따라 idler의 출력 파장을 2500 nm에서 3600 nm까지 변화시킬 수 있었다¹²⁾. Idler 파장은 InF₃ 광섬유를 통해 FTIR OSA로 입사시켜 측정하였고 이때의 결정의 온도는 약 75°C로 유지되었고 펌프 출력은 660 mW이었다. OPO의 펌프 출력이 1.1 W였을 때 파장 1529 nm, 1648 nm, 1848 nm에서 각각의 최대 출력은 140 mW, 220 mW, 100 mW이었다. 동일한 조건에서 idler 파장이 3500 nm, 3003 nm, 2508 nm인 경우에 최대 출력은 각각 64 mW, 62 mW, 57 mW이었다¹²⁾. 출력의 안정도는 1시간 동안 파장 2507.68 nm, 3003.24 nm, 3499.63 nm에서 표준 편차 기준으로 3% 미만이었다. 같은 조건에서의 파장 안정도는 ±0.5 pm 미만이었다.

FTIR OSA로 파장을 측정하기에 앞서, 정확한 측정을 위해 파장 눈금을 교정하였다. 한국표준과학연구원에서 파장이 교정된 광원으로서 중심 파장이 1.3 μm인 파장 기준 광원을 다중모드 광섬유를 통해 FTIR OSA에 입사시켰다. 광섬유의 정렬과 꼬임을 다르게 하여 총 7번 파장을 측정하였고 그 결과 -0.02 nm ± 0.01 nm ($k=2$, 신뢰의 구간 약 95%)의 보정값을 얻었다.

2.2. 중적외선 분광기 성능평가 장치

보통 중적외선 분광기는 분광 기능을 가지면서 카메라 형태로 물체의 표면 이미지를 찍는 경우가 많다. 중적외선 분광기의 성능 평가 장치도 이와 비슷한 조건을 구현하기 위해 중적외선용 적분구를 사용하여 중적외선 분광기가 적분구의 개구로부터 나오는 Lambertian 광원을 볼 수 있도록 한 후 분광 특성을 측정할 수 있도록 하였다. OPO로부터 출력되는 레이저를 FTIR OSA에 입사시켜 파장을 측정한 후 이를 다시 적분구로 입사시키기 위해 적분구를 2축 자동 선형이동

장치 위에 설치하였다. 추가된 레이저는 파장이 2.0 μm인 distributed feedback (DFB) laser diode (LD)와 파장이 각각 3.8 μm과 4.0 μm인 DFB ICL을 사용하였다.

그림 2(a)는 광원, 적분구, FTIR OSA 그리고 중적외선 분광기의 배치도이다. OPO 빔의 위치로 적분구 입사창의 중심을 잡았으며, 적분구 입사창에 나머지 광원의 빔을 움직여 정렬할 수 있도록 하였다. 적분구 출사창에 평가 대상인 중적외선 분광기를 위치시킬 수 있도록 하였다. 적분구의 뒤편에 FTIR OSA를 위치시켜 적분구만 움직이면 광원의 파장을 측정할 수 있도록 구성하였다. 그림 2(b)는 중적외선 분광기의 성능평가 배치도인데 III장에서 자세히 설명할 것이다.

2.3. 중적외선용 적분구의 파장의존 응답 특성 측정

중적외선 분광기 성능 평가 장치에 사용하는 중적외선용 적분구는 내벽이 확산 금코팅된 것으로 LabSphere사에서 제작한 것을 사용하였다. 중적외선 분광기 성능 평가를 위해서는 파장마다 비슷한 수준의 복사 휘도를 갖는 것이 필요하므로 적분구의 파장에 따른 응답 특성(throughput)을 미리 알고 있어야 한다. 적분구의 입사창으로 들어간 중적외선 빛이 적분구 내에서 골고루 확산 반사되어 적분구의 출사창으로 나올 때, 파장에 따라 응답 특성이 상대적으로 얼마나 달라지는지 능동 면적 1 mm²인 amplified InAsSb 검출기를 사용하여 측정하였다. 먼저 그림 3은 각 파장의 광원에서 나오는 평행광 빔의 단면을 2차원 스캔하여 얻은 출력 분포이고 이를 적분하여 적분구 입사창으로 들어가는 빔의 출력을 얻었다. 다음으로 적분구 출사창에 검출기를 두어 출사창 개구면의 복사휘도에 비례하는 출력을 얻었다. 그림 4는 두 출력 측정값의 비로부터 구한 상대적 throughput을 파장에 따라 그린 것이다. 여기서 오차 막대는 측정값의 합성표준불확도를 나타낸다. 합성표준불확도를 구성하는 개별 불확도 성분으로는 적분구 입사창으로 들어가는 빔의 출력 측정의 반복성, 적분구 출사창 출력 측정의 반복성, 검출기 정렬에 따른 출력 측정의 재현성, 그리고 광원의 안정도에 따른 출력 비의 불확도를 포함하였고, 표 1에 파장 별로 개별 성분의 상

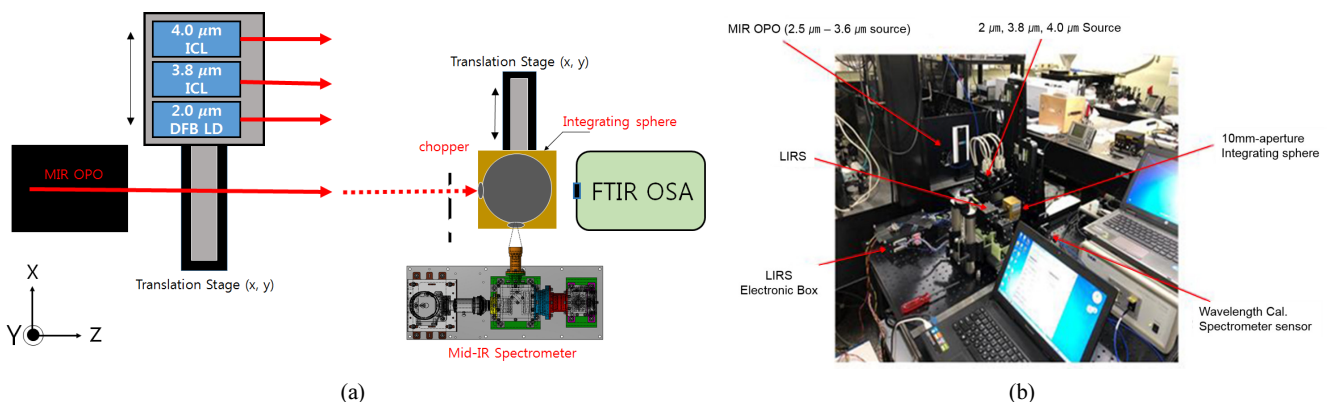


Fig. 2. (a) Schematic diagram showing the alignment of mid-IR light sources, the integrating sphere, the FTIR OSA and the mid-IR spectrometer. (b) A photograph showing the evaluation optical setup for the mid-IR spectrometer. (LIRS, Lunar InfraRed Spectrometer).

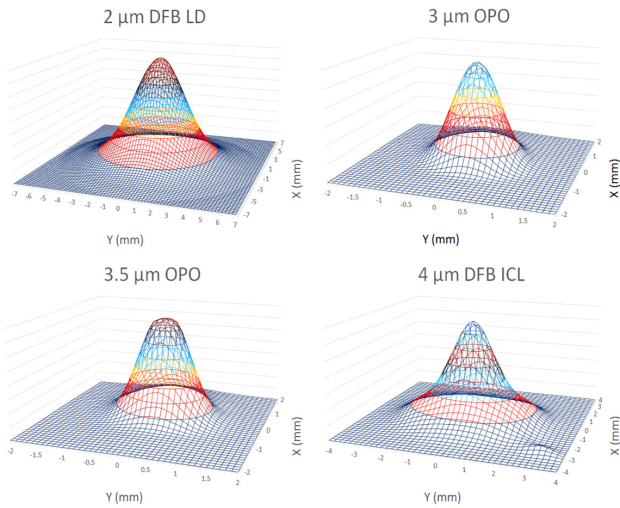


Fig. 3. Throughput obtained by 2-dimensional scanning of the parallel laser beam of light source at 4 different wavelengths.

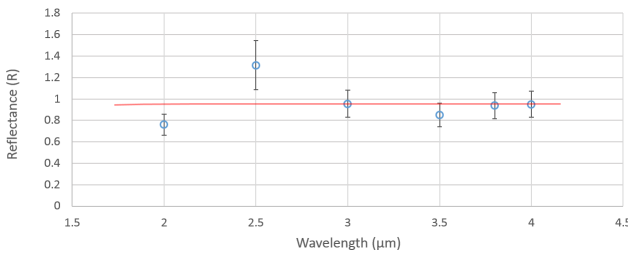


Fig. 4. Wavelength dependence of the relative throughput obtained from the ratio of the two output measurements.

대 불확도와 상대 합성표준불확도를 정리하였다. 그림 4에서 빨간색 선은 적분구 제조사에서 제공한 코팅 물질의 반사율 데이터를 그린 것이다. 사용한 광원 중에 출력 안정도가 가장 높은 3.8 μm와 4 μm 파장에서 측정된 상대적 throughput

을 반사율 데이터와 일치시켜 보면, 전반적인 반사율은 1에 가까우나 2 μm와 2.5 μm 파장에서는 상대 합성표준불확도를 벗어난 것을 알 수 있다. 2 μm 광원은 그림 3에서 보는 것과 같이 나머지 광원들에 비해 빔 크기가 상대적으로 커서 적분구 입사창으로 모든 출력이 입사하지 못하여 반사율이 낮게 측정된 것으로 보인다. 그리고 2.5 μm 광원은 표 1에 나타난 바와 같이 적분구 입사창으로 들어가는 빔의 출력 측정 시 반복성이 크게 나빠져서 오차가 커진 것으로 보인다. 결과적으로는 그림 4를 통해 중적외선용 적분구의 응답 특성이 파장에 무관하게 거의 같음을 알 수 있었다.

III. 중적외선 분광기 성능 평가 결과

그림 2(b)는 중적외선 분광기의 성능평가 배치도 및 평가 과정을 촬영한 것이다. 중적외선 분광기는 한국천문연구원서 달 표면의 수분 분포를 탐사하기 위해 개발 중인 것을 사용하였는데, 분광 영역은 2~4 μm였다. 그림 5는 파장이 3.1 μm인 레이저 빔을 적분구에 입사시켰을 때 중적외선 분광기에서 검출된 이미지이다. 이미지의 가로축은 카메라가 본 일차원 공간 이미지에 해당하고 세로축은 파장을 의미한다. 녹색으로 표시된 부분은 빛이 도달하지 않은 영역으로 검출기의 픽셀에서 나오는 전기적 잡음이고 노란색 부분이 빛이 도달하여 전기 신호로 바뀐 부분이다. 단일 파장의 빛이 공간적으로 균일하게 퍼져 있는 것을 관측한 것이므로 이상적인 경우 검출기의 이미지는 가로로 한 줄의 노란색 선으로 나타내야 할 것이다. 노란색 선이 두 개로 보이는 것은 이상적으로 분광된 선 외에 중적외선 분광기의 광학계를 구성하는 특정 부품의 면에서 반사된 빛이 검출기의 다른 위치에 선을 형성하여 함께 측정된 것으로 보인다. 어떤 광학 부품에 의해서 이중의 선이 형성되는지는 현재로서는 명확하지 않으나 분광기 내 프리즘이라고 예상되고 있고 이 부분에 대해서는 추가적인 검증이 필요하다. 선이 수평에서 각도를 가지고

Table 1. Relative uncertainty and relative standard uncertainty of the individual components at 4 different wavelengths

Uncertainty component at 2 μm	Relative standard uncertainty (%)	Uncertainty component at 2.5 μm	Relative standard uncertainty (%)
Repeatability of input power to integrating sphere	0.01	Repeatability of input power to integrating sphere	5.77
Repeatability of output power from integrating sphere	0.08	Repeatability of output power from integrating sphere	0.09
Reproducibility of detector alignment	6.49	Reproducibility of detector alignment	6.49
Stability of laser source	0.02	Stability of laser source	0.56
Combined standard uncertainty	6.49	Combined standard uncertainty	8.69
Uncertainty component at 3 μm	Relative standard uncertainty (%)	Uncertainty component at 2.5 μm	Relative standard uncertainty (%)
Repeatability of input power to integrating sphere	0.09	Repeatability of input power to integrating sphere	0.02
Repeatability of output power from integrating sphere	0.05	Repeatability of output power from integrating sphere	0.02
Reproducibility of detector alignment	6.49	Reproducibility of detector alignment	6.49
Stability of laser source	0.56	Stability of laser source	0.00
Combined standard uncertainty	6.50	Combined standard uncertainty	6.49

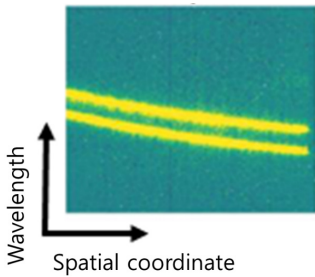


Fig. 5. The output of the mid-IR spectrometer for the input beam at the wavelength of 3.1 μm as a function of wavelength (vertical axis) and spatial coordinate (horizontal axis).

있는 것은 증적외선 분광기의 검출기 부분의 각도가 틀어져 있다는 것을 의미한다. 이를 통해 분광기 내부의 반사광을 억제할 수 있는 광학계의 최적화와 검출기의 각도 정렬이 필요함을 알 수 있었다. 추가적으로 선의 두께를 측정하여 파장 3.1 μm 에서의 분해능을 알 수 있다. 이상의 결과는 본 연구에서 개발한 성능 평가 장치를 이용해 증적외선 분광기를 평가할 수 있고 분광기가 가지는 문제점을 성공적으로 찾아낼 수 있음을 보여주는 하나의 예이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 1064 nm 파장의 펌프 레이저와 fan-out 형 MgO:PPLN 비선형 결정을 사용한 연속발전 증적외선 OPO를 이용하여 파장가변 영역 2.5~3.6 μm 범위에서 좁은 선폭의 증적외선 광원을 이용, 증적외선 분광기의 분광 성능을 평가할 수 있는 장치를 개발한 후 국내에서 개발한 증적외선 분광기의 성능을 평가한 사례를 제시하였다. 이를 통해 본 증적외선 분광기 성능 평가 장치를 활용해 분광기의 다양한 성능을 평가할 수 있음을 확인하였다.

본 연구 개발 결과를 토대로 비선형 결정의 분극 주기, 공진기 거울의 반사 및 투과 파장 영역 등을 변화시켜 보다 장 파장의 증적외선 광원을 만들 수 있으며, 증적외선 분광기 성능 평가뿐만 아니라 센서, 의료, 국방 등 다양한 증적외선 응용 분야에서 광원 및 성능 평가 장치로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(2015M1A3A3A03027287, Development of performance evaluation technologies for gamma-ray, neutron and mid-IR spectrometers)과 한국표준과학연구원(18011043, 18011033,

Establishment of National Physical Measurement Standards and Improvements of Calibration/Measurement Capability)의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다.

References

1. R. N. Clark, "Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon," *Science* **326**, 562-564 (2009).
2. C. Y. Wang, T. Herr, P. Del'Haye, A. Schliesser, J. Hofer, R. Holzwarth, T. W. Hänsch, N. Picqué, and T. J. Kippenberg, "Mid-infrared optical frequency combs at 2.5 μm based on crystalline microresonators," *Nat. Commun.* **4**, 1345 (2013).
3. B. M. Walsh, H. R. Lee, and N. P. Barnes, "Mid infrared lasers for remote sensing applications," *J. Lumin.* **169**, 400-405 (2016).
4. B. Y. Song, "Clinical predictive diagnostic study on prognosis of Bell's palsy with the digital infrared thermal image," *J. Korean Acupunct. Moxibust. Soc.* **18**, 1-13 (2001).
5. A. Colaprete, P. Schultz, J. Heldmann, D. Wooden, M. Shirley, K. Ennico, B. Hermalyn, W. Marshall, A. Ricco, R. C. Elphic, D. Goldstein, D. Summy, G. D. Bart, E. Asphaug, D. Korycansky, D. Landis, and L. Sollitt, "Detection of water in the LCROSS ejecta plume," *Science* **330**, 463-468 (2010).
6. D. Ouzounov and F. Freund, "Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data," *Adv. Space Res.* **33**, 268-273 (2004).
7. J.-P. Williams, D. A. Paige, B. T. Greenhagen, and E. Sefton-Nash, "The global surface temperatures of the Moon as measured by the diviner lunar radiometer experiment," *Icarus* **283**, 300-325 (2017).
8. M. Montanaro, A. Gerace, and S. Rohrbach, "Toward an operational stray light correction for the Landsat 8 thermal infrared sensor," *Appl. Opt.* **54**, 3963-3978 (2015).
9. A. Gerace and M. Montanaro, "Derivation and validation of the stray light correction algorithm for the thermal infrared sensor onboard Landsat-8," *Remote Sens. Environ.* **191**, 246-257 (2017).
10. Y. Zong, S. W. Brown, B. C. Johnson, K. R. Lykke, and Y. Ohno, "Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers," *Appl. Opt.* **45**, 1111-1119 (2006).
11. I.-H. Bae, H. S. Moon, S. Zaske, C. Becher, S. K. Kim, S.-N. Park, and D.-H. Lee, "Low-threshold singly-resonant continuous-wave optical parametric oscillator based on MgO-doped PPLN," *Appl. Phys. B* **103**, 311-319 (2011).
12. I.-H. Bae, S. D. Lim, J.-K. Yoo, D.-H. Lee, and S. K. Kim, "Development of a mid-infrared CW optical parametric oscillator based on fan-out grating MgO:PPLN pumped at 1064 nm," *Curr. Opt. Photon.* **3**, 33-39 (2019).