

# 비분산적외선 CO<sub>2</sub> 센서를 위한 DBR기반의 패브리 페로-필터 설계 및 성능 연구

도남곤<sup>1,2</sup> · 이준엽<sup>1,2</sup> · 정동건<sup>1</sup> · 공성호<sup>2</sup> · 정대웅<sup>1,+</sup>

## Design and performance study of fabry-perot filter based on DBR for a non-dispersive infrared carbon dioxide sensor

Nam Gon Do<sup>1,2</sup>, Junyeop Lee<sup>1,2</sup>, Dong Geon Jung<sup>1</sup>, Seong Ho Kong<sup>2</sup>, and Daewoong Jung<sup>1,+</sup>

### Abstract

A highly sensitive and selective non-dispersive infrared (NDIR) carbon dioxide gas sensor requires achieving high transmittance and narrow full width at half maximum (FWHM), which depends on the interface of the optical filter for precise measurement of carbon dioxide concentration. This paper presents the design, simulation, and fabrication of a Fabry-Perot filter based on a distributed Bragg reflector (DBR) for a low-cost NDIR carbon dioxide sensor. The Fabry-Perot filter consists of upper and lower DBR pairs, which comprise multilayered stacks of alternating high- and low-index thin films, and a cavity layer for the resonance of incident light. As the number of DBR pairs inside the reflector increases, the FWHM of the transmitted light becomes narrower, but the transmittance of light decreases substantially. Therefore, it is essential to analyze the relationship between the FWHM and transmittance according to the number of DBR pairs. The DBR is made of silicon and silicon dioxide by RF magnetron sputtering on a glass wafer. After the optimal conditions based on simulation results were realized, the DBR exhibited a light transmittance of 38.5% at 4.26 μm and an FWHM of 158 nm. The improved results substantiate the advantages of the low-cost and minimized process compared to expensive commercial filters.

**Keywords :** Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), Non-dispersive infrared (NDIR), Fabry-Perot filter, Distributed bragg reflector.

### 1. 서 론

최근 산업화 · 기후변화로 인한 온실가스, 미세먼지, 황사 등 대기오염 문제가 심각해지면서 실시간 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 모니터링 시스템에 대한 필요성이 대두되고 있다. 또한, 하천 및 강의 수질오염 측정 시스템, 인체 호흡 분석 등 이산화탄소 가스 센서의 적용 분야가 늘어남에 따라 센서의 수요가 급증하여 이산화탄소 측정용 센서 개발이 국, 내외에서 활발히 연구되고 있다.

CO<sub>2</sub>를 측정할 수 있는 대표적인 방법으로는 전기화학식 [1],

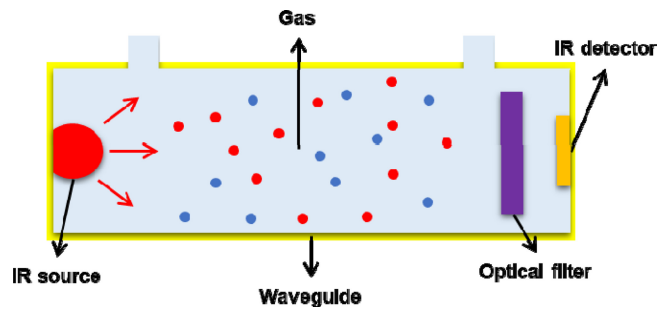


Fig. 1. Schematic of a typical NDIR gas sensor.

반도체식 [2], 열전도도 방식 [3] 등이 존재하지만 공통적으로 선택성이 떨어진다는 단점이 있다. 앞서 언급한 활용분야에서는 CO<sub>2</sub>뿐만 아닌 습도(H<sub>2</sub>O), 메탄(CH<sub>4</sub>), 일산화탄소(CO), 일산화질소(NO) 등과 같이 혼합된 상태로 가스가 존재하기 때문에 센서의 높은 선택성이 필수적으로 요구되고 있다. 반면 비분산적외선(NDIR) 방식 가스센서는 가스 분자의 고유 특성을 이용하기 때문에 타 가스에 대한 간섭을 최소화할 수 있어 선택성이 매우 우수한 특성을 가지고 있다 [4].

비분산적외선 CO<sub>2</sub> 센서는 적외선 파장 대역을 가진 광원, 가스와 빛이 이동하는 광도파관, CO<sub>2</sub> 가스 분자의 흡수 파장대역

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 안전시스템연구그룹 (Safety System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

320, Techno sunhwan-ro, Yuga-eup, Dalseong-gun, Daegu, Republic of Korea

<sup>2</sup> 경북대학교 전자전기공학부 (School of Electrical Engineering, Kyungpook National University)

80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, Republic of Korea

<sup>+</sup>Corresponding author: dwjung@kitech.re.kr

(Received: Jul. 4, 2021, Revised: Jul. 18, 2021, Accepted: Jul. 19, 2021)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인 4.26 μm만을 투과하는 광필터와 광검출기로 이루어져 있다. Fig. 1은 가장 기본적인 비분산적외선 방식 센서의 계략도이다 [5]. 방출된 빛은 광도파관 내부에 존재하는 CO<sub>2</sub> 가스 분자에 의해 흡수되며, 광필터에 의해 4.26 μm에 해당하는 파장대역만이 검출기로 도달하게 된다. 검출기로 도달하는 광량은 식(1)에 제시된 Beer-Lambert 법칙을 따른다 [6].

$$I = I_0 e^{-\alpha lc} \tag{1}$$

초기 광량 I<sub>0</sub>는 가스 분자의 흡수 계수 α와 광경로 l, 가스 농도 c에 의해 감소하게 된다. 한편 비분산적외선 CO<sub>2</sub> 센서의 감도와 선택성은 광필터의 투과율과 반치전폭에 의해 결정되게 된다. 투과율이 클수록 검출기에 도달하는 광량이 커지게 되며, 반치전폭이 CO<sub>2</sub>의 흡수 파장대역과 일치할 때 기타 가스의 간섭을 최소화할 수 있기 때문이다 [7-10].

그러나 비분산적외선 CO<sub>2</sub> 센서는 필요 부품들이 많으며, 센서를 제작하는데 있어 공정 및 재료의 비용면에서 문제점이 존재한다. 광도파관은 필수적으로 광손실을 줄이기위해 내부에 금(Au) 코팅이 이루어지며, 광원과 광검출기의 경우 외부 요인의 영향을 막기위한 패키징이 요구된다. 또한 광필터의 경우 고가의 기관과 수십층의 박막 증착이 이루어지기 때문에 개발비용이 비싸다는 단점이 있다.

본 연구에서는 상대적으로 저가의 재료인 유기기관과 Si, SiO<sub>2</sub>를 이용한 분산 브래그 반사경(DBR) 기반의 패브리-페로 필터를 설계하고, CO<sub>2</sub> 센싱을 위한 최적의 적층 조건을 고찰함으로써 저비용이며 효과적인 CO<sub>2</sub> 검출용 광필터를 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰 및 실험 방법

### 2.1 이론적 고찰

DBR은 두개의 물질이 반복적으로 적층된 다층 박막을 가지는 반사경이다. 두 물질의 굴절률 차이로 인해 각층의 계면에서 프레넬 반사가 발생하게 되며 반사된 빛은 보강간섭을 이루게 된다. 수직 입사되는 빛의 보강간섭을 위한 박막의 두께는 식(2)와 같다.

$$d_H = \frac{\lambda}{4n_H}, d_L = \frac{\lambda}{4n_L} \tag{2}$$

여기서 λ는 빛의 파장, n<sub>H</sub>, n<sub>L</sub>은 각각 고굴절률 물질과 저굴절률 물질의 굴절상수이다. 고굴절률 물질과 저굴절률 물질이 반복 적층되는 DBR의 반사율은 식(3)와 같이 반복 적층 수 m이 증가할수록, 두 물질의 굴절률 차이가 클수록 증가하게 된다. n<sub>s</sub>는 기관의 굴절상수이며, n<sub>i</sub>는 입사 빛의 굴절상수이다.

$$R = \left( \frac{1 - \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m} \left(\frac{n_L}{n_s}\right)^2}{1 + \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m} \left(\frac{n_L}{n_s}\right)^2} \right)^2 \tag{3}$$

패브리-페로 필터는 공진층 상·하부에 반사체가 평행하게 존재하는 광필터로, 입사된 빛이 공진층 내부에서 다중간섭현상이 발생해 공진층의 두께와 대응하는 파장만을 선택적으로 투과시키고 다른 파장은 반사된다.

$$T_{FP} = \left(1 + \frac{4R}{(1-R)^2}\right)^{-1} \tag{4}$$

$$FWHM = \frac{\lambda^2(1-R)}{2\pi d\sqrt{R}} \tag{5}$$

필터의 투과율은 식(3)을 따르며, 반치전폭의 경우 식(4)와 같다. 이 필터의 성능지표들은 상·하부 반사체의 반사율에 의해 특성이 결정된다. 즉, DBR 기반의 패브리-페로 필터는 DBR의 반복적층 수를 조절함으로써 필터 성능을 가변시킬 수 있다. 앞서 언급한 것과 같이 비분산적외선 방식의 CO<sub>2</sub> 가스센서의 선택성을 높이기 위해선 필터의 투과율과 반치전폭 특성이 매우 중요하다.

Fig. 2는 Thermo Fisher Scientific社의 Nicolet Continuum FT-IR(Fourier transform infrared spectroscopy)을 이용하여 측정된 대기 중 가스 분자의 흡수 스펙트럼이다. CO<sub>2</sub>의 경우 4.26 μm를 기준으로 약 150 nm 대역의 빛을 흡수한다 [11]. 그러므로 비분산적외선 CO<sub>2</sub> 센서를 위한 광필터는 CO<sub>2</sub> 가스 분자의 흡수대역의 광만을 투과하는 것이 필요함을 알 수 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 DBR 반복 적층수에 따른 반사율과 DBR기반의 패브리-페로 필터의 투과특성을 분석하고 이를 바탕으로 광필터 제작을 진행하였다.

### 2.2 필터 설계

DBR의 고굴절률 물질과 저굴절률 물질은 Si와 SiO<sub>2</sub>를 각각 사용하였다. Si의 경우 중적외선 대역에서 높은 투과율을 가져

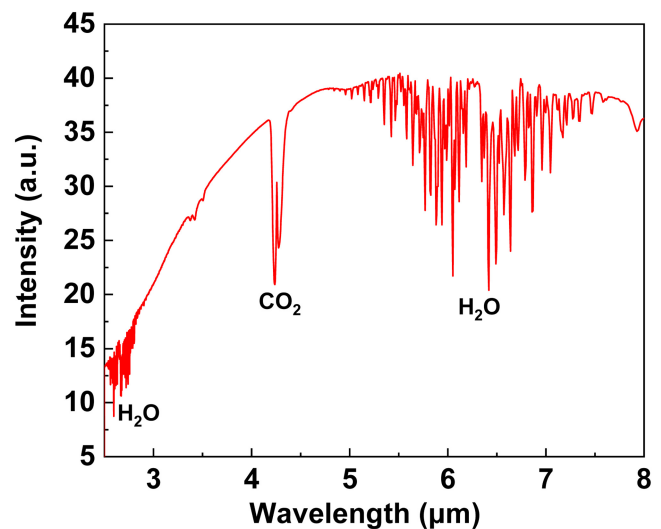


Fig. 2. IR-absorption spectra of gases measured by FT-IR.

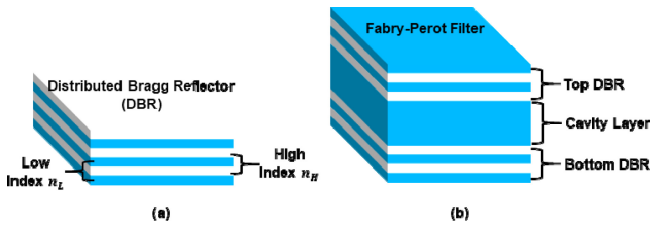


Fig. 3. Schematic of (a) DBR and (b) Fabry-Perot filter based on DBR.

Table 1. Refractive indices and calculated thickness of Si/SiO<sub>2</sub>.

| Layer            | Material         | Refractive index | Thickness (nm) |
|------------------|------------------|------------------|----------------|
| High index $n_H$ | Si               | 3.64             | 292.6          |
| Low index $n_L$  | SiO <sub>2</sub> | 1.46             | 729.5          |
| Cavity           | SiO <sub>2</sub> | 1.46             | 1459.0         |

중적외선 광학계에서 보편적으로 사용되는 물질이다 [12]. 각 물질의 굴절상수와 박막의 두께 값은 표 1에 제시한 것과 같다. CO<sub>2</sub>의 흡수 파장대역인 4.26 μm을 기준으로 Si와 SiO<sub>2</sub>는 굴절률 차이가 2.18로 고반사율의 DBR을 기대할 수 있다. 본 연구에서 사용한 시뮬레이션은 LightTrans社의 VirtualLab Fusion을 이용하였으며 시뮬레이션 설정 값 중, 입사 광은 모두 수직으로 하였다. 또한 빛의 매질( $n$ )과 기판의 굴절률( $n_s$ )은 1로 설정하여 이상적인 광 시뮬레이션 조건을 조성하였다. Fig. 3과 같이 두 물질이 반복되는 DBR과 해당 DBR이 반사체로 적용된 페브리페로 필터를 설계한 뒤 VirtualLab Fusion의 Coating analyser함수를 이용하여 광특성을 확인하였다.

### 2.3 필터 제조 및 특성 평가

표 2와 같은 조건으로 Si/SiO<sub>2</sub>모두 KVT社의KVS-5000 RF magnetron sputter를 이용하여 각 박막을 반복 증착하여 하부 DBR, 공진층, 상부 DBR 순으로 제작하였다. 본 연구에선 6 인치 유리 웨이퍼를 기판으로 사용하였다. 시중에 판매되고 있는 적외선 광필터의 경우 플루오린화 칼슘(CaF<sub>2</sub>), 불화 바륨(BaF<sub>2</sub>) 또는 사파이어 기판과 같이 적외선영역에서 투과율이 높은 재료가 사용되어지고 있다 [13,14]. 이러한 기판들은 비용적인 측면에서 매우 고가이며, CO<sub>2</sub> 가스의 흡수 파장대역 외에도 높은 투과율을 가지므로 별도의 반사 코팅 또는 구조가 필요하다. 이러한 특성은 비분산 적외선센서의 가격을 높이며, 선택성에 치명적인 단점이 될 수 있다. 반면, 유리 웨이퍼의 경우 상대적으로 가격이 낮으며, 4.26 μm 파장을 기준으로 65% 이상의 준수한 광투과율과 5.5 μm 이상의 영역을 모두 반사하는 Cut-off 필터와 같이 동작하는 장점이 있다. 완성된 DBR과 필터의 반사율 및 투과율은 FT-IR을 이용하여 2.5-25 μm 대역을 측정하였다. Fig. 4(a)는 완성된 필터와 반복적층 수가 2일 때의 필터 사

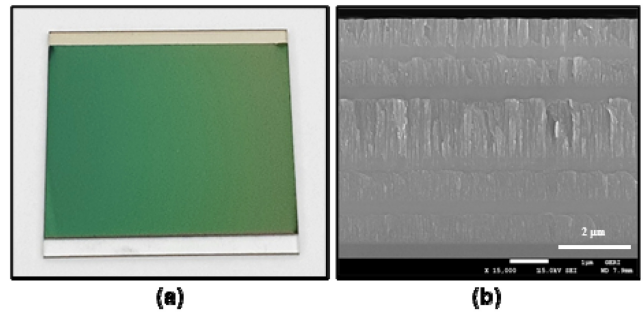


Fig. 4. (a) Photograph and (b) SEM image of fabricated Fabry-Perot filter based on DBR.

Table 2. RF magnetron sputtering conditions for the Si/SiO<sub>2</sub> deposition.

| Condition        | Si  | SiO <sub>2</sub> |
|------------------|-----|------------------|
| Temperature (°C) | 25  | 25               |
| RF power (W)     | 307 | 298              |
| Gas              | Ar  | Ar               |
| Pressure (mTorr) | 20  | 20               |

진이며 Fig. 4(b)는 JEOL社의 JSM-7610F FE-SEM(field emission-scanning electron microscope)을 이용하여 촬영한 필터의 단면 사진이다. SiO<sub>2</sub>와 Si가 반복 적층된 하부 DBR위에 공진층을 형성하고, 상부 DBR을 증착 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

이론적 고찰을 통해 반복 적층 수가 증가할 수록 DBR의 반사율은 증가하고, 이러한 DBR이 페브리페로 필터의 반사체로 사용되었을 때, 투과율과 반치전폭에 영향을 주는 것을 확인하였다. 앞선 연구에서 두관계의 경우 반복 적층 수가 증가할 수록 투과율은 감소하게 되지만, 반치전폭은 향상되는 Trade-off 관계를 가지는 것을 시뮬레이션을 통해 확인되었다 [15]. 때문에 CO<sub>2</sub>가스 분자의 흡수 파장대역과 일치하면서, 투과율을 가장 높게 가질 수 있는 반복 적층 수 조건을 확인할 필요성이 있다. 시뮬레이션을 통해 비분산적외선 CO<sub>2</sub> 가스센서에 가장 적합한 적층 수 조건을 확인하였다.

DBR의 반복 적층 수  $m=1$ ,  $m=2$ 와  $m=3$ 일 때 반사율 시뮬레이션 결과는 Fig. 5(a)와 같이 나타났다.  $m=1$ ,  $m=2$ 와  $m=3$  모두 4.26 μm에서 82.79%, 94.74%, 98.21%의 최대 반사율을 가졌다. 특히  $m=2$ 와  $m=3$ 의 경우 3-7 μm에서 90 % 이상의 반사율을 가지는 고효율의 Band pass필터로 동작하는 것을 확인할 수 있었다.  $m=1$ ,  $m=2$ 와  $m=3$  DBR이 접목된 페브리페로 필터의 투과율은 Fig. 5(b)와 같이 시뮬레이션 되었다. 4.26 μm에서  $m=1$ 은 69.37%,  $m=2$ 의 경우 66.41%의 투과율이 나타났으

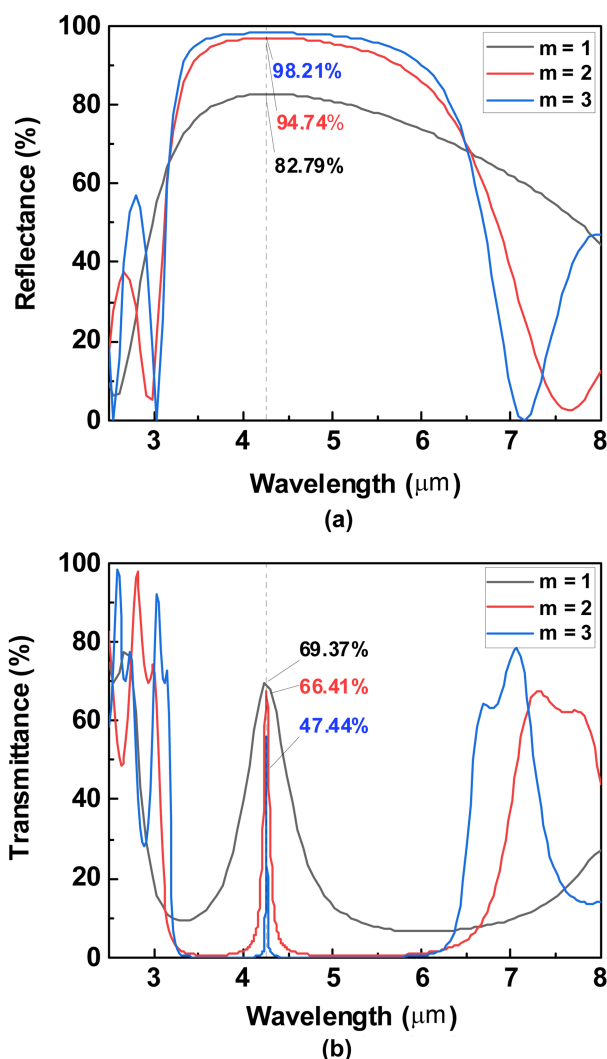


Fig. 5. (a) Comparison of simulated reflectance of DBR and (b) simulated transmittance of Fabry-Perot filter based on DBR.

며 m=3의 경우 47.44 %로 적층 수가 늘어날 수록 투과율이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 반치전폭은 각각 613 nm, 108 nm, 21 nm으로 나타났는데, 이를 통해 DBR의 반복 적층 수가 2일 때 최적의 조건인 것을 알 수 있다. 적층 수가 증가함에 따라 투과율과 반치전폭 모두 감소하므로 CO<sub>2</sub>의 흡수 파장 대역과 일치하면서 최대 투과율을 가지는 조건이기 때문이다.

시뮬레이션결과를 통해 m=2인 DBR과 DBR이 접목된 페브리-페로 필터를 RF magnetron sputter를 이용하여 제작하였다. 제작된 DBR과 필터의 광특성은 FT-IR을 이용하여 측정하였으며 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a)를 보면 DBR과 유리 웨이퍼 기판의 반사율을 확인할 수 있다. Si/SiO<sub>2</sub> 증착을 통해 4.26 μm 파장에서 33.4%에서 94.9%로 반사율이 증가한 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 시뮬레이션 결과와 같이 3~5.5 μm에서 90% 이상의 고효율의 반사율을 가진 Band pass 필터 특성을 확인할 수 있었다. 또한 5.5 μm 이상의 파장대역에서는 반사율이 100%

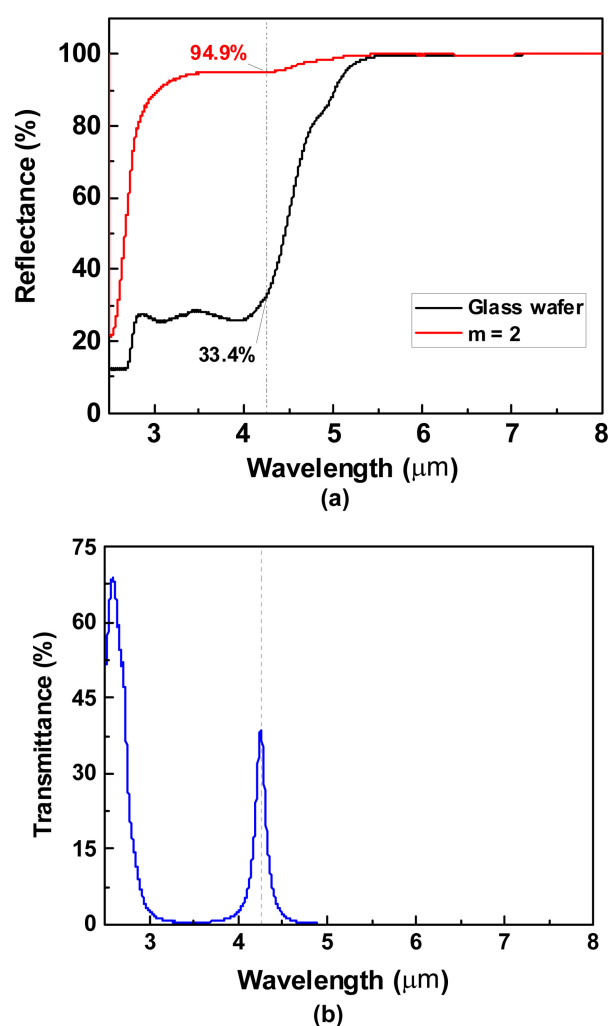


Fig. 6. (a) Measured reflectance of DBR and (b) transmittance of Fabry-Perot filter.

에 근접하는 cut-off 특성을 가지는 것을 알 수 있다. 즉, 기판의 투과특성과 다층 구조의 박막의 광특성은 곱의 형태로 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 최종적으로 완성된 m=2 DBR 기반 페브리 페로 필터의 투과율을 보여준다. 4.26 μm에서 중심 파장을 가지며, 투과율이 38.5%로 측정되었다. 또한 반치전폭은 158 nm로 CO<sub>2</sub> 흡수 파장 대역과 일치하였다. 결과를 통해 DBR 기반 페브리-페로 필터 유리 기판의 투과특성을 이용하여 별도의 완전 반사 코팅 없이도 5.5 μm 이상의 파장영역을 차단하면서 동시에 4.26 μm을 중심 파장으로 하는 광 필터 제작이 가능함을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 저가형 비분산적외선 CO<sub>2</sub> 센서 개발을 위해 저가의 재료인 Si/SiO<sub>2</sub>와 유리 웨이퍼를 이용한 DBR 기반 페

브리-페로 필터를 설계하고, 고찰을 통해 얻은 최적의 조건을 제작함으로써 시뮬레이션 결과를 입증하였다.

DBR의 반복 적층 수가 증가함에 따라 반사율이 증가하며  $m=2$ 일 때 94.9%의 반사율을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 또한  $m=2$ 인 패브리-페로는 반치전폭이 158 nm로 FT-IR로 측정된 CO<sub>2</sub> 흡수 파장대역과 일치하는 결과를 보였다. 또한 유리 웨이퍼의 Cut-off 특성을 통해 추가적인 공정 없이도 5.5 μm 이상의 파장영역을 모두 차단하는 것을 확인하였다. 이러한 특성은 CH<sub>4</sub>, CO, NO 등 CO<sub>2</sub>가스와 인접한 흡수 파장대역을 갖는 기타가스의 간섭을 줄여 비분산적외선 CO<sub>2</sub> 센서의 선택성을 높일 수 있을 것이라 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2020-DD-UP-0348).

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업의 지원으로 수행한 연구입니다.

### REFERENCES

- [1] A. F. Pérez-Cadenas, C. H. Ros, S. Morales-Torres, M. Pérez-Cadenas, P. J. Kooyman, C. Moreno-Castilla, and F. Kapteijn, "Metal-doped carbon xerogels for the electro-catalytic conversion of CO<sub>2</sub> to hydrocarbons", *Carbon N. Y.*, Vol. 56, pp. 324-331, 2013.
- [2] B. Liao, Q. Wei, K. Wang, and Y. Liu, "Study on CuO-BaTiO<sub>3</sub> semiconductor CO<sub>2</sub> sensor", *Sens. Actuator*, Vol. 80, pp. 208-214, 2001.
- [3] M. Febrina, E. Satria, M. Djamal, W. Srigutomo, and M. Liess, "Development of a simple CO<sub>2</sub> sensor based on the thermal conductivity detection by a thermopile", *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, Vol. 133, pp. 139-144, 2019.
- [4] T. V. Dinh, I. Y. Choi, Y. S. Son, and J. C. Kim, "A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction", *Sens. Actuator, B-Chem.*, Vol. 231, pp. 529-538, 2016.
- [5] R. Bogue, "Detecting gases with light: A review of optical gas sensor technologies", *Sens. Rev.*, Vol. 35, No. 2, pp. 133-140, 2015.
- [6] L. Kocsis, P. Herman, and A. Eke, "The modified Beer-Lambert law revisited", *Phys. Med. Biol.*, Vol. 51, No. 5, p. N91, 2006.
- [7] L. Fleming, D. Gibson, S. Song, C. Li, and S. Reid, "Reducing N<sub>2</sub>O induced cross-talk in a NDIR CO<sub>2</sub> gas sensor for breath analysis using multilayer thin film optical interference coatings", *Surf. Coatings Technol.*, vol. 336, pp. 9-16, 2018.
- [8] R. Frodl and T. Tille. "A High-Precision NDIR CO<sub>2</sub> gas sensor for automotive applications", *IEEE Sens. J.*, Vol. 6, No. 6, pp. 1697-1705, 2006.
- [9] A. Sklorz, A. Schafer, and W. Lang, "Merging ethylene NDIR gas sensors with preconcentrator-devices for sensitivity enhancement", *Sensors Actuators, B Chem.*, Vol. 170, pp. 21-27, 2012.
- [10] L. B. Mendes, N. W. M. Ogink, N. Edouard, H. J. C. van Dooren, I. D. F. F. Tinôco, and J. Mosquera, "NDIR gas sensor for spatial monitoring of carbon dioxide concentrations in naturally ventilated livestock buildings", *Sens.*, Vol. 15, No. 5, pp. 11239-11257, 2015.
- [11] A. Schmidt-Bleker, J. Winter, S. Iseni, M. Dünnbier, K. D. Weltmann, and S. Reuter, "Reactive species output of a plasma jet with a shielding gas device - Combination of FTIR absorption spectroscopy and gas phase modelling", *J. Phys. D. Appl. Phys.*, Vol. 47, No. 14, p. 145201, 2014.
- [12] M. Cho, J. H. Seo, D. Zhao, J. Lee, K. Xiong, X. Yin, and Z. Ma, "Amorphous Si/SiO<sub>2</sub> distributed Bragg reflectors with transfer printed single-crystalline Si nanomembranes", *J. Vac. Sci. Technol. B, Nanotechnol. Microelectron. Mater. Process. Meas. Phenom.*, Vol. 34, No. 4, p. 040601, 2016.
- [13] M. R. K. Kelly-Gorham, B. M. Devetter, C. S. Brauer, B. D. Cannon, S. D. Burton, M. Bliss, and T. L. Myers, "Complex refractive index measurements for BaF<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> via single-angle infrared reflectance spectroscopy", *Opt. Mater.*, Vol. 72, pp. 743-748, 2017.
- [14] T. P. Purdy and D. M. Stamper-Kurn, "Integrating cavity quantum electrodynamics and ultracold-atom chips with on-chip dielectric mirrors and temperature stabilization", *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, Vol. 90, No. 3, pp. 401-405, 2008.
- [15] N. G. Do, J. Lee, D. G. Jung, S. H. Kong, and D. Jung, "Si/SiO<sub>2</sub> Multilayer-based Fabry-Perot Filter for 4.26 μm Filtering in Carbon Dioxide Detection", *J. Sens. Sci. Technol.*, No. 30, No. 1, pp. 56-60, 2021.