Check for updates

Journal of Sensor Science and Technology
Vol. 30, No. 6 (2021) pp. 446-450
http://dx.doi.org/10.46670/JSST.2021.30.6.446
pISSN 1225-5475/eISSN 2093-7563

분산 반사경 기반 패브리-페로 필터를 이용한 비분산적외선 CO_2 센서의 감지 특성

도남곤[1,2] · 이준엽[1,2] · 정동건[1] · 공성호[2] · 정대웅[1,+]

Sensing characteristics of a non-dispersive infrared CO_2 sensor using a Fabry-Perot filter based on distributed Bragg reflector

Nam Gon Do[1,2], Junyeop Lee[1,2], Dong Geon Jung[1], Seong Ho Kong[2], and Daewoong Jung[1,+]

Abstract

Non-dispersive infrared (NDIR) gas sensors typically use an optical filter that transmits a discriminating 4.26 μm wavelength band to measure carbon dioxide (CO2), as CO2 absorbs 4.26 μm infrared. The filter performance depends on the transmittance and full width at half maximum (FWHM). This paper presents the fabrication, sensitivity, and selectivity characteristics of a distributed Bragg reflector (DBR)-based Fabry-Perot filter with a simple structure for CO2 detection. Each Ge and SiO2 films were prepared using the RF magnetron sputtering technique. The transmittance characteristics were measured using Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR). The fabricated filter had a peak transmittance of 59.1% at 4.26 μm and a FWHM of 158 nm. In addition, sensitivity and selectivity experiments were conducted by mounting the sapphire substrate and the fabricated filter on an NDIR CO2 sensor measurement system. When measuring the sensitivity, the concentration of CO2 was observed in the range of 0–10000 ppm, and the selectivity was measured for environmental gases of 1000 ppm. The fabricated filter showed lower sensitivity to CO2 but showed higher selectivity with other gases.

Keywords : Carbon dioxide (CO_2), Non-dispersive infrared (NDIR), Fabry-Perot filter, Distributed Bragg reflector

1. 서 론

산업의 급속한 발전으로 인해 과다한 이산화탄소(CO_2) 배출과 지구 온난화 문제가 심각해지고 있다. 때문에 국내외에서 CO_2 가스 배출량을 제한하는 규제가 강화되고 있으며, 이에 따른CO_2 가스센서 개발이 활발히 연구되고 있다 [1]. 특히 공기질을 측정하기위해선 높은 감도는 물론, 높은 내구성 및 일산화탄소(CO), 메탄(CH_4)과 같은 환경 가스와의 선택성이 요구되고 있다 [2-4]. CO_2를 측정할 수 있는 방법은 전기화학식, 반도체식, 열전도도 방식 등으로 다양한 측정 방법이 존재한다. 하지만, 앞서 언급한 방법들은 내구성 문제 또는 CO, CH_4와 같이 기타 환경가스가 혼합된 대기질 측정을 할 때 간섭을 받는 단점이 존재한다. 때문에 최근에는 내구성과 선택성이 우수한 비분산적외선 방식의 CO_2 센서가 각광받고 있다 [5-7].

비분산적외선 센서는 적외선 광원, 광도파관, 광필터와 광 검출기로 이루어져 있다. Fig. 1은 핵심 소자들이 결합된 기본적인 비분산적외선 센서의 모식도다 [8]. 이 센서는 가스가 가지고 있는 흡광특성을 이용하여 농도를 측정한다.

대기중에 존재하는 질소와 산소를 제외한 대부분의 가스들은

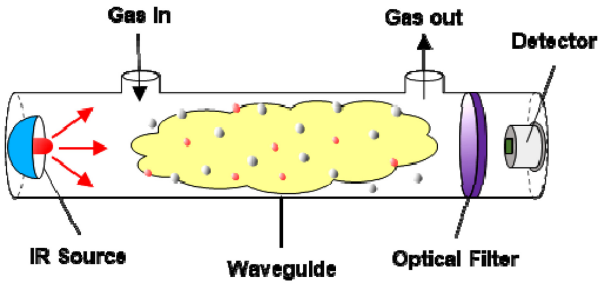


Fig. 1. Schematic diagram of a typical NDIR gas sensor with optical filter.

[1] 한국생산기술연구원 첨단메카트로닉스연구그룹 (Advanced Mechatronics R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)
320, Techno sunhwan-ro, Yuga-eup, Dalseong-gun, Daegu 42994, Republic of Korea
[2] 경북대학교 전자전기공학부 (School of Electrical Engineering, Kyungpook National University)
80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Republic of Korea
[+]Corresponding author: dwjung@kitech.re.kr
(Received: Oct. 19, 2021, Revised: Nov. 22, 2021, Accepted: Nov. 26, 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.

고유 흡수 파장대역을 가지며, 가스 분자가 흡수하는 빛의 량은 Beer-lambert 법칙을 따른다 [9].

$$I = I_o e^{-\alpha 1 c} \tag{1}$$

I_o는 입사되는 광량을 나타내며, 입사된 광은 가스의 흡수율 α와 광경로 l, 가스의 농도 c에 의해 지수적으로 감소하게 된다. Fig. 1과 같은 비분산적외선 센서가 있을 때, 광원에서 방출된 빛은 광도파관을 따라 전파하게 되며, 동시에 광도파관 내부로 주입된 가스 분자들은 고유 파장대역에 해당하는 빛을 흡수하게 된다. 이후 광 검출기가 초기 빛과 흡수된 빛의 차이를 읽어 광량에 따른 가스 농도를 계산하여 검출하게 된다. 식(1)에서 광경로의 길이와, 가스의 흡수 계수 및 농도가 높을수록 광량이 지수적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 때문에 비분산적외선 센서는 측정가스의 흡수 파장대역에 일치하는 빛 만을 검측기에 도달시킬 때 높은 감도와 선택성을 가질 수 있다. 때문에 비분산적외선 센서의 핵심요소 중 하나인 광필터의 역할이 매우 중요하다. 하지만 CO_2의 흡수파장 대역인 4.26 μm에서 피크 투과율을 가지는 광필터는 물질, 설계 및 제작과정에서 기술적인 어려움이 존재해 대부분 수입에만 의존하는 실정이다 [10]. 때문에 본 연구에서는 DBR기반의 패브리 페로 필터를 설계하여 최적화된 구조를 제시하고, 성능을 평가하여 비분산적외선 CO_2 센서를 위한 광필터 제작 방법을 제시하고자 한다. 이 구조는 공진층의 상부와 하부에 DBR이 위치하는 것이 특징이다. DBR의 재료는 중적외선 대역에서 높은 투과율을 가지며 MEMS 공정이 가능한 Ge/SiO_2를 선택하였다. 기판은 1인치 사파이어 기판을 사용하여 내구성을 높였다 [11]. 또한 사파이어기판은 중적외선 대역에서 높은 투과율을 가지는 장점이 있다 [12]. 각 박막의 두께는 굴절률을 이용해 산출하였으며, 시뮬레이션에 반영하여 상·하부 DBR의 적층 쌍수에 따른 반사율 및 투과율의 변화를 확인하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 가장 높은 선택성과 감도가 예상되는 조건을 규명하였으며, 사파이어 기판위에 RF 마그네트론 스퍼터를 이용하여 박막을 교차 적층 하였다. 완성된 필터는 최종적으로 제작된 광도파관과 상용 광원, 광검출기가 적용된 비분산적외선CO_2 가스센서 측정 시스템을 이용하여 감지 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 패브리-페로 필터 설계

4.26 μm에서 중심파장을 가지는 DBR기반 패브리페로 필터를 설계하기 위하여 LightTrans社의 VirtualLab Fusion을 이용한 시뮬레이션을 진행하였다. 고굴절률 물질인 Ge와 저굴절률 물질인 SiO_2는 VirtualLab Fusion에서 제공하는 굴절률 수치를 사용하였다 [13,14]. (n_{Ge} = 4, n_{sio2} = 3.36)

$$R = \left(\frac{1 - \left(\frac{n_{Ge}}{n_{SiO_2}} \right)^{2m} \left(\frac{n_t^2}{n_s} \right)}{1 + \left(\frac{n_{Ge}}{n_{SiO_2}} \right)^{2m} \left(\frac{n_t^2}{n_s} \right)} \right) \tag{2}$$

DBR의 반사율은 식(2)와 같이 고굴절률 물질과 저굴절률 물질의 굴절률차이가 클수록, 적층 쌍수 m이 클수록 커지게 된다. 이때 n_s과 n_t는 각각 기판의 굴절률과 매질의 굴절률을 뜻한다. 즉, DBR의 적층 쌍수가 커질 수 록 반사율은 커지며, DBR 기반의 Fabry-Perot 필터는 상·하부의 적층 쌍수에 의해 핵심 특성이 좌우됨을 알 수 있다. DBR의 반사율과 패브리 페로 필터의 광 투과특성은 아래 와 같은 관계를 가진다.

$$T_{FP} = \left(1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \right)^{-1} \tag{3}$$

$$FWHM = \frac{\lambda^2 (1-R)}{2\pi d \sqrt{R}} \tag{4}$$

식(3)은 패브리 페로 필터의 피크 투과율을 나타낸 것이며, 식(4)는 투과되는 광의 반치전폭을 나타낸다. 여기서 d는 공진층의 두께 값을 의미한다. CO_2는 4.26 μm에서 최대 흡수율 가지며 4.2-4.4 μm에서 흡수대역을 가진다. 또한 CH_4와 CO는 각각 3.3 μm, 4.6 μm에서 최대 적외선 흡수율을 가지므로, 본 연구에서는 중심파장이 4.26 μm이며, CO_2 흡수 파장대역을 충분히 포함하면서, 200 nm 이하의 반치전폭을 가지는 광학 필터 설계를 목표로 한다. 시뮬레이션의 세부 조건으로는 빛의 이동 매질 n_t는 1로 이상적인 공기의 굴절률을 채택하였다. 기판 굴절률 n_s의 경우 사파이어의 굴절률 1.5로 설정하였다 [15].

2.2 필터 증착 조건 및 특성 측정

설계한 필터의 다층 박막은 KVT 社의KVS-5000 RF 마그네트론 스퍼터를 활용하여, Ge와 SiO_2를 반복 적층하였다. 증착 시 사용한 Ge와 SiO_2타겟은 모두 인듐 본딩된 6″ x 3t이며, 기판은 1인치 사파이어 기판을 사용하였다. 증착 순서는 하부 DBR과 공진층, 상부 DBR 순으로 제작하였으며, SiO_2박막의 추가 산화를 방지하기위해 플라즈마 기체로 아르곤(Ar)을 사용하였다. 세부 증착 조건은 아래 표 1과 같이 설정하였다.

완성된 필터의 두께는 JEOL 社의 JSM-7610F FE-SEM(field emission-scanning electron microscope)를 사용하여 필터의 단면을 관찰하였다. 또한 투과 특성분석을 위해 Thermo Fishter Scientific社의 Nicolet Continuμm FT-IR(fourier transform infrared spectroscopy)을 사용하여 피크 투과율과 반치전폭을 확

Table 1. RF magnetron sputtering conditions for the Ge/SiO_2 deposition.

Condition	Ge	SiO_2
Temperature (°C)	25	25
RF power (W)	301	298
Gas	Ar	Ar
Pressure (mTorr)	20	20

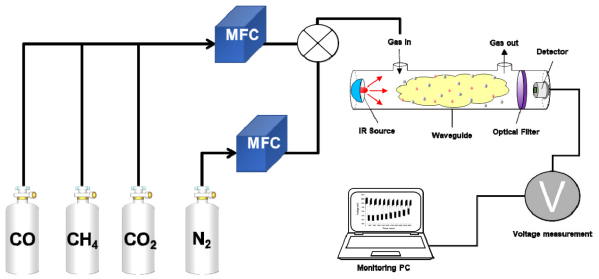


Fig. 2. Schematic sketch of the NDIR gas sensors measuring system.

인하였다.

2.3 비분산적외선 CO_2 센서 측정 시스템

제작된 필터를 Fig. 2와 같이 구성된 비분산적외선 CO_2센서 측정 시스템에 적용하여 감도 및 선택도를 확인하였다. 측정 시스템의 광원으로는 HELIOWORKS 社의 EP-4317을 사용하였으며, 적외선 센서로는 HAMAMATSU 社의 T11361-05를 사용하여 3-5 μm 영역의 적외선만을 감지하도록 하였다. 또한 적외선 광 손실을 최소화 하기위해 30 cm의 금 코팅 도파관을 사용하였다.

감도 측정은 가스 유량 컨트롤러를 이용하여 도파관 내에 CO_2 가스 농도를 측정하였다. 대기질 오염 평가를 위해 보편적으로 모니터링하는 농도인 0 - 10000 ppm을 1000 ppm 단위로 조절하여 감도 특성을 확인하였다. 선택도 특성은 1000 ppm의 CO_2, CH_4, CO 가스를 반복 측정하여 기타 환경 가스에 대한 반응성을 확인하였다. 모든 실험의 대기 가스는 N_2를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제작된 패브리-페로 필터의 특성

본 연구는 앞선 연구에서 수행한 것과 같이, DBR 적층 쌍수에 따른 패브리 페로 필터의 투과율 특성을 시뮬레이션 하여 CO_2의 흡수 파장대역과 일치하는 조건을 규명하였다 [16]. Fig. 3은 DBR의 적층 쌍수 m에 따른 패브리 페로 필터의 피크 투과율과 반치전폭의 시뮬레이션 결과이다. 투과율과 반치전폭은 적층 쌍수가 증가할수록 Trade-off 관계를 가지며, 70%이상의 투과율과 80 nm의 우수한 반치전폭을 가지는 m=2 조건이 CO_2 측정을 위한 최적의 조건임을 확인할 수 있었다. m=1 조건은 반치전폭이 605.46 nm로 기타 가스의 간섭을 야기할 수 있으며, 그 외의 조건은 피크 투과율이 급격한 감소로 센서의 감도가 매우 떨어질 것이며, 박막의 층수가 늘어나 공정측면에서 효율적이지 못할 것으로 판단되었다.

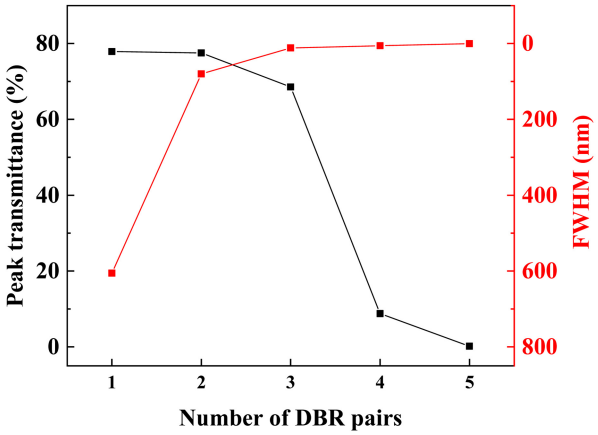
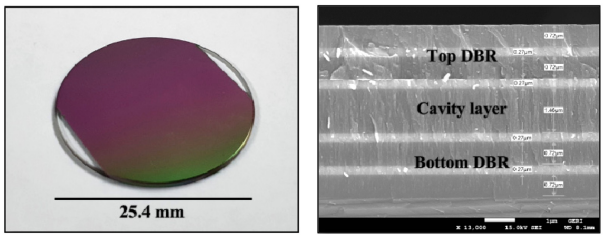


Fig. 3. Relationship between the peak transmittance and FWHM of the fabricated Fabry-Perot filter.

시뮬레이션 결과를 통해 CO_2 흡수파장 영역을 충분히 포함하며, 다층 박막의 층수를 줄일 수 있는 m=2의 조건을 선택하여 DBR기반의 패브리 페로 필터를 제작하였다. 고굴절률 물질 Ge과 저굴절률 물질SiO_2를 반복적층 하였고, 하부 DBR과 상부 DBR사이에 SiO_2를 이용하여 공진층을 형성하였다. Fig. 4(a)는 1인치 사파이어 기판에 다층 박막을 형성한 패브리 페로 필터의 사진이다. Fig. 4(b)는 제작된 필터의 단면을 촬영한 SEM 사진이다. 공진층의 두께는 빛의 보강간섭을 발생시키기 위해 4.26 μm의 1/4을 공진층의 굴절률로 나눈 1448 nm 만큼 증착하였다 [17,18].

Fig. 5는 환경가스의 흡수 파장 대역과 FT-IR을 이용하여 측정한 완성된 패브리 페로 필터의 투과율 그래프이다. 필터는



(a) (b)

Fig. 4. Fabricated Fabry-Perot filter with m=2 condition image (a) and cross section SEM image (b).

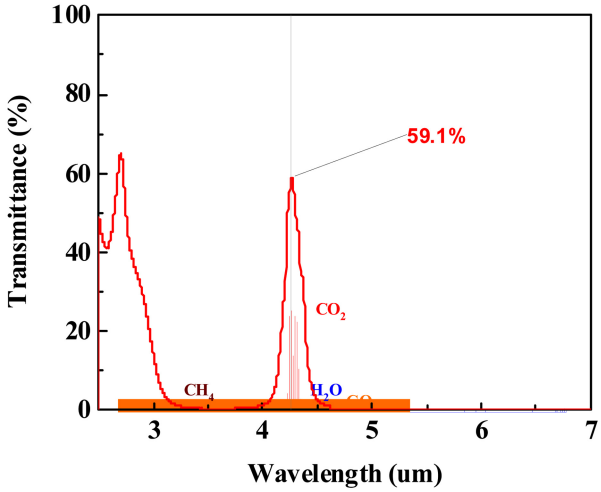


Fig. 5. Filter transmittance result measured by FT-IR and absorption wavelength band of environmental gases.

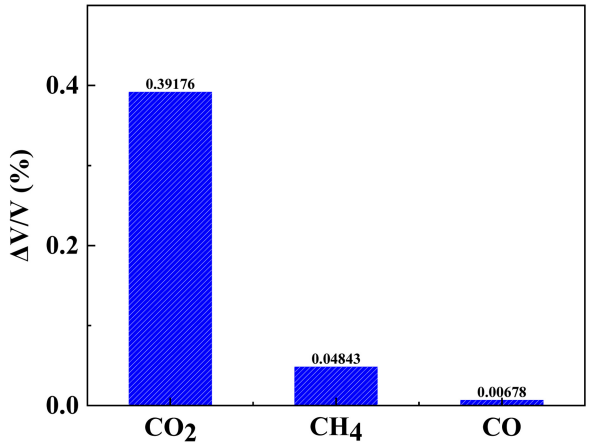


Fig. 7. Selectivity of NDIR sensor with DBR based Fabry-Perot filter.

4.26 μm에서 59.1%의 피크 투과율을 보였으며, 반치전폭이 약 153 nm로 CO_2의 흡수 파장대역을 충분히 포함하면서, 인접 파장대역에서 흡수율을 가지는 CH_4와 CO의 영역을 차단하는 결과를 보였다.

3.2 CO_2 감도 및 선택도 특성

Fig. 2에서 제시한 비분산적외선 CO_2 가스센서 측정 시스템에 완성된 패브리 페로 필터를 장착하여 CO_2 감도 특성을 확인하였다. Fig. 6은 각각 0-10000 ppm에서의 CO_2 감도 특성을 측정한 결과 그래프이다. 입사된 광량의 변화가 없는 N_2 분위기를 기준으로, 농도 증가에 따라 신호가 Beer-lambert의 법칙에 따른 지수적인 감소를 보였다.

Fig. 7은 CH_4와 CO 환경 가스에 대한 선택도를 각각 비교한 결과이다. 제작된 패브리 페로 필터를 사용했을 때, 비분산적외선 가스센서는 CO_2 1000 ppm에 대해 0.392%의 변화율을 보였다. CH_4의 경우 0.048%로 CO_2가스에 비해 88% 낮아졌으며, CO의 경우 0.007%의 변화율로 CO_2가스에 비해 98% 낮아지는 것을 확인하였다. 즉, CO_2의 선택성이 매우 높게 나타났다. 결과를 통해 본 연구에서 제시한 설계 방법으로 비분산적외선 CO_2 센서용 광필터의 제작 가능성을 확인하였다. CH_4와 CO 가스뿐만 아닌 온도 및 습도에 대한 보상회로를 적용함으로써 다양한 분야의 대기질 측정 센서에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

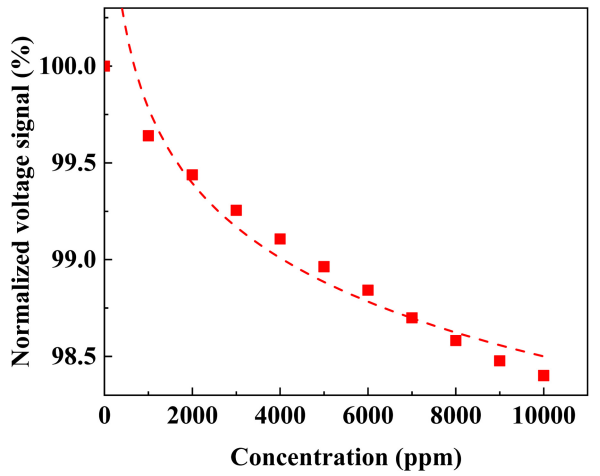


Fig. 6. Sensitivity of NDIR sensor with DBR based Fabry-Perot filter.

4. 결 론

본 논문에서는 Ge/SiO_2를 이용하여 최적화된 DBR기반의 패브리 페로 필터를 설계하여, 기존 상용 제품에 비하여 간단하면서 효과적인 제작 방법을 제시한다. 상·하 DBR의 적층 쌍수 $m = 2$인 Ge/SiO_2 패브리 페로 필터는 4.26 μm에서 59.1%의 피크 투과율과, 158 nm의 반치전폭을 가지는 것을 확인하였다. 또한 비분산적외선 CO_2 측정 시스템에 1인치 사파이어 가판에 제작된 필터를 각각 적용하여 감도 특성과 선택도 특성을 분석하였다. 감도특성의 경우, 0-10000 ppm의 CO_2 농도에서 Beer-lambert 법칙을 만족하는 지수적인 감소를 보였다. 또한 선택도 실험의 경우, 패브리 페로 필터를 사용했을 때, CH_4의 간섭을 약 88% 줄일 수 있었으며 CO는 98%로 높은 선택도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 CO_2가스 농도에 따른 감도와 기타 환경 가스(CH_4, CO)간의 선택도 특성을 통해 비분산적외선 CO_2 센서용 필터 적용 가능성을 입증하였다. 추가적으로 온도 및 습도에 대한 보상회로를 추가함으로써 환경모니터링 시스템, 모바일, 자동차 등 다양한 분야에 접목될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

이 논문은 2020년도 정부(대구시)의 재원으로 대구테크노파크의 지원을 받아 수행된 연구임(202008105).

이 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업의 지원으로 수행한 연구임.

REFERENCES

[1] F. Vega, F. M. Baena-Moreno, L. M. G. Fernández, E. Portillo, B. Navarrete, and Z. Zhang, “Current status of CO2 chemical absorption research applied to CCS: Towards full deployment at industrial scale”, *Appl. Ener*gy, Vol. 260, pp. 114-313, 2020.

[2] 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 2 to hydrocarbons”, *Carbon N. Y*, Vol. 56, pp. 324-331, 2013.

[3] B. Liao, Q. Wei, K. Wang, and Y. Liu, “Study on CuO±BaTiO 3 semiconductor CO 2 sensor”, *Sens. Actuators*, Vol. 80, pp. 208-214, 2001.

[4] M. Febrina, E. Satria, M. Djamal, W. Srigutomo, and M. Liess, “Development of a simple CO2 sensor based on the thermal conductivity detection by a thermopile”, *Meas. J. Int. Meas. Confed*, Vol. 133, pp. 139-144, 2019.

[5] 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. Actuators, B Chem*., Vol. 231, pp. 529-538, 2016.

[6] L. Fleming, D. Gibson, S. Song, C. Li, and S. Reid, “Reducing N2O induced cross-talk in a NDIR CO2 gas sensor for breath analysis using multilayer thin film optical interference coatings”, *Surf. Coat. Technol*., Vol. 336, pp. 9-16, 2018.

[7] R. Frodl and T. Tille, “A High-Precision NDIR CO_2 gas sensor for automotive applications", *IEEE Sens. J.* 6.6, pp. 1697-1705, 2006.

[8] R. Bogue, “Detecting gases with light: A review of optical gas sensor technologies”, *Sens. Rev.*, Vol. 35, pp. 133-140, 2015.

[9] L. Kocsis, P. Herman, and A. Eke, “The modified Beer-Lambert law revisited”, *Phys. Med. Biol*., Vol. 51, pp. N91(1)-N91(51), 2006.

[10] J. Lee and S. H. Lim, “Review on Sensor Technology to Detect Toxic Gases”, *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 5, pp.311-318, 2015.

[11] J. Krüger, M. Lenzner, S. Martin, M. Lenner, C. Spielmann, A. Fiedler, and W. Kautek, “Single-and multi-pulse femtosecond laser ablation of optical filter materials”, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 208, pp.233-237, 2003.

[12] R. L. Gentilman, E. A. Maguire, H. S. Starrett, T. M. Hartnett, and H. P. Kirchner, “Strength and transmittance of sapphire and strengthened sapphire”, *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 64, pp.C-116-C-127, 1981.

[13] N. J. Trappeniers,, R. Vetter, and H. A. R. De Bruin, “The pressure coefficient of the infra-red refractive index of germanium”, *Phys.*, Vol. 45, No. 4, pp.619-625, 1970.

[14] S. J. Jung, B. J. Kim, and M. Shin, “Low-refractive-index and high-transmittance silicon oxide with a mixed phase of n-type microcrystalline silicon as intermediate reflector layers for tandem solar cells”, *Sol. Energy. Mater. Sol. Cells*, Vol. 121, pp.1-7, 2014.

[15] Y. Zou, S. Chakravarty, P. Wray, and R. T. Chen, “Mid-infrared holey and slotted photonic crystal waveguides in silicon-on-sapphire for chemical warfare simulant detection”, *Sens. Actuators B: Chemical*, Vol. 221, pp.1094-1103, 2015.

[16] N. G. Do, J. Lee, D. G. Jung, S. H. Kong, and D. Jung, “Si/SiO 2 Multilayer-based Fabry-Perot Filter for 4.26? Filtering in Carbon Dioxide Detection", *J. Sens. Sci. Technol.,* Vol. 30, No. 1, pp. 56-60, 2021.

[17] N. G. Do, J. Lee, D. G. Jung, S. H. Kong, and D. Jung . “Design and performance study of fabry-perot filter based on DBR for a non-dispersive infrared carbon dioxide sensor”, *J. Sens. Sci. Technol.,* Vol. 30, No. 4, pp. 250-254, 2021.

[18] M. Cho, J. H. Seo, D. Zhao, J. Lee, K. Xiong, X. Yin, Y. Liu, S. C. Liu, M. Kim, T. J. Kim, X. Wang, W. Zhou, and Z. Ma,“Amorphous Si/SiO 2 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, pp. 040601(1)-040601(34), 2016.