

다중가스 검출을 위한 FPI 어레이 기반 적외선 마이크로스펙트럼미터

강현오, 짜오찌구오, 이준규, 정호, 김학린, 공성호
 경북대학교 전자전기컴퓨터학부*

FPI Array-Based Infrared Micro-Spectrometer for Multi-Gases Detection

Hyun Oh Kang, Zhao Zhiguo, June Kyoo Lee, Ho Jung, Hak-Rin Kim, Seong Ho Kong
 School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University

Abstract - 제안된 Fabry-Perot Interferometer (FPI) 어레이 기반 IR 스펙트럼미터는 상층부에 FPI 어레이와 하단에 V₂O₅ 볼로미터 IR 적외선 센서 어레이로 크게 두 부분으로 구성된다. 이 구조에서 다양한 FPI 공진 캐비티의 두께에 의해 특정 공진 파장이 선택되어 진다. 그리고 각각의 볼로미터 IR 디텍터는 IR 파장에 상응하는 투과도를 감지해낸다. 다양한 박막 필터 시뮬레이션 결과를 통해 제작된 FPI 어레이 기반 IR 스펙트럼미터는 3~5 μm의 적외선 파장대역에서 흡수 스펙트럼을 가지는 CH₄, CO₂, N₂O, CO 가스 검출을 위해 다층 박막 FPI 층의 다층 박막 FPI 층의 투과율을 높였다.

1. 서 론

기존의 가스 흡·탈착식 가스센서는 단일 가스 분자와 반도체 물질접촉에 의한 표면 화학반응의 결과 발생하는 전기전도도의 변화를 검출하는 방식으로 특정 가스에 대한 선택도는 좋으나 다중 가스를 하나의 칩으로 동시에 검출해 내기에는 한계가 있다. 이에 본 논문에서는 다중가스를 단일 칩으로 동시에 검출하기 위해 시뮬레이션 결과를 토대로 특정 파장 성분만 투과 할 수 있도록 FPI를 설계하고 MEMS 기술을 기반으로 제작하였으며 이러한 필터를 거친 특정 적외선 파장성분을 검출할 수 있는 볼로미터형의 적외선 감지소자를 제작하여 다양한 종류의 가스를 선택적으로 측정할 수 있는 스펙트럼미터형의 일체화된 가스센서에 대해 연구하였다.

2. 본 론

2.1 기체 분자의 Fingerprint를 이용한 가스 검출

대기 중의 질소와 산소를 제외한 대부분의 가스들은 제각기 독특한 적외선 흡수대역을 갖는다. 모든 물질은 그들 고유의 진동에너지로 가지고 있으며, 이러한 에너지는 양자화 되어있다. 기체분자들은 더 높은 진동상태로 여기할 때, 자기 진동에너지 양자에 해당하는 에너지만을 선택적으로 흡수하게 되는데 기체를 통과하는 빛의 에너지 중 적외선 영역의 에너지가 진동에너지로 흡수된다. 그리고 기체분자들이 빛을 흡수하는 정도는 그 농도에 따라 달라진다. CO 는 4.6μm와 4.8μm에서, CO₂ 는 4.25μm에서 가장 크게 흡수된다. 그밖에 CH₄, N₂O 등 화제시 발생하는 유독가스의 대부분은 3~5μm의 적외선 영역에서 수많은 흡수 스펙트럼을 나타내며, 이는 일종의 기체 분자들의 fingerprint라 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 기체 분자들의 광흡수특성을 적외선을 이용한 가스센서에 응용 하였다.

2.1.1 다중 가스 측정에 특성화된 Fabry-Perot 광학 필터 설계

본 논문에서 설계된 Fabry-Perot 다중 간섭계 필터는 두 개의 평행미러(mirror)와 두 미러 사이의 공진 캐비티(resonance cavity)로 구성된다. 미러 물질로는 Ag를 증착하고 공진 캐비티 층으로는 SiO₂를 각기 다른 두께로 제작하여 투과파장을 변화시킨다. FP 간섭계의 상부 박막을 통해 입사된 특정 적외선 파장은 필터 내부 캐비티 층에서 공진하여 하부 박막을 투과한다[1]. 투과한 빛의 파장(λ)과 경로 차이의 관계는 아래식으로 나타 낼 수 있다.

$$m\lambda = 2\mu d \cos\theta \quad (1)$$

식(1)에서, m은 간섭차수(order of interference)이고, μ는 두 미러 사이에 위치한 캐비티 물질의 굴절지수(refraction index)이고, d는 두 미러 간의 간격, θ는 입사각이다[2].

광학 박막 설계 소프트웨어인 Essential Macleod를 이용하여 박막층의 두께를 최적화 할 수 있도록 광학 필터를 시뮬레이션 하였다. FP 필터는 공진 캐비티 물질인 SiO₂와 적외선 파장대역에서 높은 반사율을 보이는 Ag를 이용하여 20~30%의 투과율을 갖는 5층 구조의 필터를

디자인 하였다[3]. Ag 층은 동일한 두께를 가지고, Ag 층 사이에 SiO₂의 두께를 가변시켜 공진 파장을 조절하였다. FPI 필터 어레이의 공진 캐비티 및 미러의 두께는 표 1 에 나타내었다.

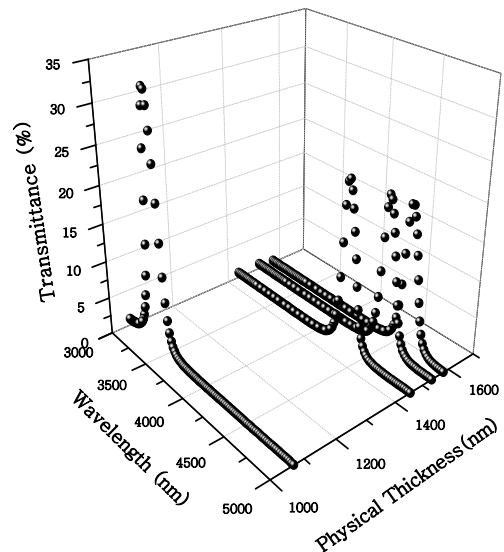
〈표 1〉 다층 박막 FPI 필터 디자인

Layer	Material	Physical Thickness(nm)
Medium	Air	-
1	Ag	5
2	SiO ₂	Table 2
3	Ag	18
4	SiO ₂	Table 2
5	Ag	5
Substrate	Si(Crystal)	-

표 2 에서 볼 수 있듯이 SiO₂ 두께가 증가하면 이에 비례하여 투과 파장이 증가하는 방향으로 쉬프트(shift) 하는 경향을 보인다. 이를 이용하여 타겟 가스(target gas)인 CH₄, CO₂, N₂O, CO의 fingerprint에 해당하는 3.3μm, 4.3μm, 4.5μm, 4.6μm에서 피크 파장을 지니는 필터를 디자인 하였다. 그림 1 은 다중 가스 측정을 위한 SiO₂ 중간층의 두께에 따른 최대 피크 파장 이동 및 투과율의 변화를 나타낸다.

〈표 2〉 다중 가스 측정을 위한 SiO₂ 중간 층 두께에 따른 최대 피크 파장 시뮬레이션

Physical Thickness(nm)	Peak Wavelength(nm)	Target Gas
1070 Å	3300	CH ₄
1455 Å	4300	CO ₂
1535 Å	4500	N ₂ O
1580 Å	4600	CO



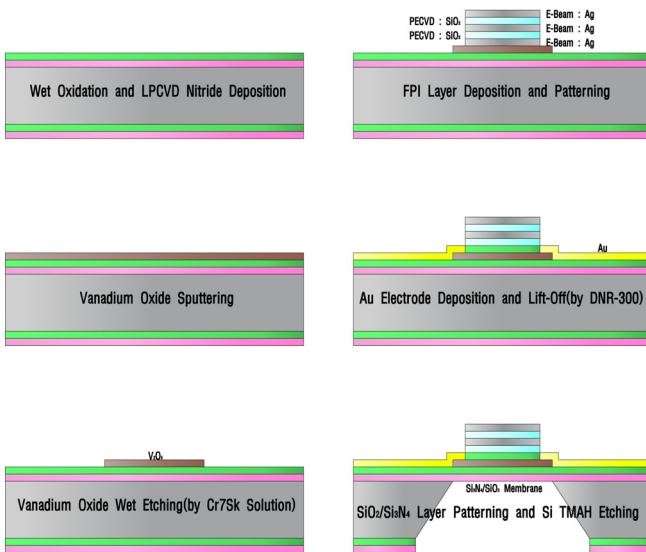
〈그림 1〉 SiO₂ 층 두께 따른 최대 피크 파장 이동

2.2 MEMS 기술 기반 적외선 감지기

적외선 감지기는 V_2O_5 센싱막을 이용하여 볼로미터형으로 제작하였으며, 열손실에 의한 특성 저하를 방지하기 위하여 SiO_2/Si_3N_4 의 박막 맵브레인 구조물 위에 센싱막이 올려져 있는 형태이다. 적외선을 이용한 고감도 가스센서의 제작에 있어서 우수한 열저항 물질의 선택과 주위 감열로부터의 디텍터 보호는 중요한 연구 과제이며, 본 논문에서는 가장 특성을 극대화 할 수 있는 맵브레인 구조를 제안하였다. 벌크 마이크로 머시닝 기술을 이용하여 TMAH 식각용액으로 Si 기판의 뒷부분을 520 μm 깊이까지 이방성 식각하여 맵브레인을 형성, 구조를 최적화하여 적외선 볼로미터를 구현하였다.

2.2.1 볼로미터 적외선 감지 디텍터 제작

그림 2 는 IR 디텍터의 제작을 위한 공정도이다. 먼저 (100) p-type Si에 맵브레인 및 실리콘의 에칭 마스크로 사용하기 위해 SiO_2 및 Si_3N_4 박막을 각각 3000Å, 2000Å씩 성장시킨다. 습식산화법을 이용하여 1100 °C에서 수소와 산소 분위기에서 SiO_2 층을 형성시킨 후 LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 785 °C의 온도, 250 mTorr의 압력에서 SiH_2Cl_2 (DCS)와 NH_3 가스를 주입하여 Si_3N_4 층을 증착시켰다.



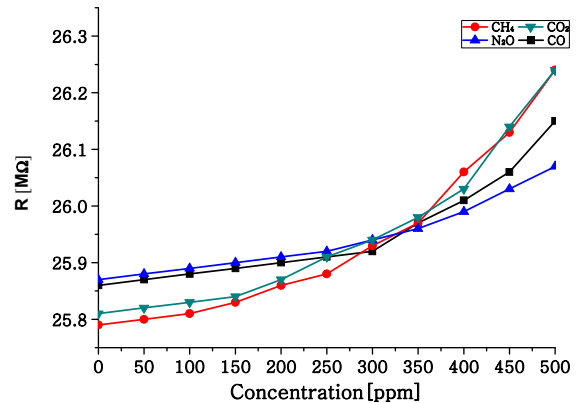
〈그림 2〉 볼로미터 적외선 마이크로스펙트로미터 공정도

V_2O_5 막은 RF magnetron 스퍼터링 시스템을 사용하여 증착하였다. 4 inch 99.9% 순도를 갖는 바나듐옥사이드(V_2O_5)타겟을 사용하였으며, 증착 시 기판과 타겟의 거리는 90mm로 유지하고 5.0×10^{-6} Torr의 초기진공을 잡은 상태에서 RF power는 300 W를 유지하였다. 30분 동안 약 500 Å의 두께로 막을 성장시켰으며, 적외선 감지막의 전기적인 특성을 측정하기 위하여 실리콘웨이퍼 위에 선공정을 한 SiO_2/Si_3N_4 층 위에 바나듐옥사이드를 증착한 후 단위 소자를 만들었다.

V_2O_5 막을 올린 후, 마스크를 통해 PR 패터닝을 하고, Cr7SK 용액을 이용하여 감지막을 식각하였다. 전기적 특성 측정을 위한 V_2O_5 detector 양단의 금속 전극은 금(Au)을 이용한 lift-off 방식으로 제작하였다. DNR300 PR를 사용하여 패터를 형성하고, 점착성 향상을 위해 adhesion layer 로 Ti를 100Å 두께로 먼저 증착한 뒤 Au를 E-beam evaporator 로 1000Å의 두께로 증착하였다. Wafer뒷면의 Si 기판을 이방성 식각하기 위한 SiO_2 , Si_3N_4 패턴 형성을 위해 먼저 마스크로 AZ1512 PR를 사용하여 패터닝 한 후 Wafer 뒷면의 에칭 마스크인 SiO_2 , Si_3N_4 를 RIE (Reactive Ion Etching) 공정으로 선택적으로 식각하였다. RIE 공정은 초기 진공을 10 mTorr로 잡고 MFC를 이용하여 20 sccm의 SF_6 에칭 가스를 지속적으로 주입시켜 100 mTorr의 공정 진공도에서 30분간 안정화시켰다. 챔버가 안정화된 상태에서 40W의 RF Power를 인가하여 플라즈마 상태로 만들어주고 15분 간 에칭 공정을 진행하였다. 마지막 공정으로 V_2O_5 detector가 실리콘 기판으로부터의 열전도에 의한 열손실을 최소화하기 위해 85°C의 온도에서 25%의 TMAH용액으로 뒷면 Si를 약 520 μm 깊이까지 이방성 식각하여 맵브레인을 형성하였다(85°C에서 25% 농도의 TMAH를 교반하면서 실리콘을 식각했을 때 분당 0.4 μm 의 속도로 식각되는 것을 관찰할 수 있었다). 제작된 소자는 PCB에 Si Paste를 이용하여 고정시키고, Al Wire Bonder를 이용하여 소자의 본딩패드 부분과 PCB를 전기적으로 연결하였다.

2.3 FP형 가스센서를 이용한 가스측정

제작된 볼로미터형 적외선 마이크로스펙트로미터를 이용하여 CH_4 , CO_2 , N_2O , CO 가스를 측정하여 보았다. 가스챔버 안에 소자를 넣고 광원과 초점렌즈를 일직선 상에 놓는다. 그리고 MFC를 이용하여 1000 ppm의 타겟가스와 캐리어 가스인 N_2 의 혼합비를 조절하여 타겟가스 농도를 변화시켜가며 바나듐옥사이드의 저항변화율을 관찰하였다. 0~500 ppm일 때의 바나듐옥사이드 감지막의 저항 변화율을 측정된 결과 CH_4 가스의 경우 약 400KΩ~450KΩ, CO_2 가스의 경우 약 400~450 KΩ, N_2O 가스의 경우 약 200~250 KΩ, CO 가스의 경우 약 250~300 KΩ의 변화율을 보였다. 적외선 흡수율이 큰 CH_4 , CO_2 가스는 동일 농도 범위에서 N_2O , CO 가스 보다 상대적으로 큰 저항 변화율을 가졌다. 바나듐옥사이드 감지막의 저항 변화율이 큰 경우 외부 온도에 의한 간섭을 많이 받았으며, 이를 보완하기 위해서는 바나듐옥사이드 감지막 패턴 형태의 최적화 과정이 필요하다. 그림 3 는 CH_4 , CO_2 , N_2O , CO 가스농도에 따른 바나듐옥사이드 감지막의 저항변화를 보여준다.



〈그림 3〉 CH_4 , CO_2 , N_2O , CO 가스농도에 따른 바나듐옥사이드 감지막의 저항변화

3. 결 론

FPI 어레이 기반 적외선 마이크로스펙트로 형태의 가스 센서를 설계하였고 이후 개로 구성된 각각의 FPI 필터부의 SiO_2 층 두께를 적절히 조절함으로써 원하는 파장을 선택적으로 필터링될 수 있도록 제작하였다. 시뮬레이션된 적외선 파장영역은 3~5 μm 대역에서 3.3 μm , 4.3 μm , 4.5 μm , 4.6 μm 로 이는 대기중의 CH_4 , CO_2 , N_2O , CO 가스의 적외선 흡수율이 가장 높은 파장영역이다. 이를 검출하기 위해 검출부를 다채널로 형성하여 가스의 종류 및 농도를 실시간으로 분석할 수 있다. MEMS 기술을 이용하여 기존의 상용화된 비분산 적외선 센서보다 소형화된 다채널 패브리-페로 간섭계를 이용한 스펙트로미터를 제작함으로써, 초소형 적외선 기반 비접촉식 범용 적외선 스펙트로미터의 제작 기반을 마련하였고, 대기환경, 식품, 자동차, 바이오 등 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 기대된다. 또한 고정형 패브리-페로 스펙트로미터에서 벗어나 단일소자에서 공진 캐비티 층의 두께를 조절할 수 있도록 제작한다면, 단일 소자안에서 수많은 물질을 검출할 수 있을 것이다.

4. 감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단 및 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

[참 고 문 헌]

- [1] Peter Hauptmann, "Sensors Principles and Applications", PrenticeHall, pp. 93-105, 1993.
- [2] Eugene Hecht, "OPTICS 4th edition", Addison Wesley Longman, pp. 496-504, 2002.
- [3] A.R. Emadi, J.H. Correia, G. de Graaf and R.F. Wolffenbuttel, "Silicon Compatible Fabry-Perot Optical Filter for mid-IR Microspectrometer Applications", Eurosensors, pp. 1-4, 2006
- [4] Jose Higinio, G. Correia, "Optical Microsystems in Silicon Based on a Fabry-Perot Resonance Cavity", pp. 54-63, 1999.
- [5] H Angus Macleod "THIN-FILM OPTICAL FILTERS", pp. 179-185, 2001.