

마이크로 볼로미터를 이용한 집적화된  
이산화탄소 센서시스템

연세대학교 대학원

의 공 학 과

김 신 근

마이크로 볼로미터를 이용한 집적화된  
이산화탄소 센서시스템

지도교수 김 범 민 · 문 성 욱

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2004년 12월 일

연세대학교 대학원

의 공 학 과

김 신 근

# 김신근의 석사 학위논문을 인준함

심사위원 \_\_\_\_\_ 인

심사위원 \_\_\_\_\_ 인

심사위원 \_\_\_\_\_ 인

연세대학교 대학원

2004년 12월 일

## 감사의 글

오늘의 이 논문을 쓰기까지 도움을 주신 많은 분들이 있었기에 부족하나마 학위과정을 마무리할 수 있었습니다. 모두 일일이 찾아뵙고 감사의 말씀을 드리지 못함을 죄송스럽게 생각합니다.

먼저 학교 연구실에서 함께 한 시간은 부족했지만 인생의 선배로서 언제나 좋은 말씀과 격려로 저를 여기까지 이끌어주신 김법민 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 중에도 논문 심사와 조언을 해주신 조효성 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 오늘의 저를 있게 한 연세대학교 의공학부를 위해 언제나 노력하시는 윤형로 교수님, 이윤선 교수님, 이경중 교수님, 김동윤 교수님, 윤영로 교수님, 김영호 교수님, 신태민 교수님, 김한성 교수님, 김정환 교수님께 다시 한번 깊이 감사드립니다.

저의 석사생활 대부분을 보낸 KIST의 많은 분들에게도 감사의 말씀을 드립니다. 바쁘신 와중에도 항상 지켜봐 주시고 논문 및 연구내용에 대한 조언을 아끼지 않으셨던 문성욱 박사님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 늘 조용히, 그러나 풍부한 지식으로 많은 가르침을 주셨던 신현준 박사님께도 감사드립니다. optical MEMS lab. 식구들에게 감사의 말씀을 전합니다. 블로미터 팀에서 항상 함께 하며 정을 쌓은 용희형, 지금은 박사님이 된 근태형, 먼 나라 베트남에서 왔지만 너무나도 한국사람같은 Chi Anh, 연구실의 꽃으로 언제나 환하게 웃으면서 열심히 미숙이에게 감사드립니다. 너무나도 배울 점이 많은 승훈형, 형님으로 모시고 있는 대석형, 그 누구보다 끈끈한 우정을 나눈 동기 준혁, 사랑스런 후배 형원, 철우, 진혁, 준범, 광호 그리고 일진에게도 감사의 말을 전합니다. 지금은 KIST에 없지만 많은 도움을 준 재성형, 준섭형, 종연형, 광민형, 태엽에게도 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 2년동안 같이 생활하면서 많은 도움을 주신 같은 센타 식구인 강지윤 박사님, 승민형, 한상형, 기운형, 정훈형, 형준형, 기용형, 승래, 교선 그리고 센터의 모든 곳은 일을 맡아하시는 어머니 같은 미옥 누님에게도 감사드리며 특히 거의 1년 내내 살다시피 했던 Fab.에서 많은 도움을 주신 관리팀의 변호민 팀장,

길선, 재순씨에게 감사의 말을 전합니다.

학교에서 많은 시간을 보내진 못했지만 오늘의 제가 있기까지 많은 도움을 주신 분들이 계십니다. 우선 의광학 연구실 모든 분들에게 다시 한번 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 짧은 시간이었지만 항상 웃음으로 대해주셨던 오정택 박사님, 형처럼 따뜻하게 대해주신 임강빈 박사님, 진정한 공학도의 모습을 보여주신 현이형, 박사과정을 열심히 하고 있는 상원이, 멀리 떨어져 있지만 항상 저를 챙겨 주었던 동기인 상륜, 용희, 화준에게 감사의 말을 전합니다. 특히 KIST에서의 생활을 무사히 마칠 수 있도록 많은 도움을 준 친구 수민에게 깊은 감사를 드립니다.

항상 저를 위해 기도해주시고 격려해 주시는 가족이 있기에 이 모든 일들을 무사히 마칠 수 있었다고 생각합니다. 언제나 하루를 교회에서 새벽기도로서 가족의 무사안위를 걱정하시는 아버지, 어머니께 너무나도 감사드리고 사랑한다고 말씀드리고 싶습니다. 자기 미래를 개척하고 있는 너무나도 믿음직한 동생 현근과 제수씨가 될 수경에게도 감사드립니다.

마지막으로 어려운 가운데 있지만 항상 나를 위해 기도하고 사랑해 주는 내 인생의 동반자가 될 그녀에게 감사의 말을 전하며 사랑한다고 말하고 싶습니다.

이 모든 일들을 주관하신 주님께 모든 영광을 돌립니다.

2004년 12월 지난 2년을 돌이켜보며.....

# 차 례

List of Figures	iii
List of Tables	iv
국문 요약	v
제 1 장 서론	1
제 1.1 절 연구의 배경	1
제 1.2 절 연구의 목적과 독창성	7
제 2 장 적외선을 이용한 CO <sub>2</sub> 감지	9
제 2.1 절 적외선 가스 센서	9
2.1.1 적외선 가스 센서의 원리	9
2.1.2 비어-람베르트 법칙	11
2.1.3 비분산식 CO <sub>2</sub> 센서의 종류	12
제 2.2 절 절 마이크로볼로미터의 원리	14
2.2.1 마이크로볼로미터의 이론적 배경	14
2.2.2 마이크로볼로미터의 성능지수	16
가. TCR	16
나. 응답도	16
다. 잡음특성	19
라. 감지도	20
제 2.3 절 절 CO <sub>2</sub> 감지용 적외선 기준필터	22
제 3 장 CO <sub>2</sub> 감지용 마이크로 볼로미터 제작	24
제 3.1 절 절 MEMS 기술의 마이크로볼로미터 제작 응용	24

제 3.2 절 열적 고립을 위한 뜬 구조위에 형성된 $\lambda/4$ 공진 흡수 구조	26
제 3.3 절 실리콘 표면미세가공 기술을 이용한 마이크로볼로미터 제작	28
<b>제 4 장 기준신호를 제공하는 CO<sub>2</sub> 필터 칩</b>	<b>34</b>
제 4.1 절 CO <sub>2</sub> 필터 칩의 유용성	34
제 4.2 절 Antireflective coating	36
제 4.3 절 실리콘 몸체미세가공 기술을 이용한 CO <sub>2</sub> 필터 칩 제작	39
제 4.4 절 CO <sub>2</sub> 필터 칩의 특성 평가	42
<b>제 5 장 마이크로볼로미터의 특성 평가</b>	<b>45</b>
제 5.1 절 마이크로볼로미터 특성 측정용 시스템 구성	45
제 5.2 절 CO <sub>2</sub> 감지용 마이크로볼로미터의 적외선 감지 특성 평가	48
5.2.1 열전도도 측정	48
5.2.2 잡음전압 및 신호전압 측정	51
5.2.3 특성 평가를 위한 적외선 광량 계산	52
5.2.4 마이크로볼로미터의 적외선 감지 특성	54
<b>제 6 장 CO<sub>2</sub> 측정 센서 시스템</b>	<b>58</b>
제 6.1 절 MEMS 기술을 이용한 집적화된 CO <sub>2</sub> 센서 시스템의 유용성	58
제 6.2 절 센서 시스템 구성 및 특성 평가	60
<b>제 7 장 결 론</b>	<b>63</b>
<b>참 고 문 헌</b>	<b>65</b>
<b>Abstract</b>	<b>69</b>

## List of Figures

Fig 1.1 Schematic drawings of NDIR(Nondispersive Infrared) gas sensor

Fig 1.2 Examples of Infrared gas detector types

(a) Thermoelectric detector (b) Pyroelectric detector

(c) Luft detector (d) Photoacoustic detector

Fig 2.1 Principle of the IR Carbon dioxide detection

Fig 2.2 Infrared absorption characteristic of carbon dioxide

Fig 2.3 NDIR CO<sub>2</sub> sensor

(a) two source method for reference signal

(b) two bandpass filter method for reference signal

Fig 2.4 Related spectral radiance energy as a function of wavelength

Fig 2.5 Principle mechanism of the microbolometer

Fig 3.1 MEMS technology

Fig 3.2  $\lambda/4$  structure of CO<sub>2</sub> detecting microbolometer

Fig 3.3 Schematic of microbolometer fabrication process

Fig 3.4 temperature by annealing time vs resistance in  $V_{0.97}W_{0.03}$

Fig 3.5 SEM image of the fabricated microbolometer

Fig 4.1 Schematic of a proposed CO<sub>2</sub> sensor and signal change on each unit

Fig 4.2 The calculated transmission rates through a 500  $\mu\text{m}$  thick silicon wafer coated with different thickness of SiNx, at the wavelength  $\lambda=4.26 \mu\text{m}$

Fig 4.3 The calculated transmission rates vs wavelength through a 500  $\mu\text{m}$  thick silicon wafer coated with different thickness of SiNx

Fig 4.4 CO<sub>2</sub> filter chip fabrication process

Fig 4.5 Schematic of CO<sub>2</sub> filter chip

Fig 4.6 Optical image of CO<sub>2</sub> filter chip

Fig 4.7 Transmission vs Wavelength using FTIR spectrometer

(a) 1 layer (b) 4 layers

Fig 4.8 Transmission vs Wavelength using FTIR spectrometer

(a) 0.5 bar (b) 1 bar

Fig 5.1 Schematic diagram of vacuum package for IR measurement

Fig 5.2 Optical image of the vacuum package

Fig 5.3 Measurement system for measuring IR detecting characteristics

Fig 5.4 Temperature vs Resistance of fabricated microbolometer

Fig 5.5 Thermal Conductance measurement

(a) in air (b) in vacuum (below 5 mTorr)

Fig 5.6 Noise characteristics as a function of the modulation frequency

Fig 5.7 Responsivity characteristics as a function of the modulation frequency

Fig 5.8 Detectivity characteristics as a function of the modulation frequency

Fig 5.9 Detectivity characteristics as a function of bias current

Fig 6.1 Schematic diagram of capnograph sensor unit placed outside the patient airway

Fig 6.2 The infrared sensor system for measurement of CO<sub>2</sub> concentration

Fig 6.3 Schematic diagram of measurement system for CO<sub>2</sub> concentration measurement

Fig 6.4 Optical image of measurement system for CO<sub>2</sub> concentration measurement

Fig 6.5 Transmittance vs CO<sub>2</sub> concentration

## List of Tables

Table 5.1 Measurement parameters

Table 5.2 Comparisons of characteristics of various bolometers

## 국 문 요 약

### 마이크로볼로미터를 이용한 집적화된 이산화탄소 센서시스템

본 논문에서는 MEMS 기반의 적외선 감지소자를 이용한 CO<sub>2</sub> 센서시스템을 제작하고 특성을 평가하였다.

MEMS 기술로 제작된 비분산식 CO<sub>2</sub> 센서는 단일 칩으로 제작이 가능하고 다른 가스에 의한 간섭이 없으며 저전력 소비, 소형화 등의 장점을 가진다. 본 논문에서는 실리콘 표면미세가공 기술을 이용하여 신뢰성 높은 마이크로볼로미터를 감지기로서 제작하였고 정확한 기준 신호를 제공하기 위해 실리콘 몸체미세가공 기술을 이용하여 CO<sub>2</sub> 필터 칩을 제작하고 이를 MEMS CO<sub>2</sub> 센서에 응용하였다.

이는 기존의 비분산식 적외선 CO<sub>2</sub> 센서보다 정확성과 신뢰성을 높인 CO<sub>2</sub> 측정의 가능성을 제시한다.

---

핵심되는 말 : 적외선, 비분산식, 이산화탄소 센서, 실리콘 표면미세가공 기술, 마이크로볼로미터, 실리콘 몸체미세가공 기술, 이산화탄소 필터 칩, 맴스(MEMS) 이산화탄소 센서

# 제 1 장 서 론

## 제 1.1 절 연구의 배경

지난 수십 년 동안 가스를 감지하는 것은 사람에게 위험하거나 제품가격에 민감하지 않은 산업 안전 분야나 제조공정 분야에서만 이용되었다. 최근 들어 가스 감지는 집안에서의 안전을 위한 일산화탄소 감지나 빌딩에서의 환기 조절에 이용되는 이산화탄소 감지와 같이 일상적으로 생활하는 곳이나 상업적인 용도에서 널리 이용되고 있다<sup>[1][2]</sup>. 이것은 바로 가스 센서를 제작하는 사람에게 신뢰할 수 있으면서 동시에 가격 면에서도 저렴하게 가스 센서를 개발해야 하는 이유를 말해준다. 여기서 말하는 신뢰성이란 긴 수명, 반응성(sensitivity), 선택성(selectivity), 온도에 대한 안정성 그리고 가스 측정 주기를 줄이는 것 등을 말한다.

가스측정 기술은 광산에서 카나리아를 이용한 것에서 시작한다. 카나리아의 빠른 신진대사는 광산에서 일하는 광부들이 유해가스에 노출되었을 때 광부들보다 더 빠르게 유해가스에 의한 나쁜 상태를 보여주었다. 따라서 광부들은 카나리아의 상태를 관찰함으로써 유해가스의 존재여부를 미리 알게 되었다. 가스 감지는 전기 화학적(electrochemical) 감지, 촉매(catalytic pellistors), 반도체, 적외선을 이용한 감지와 같은 기술로 서서히 발전하였다<sup>[3-6]</sup>. 지난 수십 년 동안 개발되어온 대부분의 센서 기술들은 '반응성(reactive)' 센서로서 분석대상 가스는 가스 농도에 비례하는 전기적 신호를 제공하는 센서부에 화학적으로 상호 작용한다<sup>[7]</sup>. 그러나 반응성 센서는 본래 가진 단점으로 아래와 같은 문제를 가지고 있다.

- 1) 반응 마지막에서 화학적 반응의 불안정한 가역성(reversibility)
- 2) 시간에 따른 센서부에서의 화학물질 소모
- 3) 원하는 분석대상물의 특이성(specificity) 부족
- 4) 다른 환경 요소에 의한 간섭

예를 들어, 탄화수소(hydrocarbon)감지에 사용되는 촉매 센서는 여러 유기물 가스에 의한 촉매 성질의 상실로 민감도가 감소한다. 또 다른 단점중의 하나는 너무 빨리 민감도가 감소한 반응성 센서가 측정대상 가스에 노출되었을 때 실시 가능성(operability)을 체크할 수 없다는 것이다. 그러므로 이런 타입의 센서는 불안정한 상태에서는 사용하기 어렵다.

최근 들어 비반응성(non reactive)인 적외선을 이용한 감지기술은 가스 감지에서 그 사용이 증가하고 있다<sup>[8-10]</sup>. 측정하고자 하는 가스들을 정확하게 확인하고 신뢰할 수 있는 농도 측정을 오랜 시간동안 감지할 수 있는 이 기술은 전에는 고가의 장비에서만 사용되었다. 이런 이유로 제품가격에 민감한 분야에서는 사용되지 않았다. 그러나 최근의 센서 설계에서 비약적인 발전을 이루어 이 기술을 모든 분야에서 적용이 가능하게 되었다. 적외선을 이용한 장치들의 주요 장점은 감지기가 측정대상 가스와 직접 영향을 끼치지 않는다는 점이다. 즉, 가스 분자들은 단지 빛에 의해서만 상호 영향을 미치는데 이는 가스 샘플 셀(gas sample cell)과 이와 관련된 부품만이 측정하고자 하는 가스에 직접 노출된다. 이런 부품들은 부식성이 강한 가스에 대해 부식을 막기 위한 처리를 해야 하고 유지 보수 시에 쉽게 제거되도록 설계되어야 한다.

적외선은 전자기적 방사 스펙트럼(electromagnetic radiation spectrum)의 한 부분으로 파형을 가지는데  $0.8\mu\text{m}$ 에서  $100\mu\text{m}$ 까지의 파장 범위를 갖는다<sup>[11]</sup>. 가스 분자들은 상호 결합된 원자들로 구성되고 이런 결합들은 항상 진동(vibration)과 회전(radiation)을 수행하는데 이런 진동운동과 회전운동의 주파수들은 원자들의 크기와 결합 힘이 크게 작용하는 함수관계를 갖는다. 본래 이런 함수관계를 갖는 주파수들은 적외선 스펙트럼의 중간 부분(mid IR)의 주파수이다. 적외선을 방사하는 빔이 가스를 통과할 때, 대부분의 가스 분자들은 그들 고유의 진동/회전 주파수에서 방사된 적외선을 흡수한다. 이것은 각각의 가스가 이루고 있는 고유의 구조가 적외선 장비로 가스를 구별하는데 사용되는 유일한 지문(fingerprint)으로 사용될 수 있음을 의미한다. 따라서 적외선 센서는 매우 선택성(selective)이 좋으며 수 ppm(parts per million) 레벨에서 100%의 농도까지 넓은 범위의 반응성

(sensitivity)를 제공한다<sup>[12]</sup>.

적외선을 이용한 가스 감지 방법은 크게 분산식(dispersive)과 비분산식(nondispersive)으로 나눌 수 있다. 분산식 적외선 감지 방법은 화학 화합물들의 정성분석을 할 때 주로 사용하는 방법으로 적외선 광원을 포함하여 다양한 파장을 분석하기 위한 슬릿 선택기(slit selector)와 광학거울, 프리즘, 격자가 들어있는 가스 샘플 셀(sample cell) 그리고 감지기(detector), 전자 증폭기 등으로 구성된다. 적외선을 화학 화합물에 주사(scanning)하면서 시간에 따라 파장을 변화시키면 화합물의 흡수띠와 파장에 대한 곡선을 얻을 수 있다. 이때 적외선에서 반응을 보이는 가스는 ‘지문’처럼 그 화합물만의 독특한 적외선 스펙트럼을 얻을 수 있어 정성적인 확인을 하는데 주로 사용한다. 이 기술을 사용하는 장비들은 대부분 고정식으로 되어 있고 크기도 커 가정용이나 상업용으로 사용하기 힘들다는 단점이 있다<sup>[13]</sup>.



Fig 1.1 Schematic drawings of NDIR(Nondispersive Infrared) gas sensor

환경, 안전, 의료분야 등에서 한가지만의 특정 화합물 농도를 측정하기 위해 사용하는 비분산식 적외선 감지 방법은 적외선을 분산시키기 위해 프리즘이나 격자가 필요하지 않다. Fig 1.1과 같이 비분산식 적외선 가스 센서는 측정대상 가스에 의해 흡수되는 파장을 포함한 넓은 파장대의 적외선을 방사하는 광원과 가스 샘플 셀 그리고 적외선 감지기로 구성된다. 비분산식(NDIR) 센서에서 적외선 광원과 적외선 감지기는 가스 샘플 셀에 의해 나누어진다. 대역필터는 대상 가스에 의해 흡수되는 파장을 제외한 모든 적외선을 차단하기 위해 광원 앞이나 감지기 앞에 위치한다. 감지기에서의 출력 값은 흡수에 의한 것으로 이는 가스 샘플 셀

내에 측정대상 가스의 유무에 따라 감지기에 도달하는 적외선의 손실 정도의 비율을 측정하므로 정량적인 분석이 가능하다. 따라서 이 방법은 구성장치가 간단하여 작고 휴대가 간편하며 한 번에 한가지의 가스 농도만을 측정 할 수 있다는 장점이 있어 활발한 연구가 진행 중이다<sup>[14][15]</sup>.

가스 농도를 감지하는 적외선 감지기는 감지하는 방식에 따라 저항형 볼로미터(resistive bolometry), 열전대형 감지기(thermoelectric bolometry), 초전형 감지기(pyroelectric bolometry), 광자 감지기(photon detector), 루프트 감지기(luft detector), 광음향식 감지기(photoacoustic detector)등이 있다.

저항형 볼로미터는 적외선이 감지 소자에 입사 시 발생하는 소자의 온도변화에 따른 저항변화를 측정하는 원리로서 미세가공(micromachining)기술을 이용하여 열적 고립 구조를 제작하고 그 위에 온도 변화에 따라 저항이 변화하는 박막 저항체를 형성하는 방법으로 제작한다. 볼로미터는 다른 적외선 감지기와 비교하여 초퍼(chopper)가 필요 없으며 적외선 감지도(detectivity) 및 응답도(responsivity)가 비교적 우수하고 monolithic한 제작 공정에 의해 구현 가능한 장점이 있어 냉각형 적외선 감지 소자의 대표적 응용 예로 활발하게 연구되고 있다<sup>[16-18]</sup>.

열전대형 감지기는 Fig 1.2 (a)와 같이 서로 다른 종류의 금속 접합면에 열을 가하면 전위차가 발생하는데 온도에 직접적으로 비례하는 Seebeck현상을 이용한 소자로 이런 접합면은 반응도를 개선하기 위해 여러 개의 접합면으로 만들어지고 이것을 "thermopile"이라고 한다. 반도체 기술을 이용하여 많은 접합면으로 출력값을 증가시키기 위해 여러 개를 연결하지만 아직까지 감지기 패키지는 최소화되고 경량화 되는데 한계가 있다. 이런 감지기는 상대적으로 낮은 응답시간을 갖지만 DC 안정성과 바이어스가 필요 없으며 모든 파장에서 반응한다는 장점이 있다. 이것은 빛 에너지를 전기적 신호로 바꾸는 가장 손쉬운 방법이다<sup>[19]</sup>.

초전형 감지기는 적외선 감지층의 온도변화에 따라 분극(polarization)이 변화하는 특성을 이용한 소자로 BST(barium stromtium titanate), PZT(lead zirconate titanate), PST(lead scandium tantalate)등의 세라믹 물질을 적외선 감지층으로 사용한다. Fig 1.2 (b)에서 보듯이 방사된 적외선이 감지기 표면을 때릴 때 온도에

의한 변화는 전류를 흐르게 하고 이 전류는 적외선 세기에 비례한다. 이 감지기는 넓은 파장의 범위에서 좋은 반응도와 응답을 나타내며 감지기의 냉각장치가 필요 없는 장점이 있지만 광원의 변조를 위해 기계적인 초퍼가 필요하여 소형화를 하는 데에는 한계가 있다. 초전형 감지기는 가스 모니터링에서 가장 널리 사용되는 감지기이다<sup>[20]</sup>.

광자는 파장과 세기에 비례하는 에너지를 가지는데 광자 감지기는 입사된 광자와 반도체 물질 사이의 상호 양자작용을 감지한다. 충분한 에너지를 갖는 전자를 때린 광자는 비전도 상태에서 전도 상태로 전자가 상승한다. 전도대에서 전자의 존재는 칩의 전도성을 증가시킬 것이고 바이어스 전압은 신호로써 이 변화를 기록한다. 전자의 흥분은 얼마정도의 에너지를 갖는 광자를 필요로 한다. 파장이 짧을수록 더 큰 진동수를 가지며 결국 더 많은 에너지를 갖는다. 이런 감지기는 제한된 스펙트럼 영역에서 작용하고 사용된 감지 물질에 의존하는 단점이 있다. 일반적으로 이런 감지기는 TE(thermoelectric) cooler로 냉각해야 하고 심지어 올바르게 작동하기 위해 액화질소가 필요하기도 하다. 감지물질로는 1-3 $\mu$ m 영역에서 사용하는 PbS(lead sulfide)와 1-5 $\mu$ m의 영역에서 사용하는 PbSe(lead selenide)등이 있다<sup>[21]</sup>.

루프트 감지기는 독일어로 "공기"를 의미하는 "luft"란 말에서 유래한 것으로 독일에서 개발되었다. 이 감지기는 Fig 1.2 (c)에서 보듯이 마이크로 플로우 센서(micro flow sensor)에 의해 연결되거나 격막(diaphragm)에 의해 나뉘어 지는 두 개의 챔버(chamber)로 구성되어 있다. 이 챔버들은 저압에서 측정대상 가스로 밀봉된다. 적외선을 투과하는 창은 챔버를 밀봉하는데 적합하고 펄스로 된 같은 세기의 적외선이 측정대상 가스가 없을 때 두 챔버안으로 들어온다. 측정 대상 가스가 샘플 셀에 들어올 때, 방사 에너지의 감소가 감지기용 챔버에서 일어나는데 이것은 감지기용 챔버에서 온도와 압력이 감소한 원인이 된다. 온도와 압력이 감소한 양은 가스 농도에 직접 비례한다. 연결된 챔버 같은 경우 두 챔버 사이의 압력 차이는 감지할 수 있는 흐름이 있다는 것을 말하고 신호로써 측정될 수 있다. 격막이 두 챔버를 나눈 경우는 격막의 이동이 캐패시턴스에서 측정 가능한 변화가

있음을 말해준다<sup>[22]</sup>.

광음향식 감지기는 압력 변화가 콘덴서 마이크로폰(condenser microphone)에 의해 측정되는 점을 제외하곤 루프트 감지기와 비슷하다. 샘플 가스는 미리 조절된 시간 간격으로 챔버를 통과하고 챔버는 내부에 잡혀있는 샘플 가스의 고정된 체적을 가지고 밀봉되어 있다. Fig 1.2 (d)와 같이 방사된 적외선의 특정 파장은 적외선을 통과하는 창을 통해 챔버 안으로 전해진다. 진동으로 들어오는 압력의 변화는 신호를 만드는 진동수 변화로써 마이크로폰에 의해 측정된다<sup>[23]</sup>.

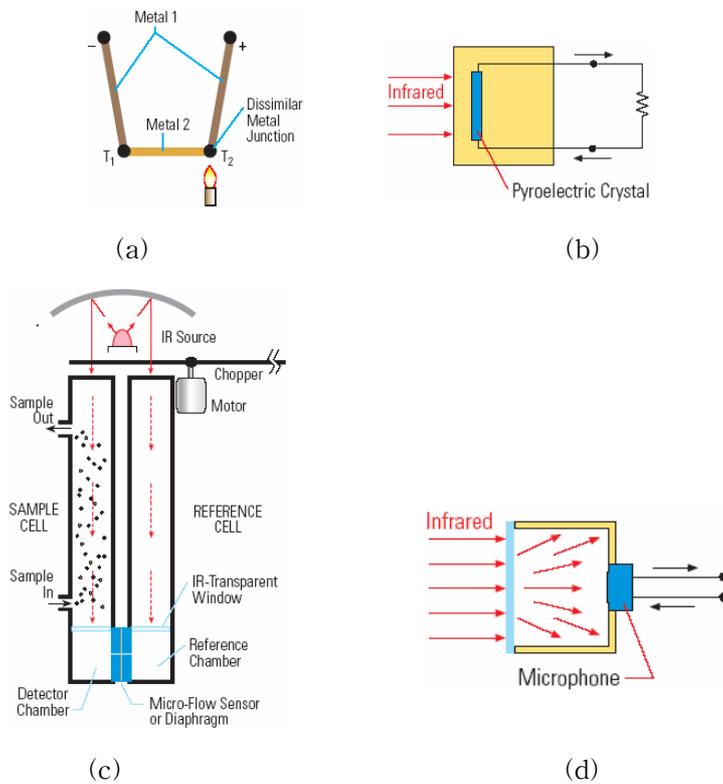


Fig 1.2 Examples of Infrared gas detector types

(a) Thermoelectric detector (b) Pyroelectric detector

(c) Luft detector (d) Photoacoustic detector

## 제 1.2 절 연구의 목적과 독창성

본 연구는 이산화탄소 감지 소자로서 MEMS(microelectromechanical system)기술에 의해 monolithic한 공정이 가능하고 감지도 및 응답도가 좋은 마이크로볼로미터의 적외선 흡수율 향상을 위한  $\lambda/4$  공진 구조 최적화 설계 및 제작과 이산화탄소 농도 측정에 필요한 기준 신호를 얻기 위해 기존의 단점을 극복한 새로운 방법의 제안 및 제작 그리고 MEMS기술에 의해 저가, 소형화가 가능하여 의료용, 가정용 등 다양한 분야에서의 응용 가능성을 제시하는 집적화된 이산화탄소 센서 시스템 구성 및 이산화탄소 농도 측정을 목적으로 연구를 수행하였다.

첫 번째로 감지기는 MEMS기술을 이용한 마이크로볼로미터를 제작하여 이산화탄소 농도를 측정하였는데 기존의 표면미세가공 기술(surface micromachining)을 이용하여 제작된 뜬(floating)구조에 기초한  $\lambda/4$  공진 구조는 반사층을 뜬 구조 밑에 두어 높이가  $\lambda/4$ 가 되도록 제작하였다<sup>[24]</sup>. 그러나 이 방법은 공정상에서 발생하는 스트레스 등으로 인해 구조가 뒤틀릴 경우 흡수율이 작아진다. 따라서 본 연구에서는 기존의 단점을 극복하기 위해 열적 고립(thermal isolation)을 위한 뜬 구조 위에 반사층, 흡수층, 감지층을 형성하여 흡수층과 감지층의 광학적 두께를  $\lambda/4$ 로 하는 구조를 제안하여 제작하고 특성을 평가하였다.

두 번째로 기존의 비분산식 적외선 이산화탄소 감지에서 기준 신호에 의한 보정(calibration)이 까다롭고 신뢰성이 떨어지는 단점을 극복하기 위해 입사되는 단일 적외선 광원 바로 아래에다 기준 신호를 만들기 위해 순수한 이산화탄소가 채워진 이산화탄소 챔버를 위치시켰다. 이는  $4.26\mu\text{m}$  파장에서 흡수 피크를 갖는 이산화탄소를 통과한 적외선 빔이 'pre-absorption'에 의해 기준 신호를 만드는데 사용된다. 이는 이산화탄소같이 한가지의 가스만을 측정하고자 할 때 챔버 안에 그 가스와 정확히 일치하는 가스를 사용함으로써 챔버로 구성된 가스 필터 칩(gas filter chip)이 측정대상 가스와 정확하게 같은 흡수특성을 가지게 된다. 따라서 수증기 및 기타 오염물질에 의한 기준 신호의 변화를 최소화할 수 있다.

세 번째로 위에서 제작한 마이크로볼로미터와 이산화탄소 필터 칩은 실리콘 미

세가공 기술로 제작하였는데 이는 센서 크기를 작게 만들고 공정 가격을 낮출 수 있는 장점이 있다. 따라서 단일 칩으로 제작이 가능하고 다른 가스에 의한 간섭이 없으며 저전력 소비와 소형화 등의 장점을 가지는 MEMS 기반의 IR CO<sub>2</sub> 센서로의 응용 가능성을 제시한다. 광원의 전기적인 변조에 의해 초퍼같은 기계적인 부품이 필요 없는 고성능의 센서 제작이 가능하고 이는 마취상태의 환자나 중환자실에 있는 환자의 기도를 통해 환자상태를 모니터링하는 등의 의료용으로 사용되거나 가정이나 자동차 실내의 이산화탄소 농도를 측정하여 환기 조절용으로 사용하는 등 그 응용분야가 다양할 것으로 생각된다<sup>[25][26]</sup>.

## 제 2 장 적외선을 이용한 이산화탄소 감지

### 제 2.1 절 적외선 가스 센서

#### 2.1.1 적외선 가스 센서의 원리

가스 분자들은 서로 결합된 여러 원자들로 구성된다. 이런 원자들의 결합구조는 스프링과 비슷하고 다양한 크기의 원자들이 함께 연결되어 있다. Fig 2.1은 하나의 탄소와 두개의 산소 원자로 구성된 이산화탄소 분자를 보여준다. 이런 결합은 고유진동수(natural frequency)라고 하는 고정된 진동수를 가지고 진동한다.

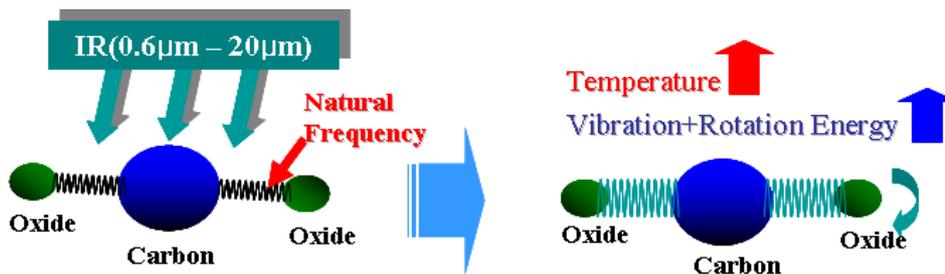


Fig 2.1 Principle of the IR Carbon dioxide detection

모든 물질은 고유진동수를 가지고 있다. 비록 이런 진동은 기계적인 파에서 오지만 이론적으로 전자기파와 비슷하다. 가스 분자들은 다수의 고유진동수를 가지고 있는데 분자가 크면 클수록 더 많은 고유진동수를 갖는다. 고유진동수는 가스들의 화학적 분자 구조에 의해 결정되고 주어진 분자와 결합구조에서는 항상 같다. 화학물질에 의해 나타나는 각각의 특성들은 각각의 지문(fingerprint)처럼 사용되어 주어진 화학 화합물의 분자 구조를 확인하는 단서를 제공한다<sup>[27]</sup>.

적외선 광원에 의해 방사된 적외선이 가스 분자들과 상호 영향을 미칠 때 에너

지의 어떤 한 부분은 가스 분자의 고유진동수와 같은 진동수를 갖고 방사된 적외선의 나머지 부분이 투과되는 동안 흡수된다. 가스 분자가 이 방사된 적외선을 흡수할 때 분자는 에너지를 얻고 더욱 더 강력하게 진동한다. 이런 진동은 가스 분자의 온도가 상승하는 결과를 가져온다. 온도는 가스 농도에 비례해서 증가하고 감지기에 의해서 감지된다. 그러나 특정 파장을 갖는 가스 분자에 의해 흡수된 방사된 적외선은 광원 원래의 세기를 감소하게 한다. 이렇게 감소된 방사 에너지는 역시 신호로써 감지될 수 있다.

복잡한 여러 가스 분자들은 흡수 피크의 수를 결정한다. 분자를 구성하는 원자가 많으면 많을수록 발생할 수 있는 흡수 밴드는 더 많아진다. 이런 흡수가 발생하는 영역에서 흡수된 양과 흡수 곡선의 특성은 각각의 가스마다 독특하다. 가스 분자들은 각각의 흡수특성을 이용하여 지문처럼 쓸 수 있고 가스 분석이나 확인을 목적으로 하는데 사용될 수 있다.

가스를 모니터링하는 응용분야에서는 단지 하나의 특성을 갖는 흡수 영역이 가스 농도를 정량적으로 결정하기 위해 사용된다. 이 때 사용되는 파장대는  $2\mu\text{m}$ 에서  $15\mu\text{m}$ 이고 이산화탄소의 적외선 흡수 특성 그래프는 Fig 2.2와 같다.

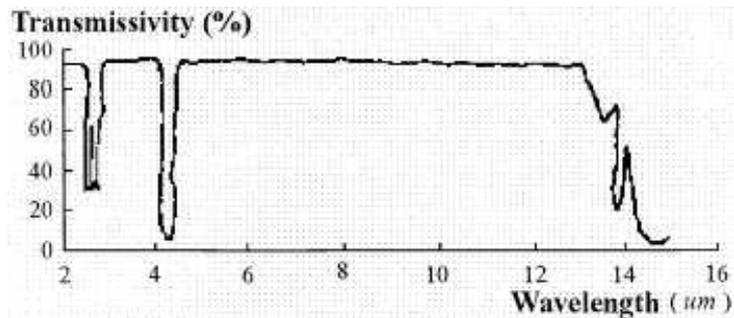


Fig 2.2 Infrared absorption characteristic of carbon dioxide

위의 그래프는 이산화탄소가  $4.26\mu\text{m}$ 에서 가장 강한 흡수 피크를 가지고 이는 적외선을 이용한 이산화탄소 감지에서 사용가능한 파장임을 보여준다.

## 2.1.2 비어-람베르트 법칙(Beer-Lambert's law)

대부분의 가스들은 적외선 영역에서 그들 고유의 특성을 나타내는 흡수 밴드를 갖는다. 적외선 영역에서의 이산화탄소는  $2.6\text{-}2.9\mu\text{m}$ 와  $4.1\text{-}4.5\mu\text{m}$ 의 두가지 흡수 밴드를 갖는다. 적외선이 이산화탄소를 통과하면 가스분자들은 두가지 밴드의 적외선을 흡수할 것이다. 흡수율은 비어-람베르트 법칙에 의해 설명할 수 있다<sup>[28]</sup>.

우선 적외선이 이산화탄소를 통과하기 전의 세기를  $E_0$ 라 하자. 이산화탄소를 통과한 적외선의 세기를  $E$ 라 하고 분자량에 의해 흡수된 적외선의 세기를  $dE$ 라고 할 때 식 (2-1)로 표현할 수 있다.

$$\frac{dE}{E} = -KdN \quad (2-1)$$

$K$  : 비례계수,  $dN$  : 분자량

흡수층의 두께를  $L$ 로 가정하자. 이 때 적외선이 흡수층을 통과할 때 식 (2-2)를 얻을 수 있다.

$$\ln E = -KN + \alpha \quad (2-2)$$

$N$  : 이산화탄소 분자들의 합,  $\alpha$  : 적분상수

이산화탄소 분자들의 합은 이산화탄소 퍼센트 농도인  $C$ 와 흡수층 두께  $L$ 에 비례하므로 식 (2-2)는 식 (2-3)으로 나타낼 수 있다.

$$E = \exp(\alpha) \cdot \exp(-KN) = \exp(\alpha) \cdot \exp(-K_\lambda CL) = E_0 \cdot \exp(-K_\lambda CL) \quad (2-3)$$

$K_\lambda$  : 흡수계수

식 (2-3)은  $L$ 과  $E_0$ 가 변하지 않는다면  $E$ 는  $C$ 의 단일값을 나타낸 함수이다. 그러므로 적외선 세기  $E$ 를 측정함으로써 이산화탄소의 퍼센트 농도를 알 수 있다.

### 2.1.3 비분산식 가스 센서의 종류

광원의 개수, 필터의 종류, 감지기의 종류 등에 따라 다양한 형태의 비분산식 가스 센서가 있지만 여기에서는 기준 신호를 제공하는 방법에 따라 크게 광원에 따른 측정 신호 대 기준 신호의 비를 이용하여 이산화탄소의 농도를 측정하는 방법과 대역필터를 이용하여 기준신호를 얻어 이산화탄소 농도를 측정하는 방법으로 구분하였다. Fig 2.3(a)은 감지기로부터 길이  $L_1$ 만큼 떨어진 위치에 있는 광원 (source1)에서 측정된 신호와 측정대상 가스로부터의 영향을 최소화하는 짧은 거리  $L_2$ 만큼 떨어진 위치에 있는 광원(source2)에서 측정된 기준 신호의 비로 이산화탄소 농도를 측정하는 방법이다. 그러나 source2에 의한 기준 신호 역시 이산화탄소 농도에 영향을 받으며 각각의 광원 수명에 의한 드리프트(drift)에 의해 신호를 보정하기 어려운 점이 있어 높은 신뢰성을 기대하기 힘든 단점이 있다<sup>[29]</sup>. Fig 2.3(b)는 두 개의 광원을 사용할 때 발생하는 문제점을 해결하기 위해 광원은 하나만 사용하는 대신 대역필터를 이산화탄소 흡수 피크 파장인  $4.26\mu\text{m}$ 만 통과하는 필터와 이산화탄소 흡수 특성을 보이지 않는 다른 대역의 파장만 통과하는 필터 두 가지를 이용하여 측정신호와 기준신호를 얻고 이를 이용하여 농도를 측정하는 방법이다. 이 방법은 광원의 드리프트에 상관없이 같은 비율로 측정 신호와 기준 신호가 측정되므로 최근에 가장 많이 사용하는 방법이지만 호흡가스와 같이 수증기와 기타오염 물질이 측정대상 가스에 포함되어 있을 때 기준신호를 얻기 위한 대역필터의 파장에서 흡수 특성을 보이는 오염물질이 포함되어 있을 때 이에 대한 보정이 어렵다는 단점이 있다<sup>[30]</sup>.

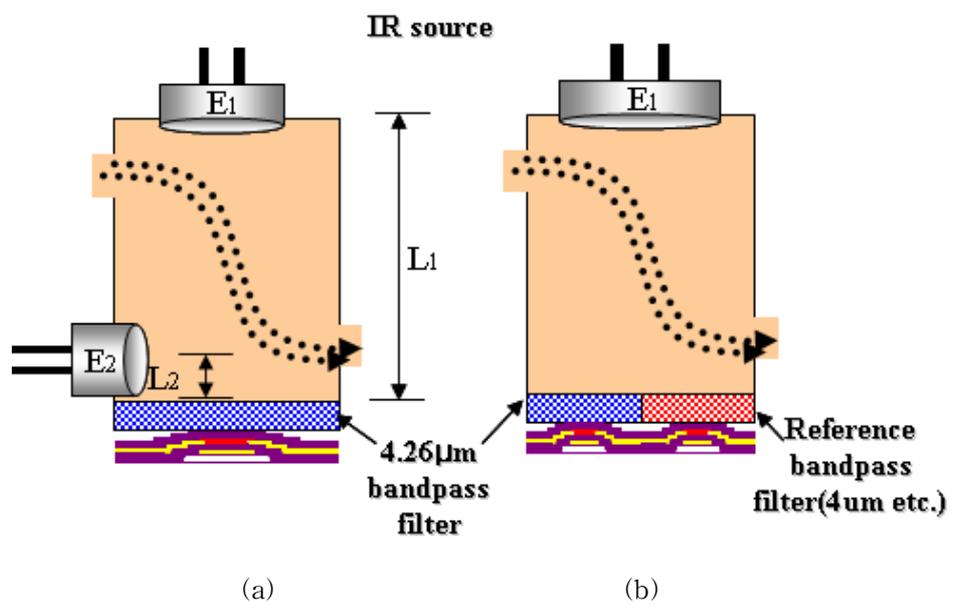


Fig 2.3 NDIR CO<sub>2</sub> sensor

(a) two source method for reference signal

(b) two bandpass filter method for reference signal

## 제 2.2 절 마이크로볼로미터의 원리

### 2.2.1 마이크로볼로미터의 이론적 배경

0K 이상 상태에 있는 모든 물체는 광범위한 주파수 대역의 전자기 에너지 (Thermal Radiation)을 방출한다. 만약 물체가 에너지를 완벽하게 흡수하면 플랑크 흑체 방사(복사)법칙에 의해 식 (2-4)과 같이 전자기 에너지 R을 방출한다<sup>[31]</sup>.

$$R = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} \quad (W/cm^2) \quad (2-4)$$

위 식에서  $c$ 는 광속,  $h$ 는 플랑크 상수,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $\lambda$ 는 파장,  $T$ 는 절대 온도를 나타내고 Fig 2.4를 보면 방사된 에너지 세기와 피크 주파수는 온도 증가와 함께 증가한다.

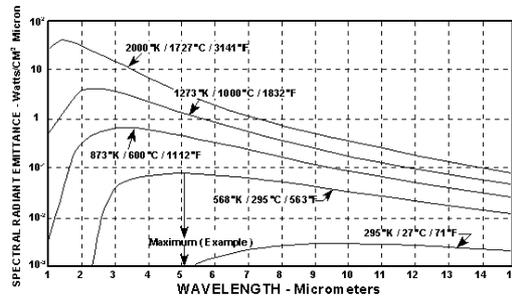


Fig 2.4 Related spectral radiance energy as a function of wavelength

마이크로볼로미터는 Fig 2.5와 같이 적외선을 받는 부분과 소자를 지지하는 다리가 뜬 구조층 위에 함께 형성되어 있고 그 위에 온도를 감지하는 저항체가 형성되어 있다<sup>[32]</sup>. 이 저항체는 다리 위에 형성된 금속패턴을 통해 기관의 회로와 연결된다. 적외선이 소자에 입사되면 그 에너지가 소자의 온도를 상승시킨다. 그

러나 소자에서 외부로의 열손실이 있기 때문에 외부와 열 평형상태를 이루는 온도에서 소자의 온도가 결정된다. 이 온도 변화로 인한 저항의 변화를 감지하여 적외선 복사를 감지한다.

적외선 열복사로 소자에 입사되는 에너지량은 수 nW의 미량에 의한 온도상승이므로 이와 같이 작은 양의 열이 효과적으로 전기적 신호로 변환되기 위해서는 외부로 빠져나가는 열손실(thermal conductance,  $G$ )을 최대한 억제하고, 열용량(thermal mass,  $C$ )을 최소화해야 한다. 그림에서 보면 소자는 기판(substrate)으로의 열손실을 최소화하기 위해 가늘고 긴 다리(isolation leg)를 통해 기판과 연결이 되어 있다. 이와 같은 구조에서 열손실이 발생할 수 있는 경우는 다음의 세 가지 경우가 있다.

1. 소자 자체가 가지는 온도에 의한 복사( $G_{rad}$ )
2. 공기에 의한 기판으로의 전도와 대류에 의한 열손실( $G_{air}$ )
3. 소자를 지지하는 다리에 의한 전도( $G_c$ )

1에 의한 경우는 가장 기본적인 한계로 대부분의 경우 소자의 온도가 주변 온도와 크게 다르지 않으므로 복사에 의한 열손실은 무시할 수 있다. 2에 의한 경우는 소자를 진공 포장함으로써 해결할 수 있고 마지막으로 3에 의한 경우는 기계적으로 소자를 안정적으로 지지하는 한도 내에서 가장 열전도율이 작도록 가늘고 긴 다리를 갖는 구조를 설계한다. 따라서 볼로미터 소자의 열손실은 소자를 진공 포장(vacuum package)한다면 소자와 기판을 연결하는 다리의 열전도도( $G_c$ )만으로 나타낼 수 있다.

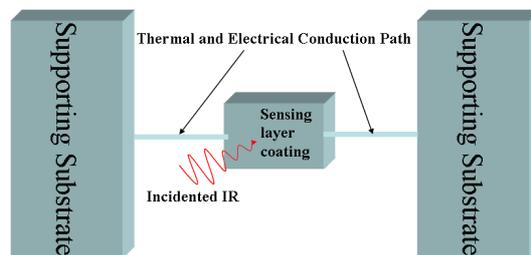


Fig 2.5 Principle mechanism of the microbolometer

## 2.2.2 마이크로볼로미터의 성능지수

저항형 볼로미터의 성능을 비교하는 척도는 여러 가지가 있지만 기본적으로 입사하는 적외선의 변화에 따른 출력 신호의 변화정도와 소자가 감지할 수 있는 최소의 적외선 복사량이 필요하며 이들 정보를 줄 수 있는 다음과 같은 성능지수가 필요하다.

### 가. TCR(Temperature Coefficient of Resistance)

감지층의 온도변화에 따른 저항변화를 나타내는 수치이며 식 (2-5)와 같은 식으로 구할 수 있다<sup>[31]</sup>.

$$\alpha (TCR, \% / K) = \frac{dR}{RdT} \times 100 \quad (2-5)$$

$R$  : 작동온도에서의 적외선 감지층의 저항

이 식을 이용하여 소자의 저항을 온도의 함수로 나타내면 식 (2-6)과 같다.

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (2-6)$$

### 나. 응답도(Responsivity)

식 (2-7)과 같이 입사한 적외선의 변화에 비해서 출력 신호가 변하는 정도를 나타낸 것으로 소자의 반응도(sensitivity)를 나타낸다<sup>[31]</sup>.

$$R = \frac{\Delta \text{Output signal}}{\Delta \text{Input radiant power}} = \frac{V_s}{E_0} (V/W) \quad (2-7)$$

$$V_s = i_b \Delta R = i_b \alpha R \Delta T \quad (2-8)$$

식 (2-8)에서  $V_s$ 는 출력신호이고  $i_b$ 는 소자에 걸어주는 바이어스 전류이고  $\Delta T$ 는 소자의 센서층의 온도 변화이다. 소자의 열용량과 주변의 열전도도의 총합을 각각  $C(J/K)$ ,  $G_c(W/K)$ 로 표시하면 입사된 적외선에 의한 소자 온도의 변화를 식(2-9)으로 나타낼 수 있다<sup>[31]</sup>. 이것은 소자의 열전도도가 정상상태에서  $\Delta T$ 만큼 온도차이가 날 때 소자에서 외부로  $G_c(\Delta T)$ 만큼 전력이 빠져나감을 의미한다. 또한 열용량  $C$ 는 소자의 온도를 1°C 올리는데 필요한 에너지를 나타내는 척도가 된다. 따라서 열용량이 적고 외부로의 열손실이 적다면 소자는 적은 적외선 에너지로도 온도가 크게 변하고 빠르게 변할 것이다.

$$C \frac{d(\Delta T)}{dt} + G_c(\Delta T) = \epsilon E A_d = \epsilon A_d E_0 \exp(j\omega t) \quad (2-9)$$

$\Delta T$  : 소자와 기관의 온도차이,  $\epsilon$  : 소자의 적외선 흡수율,  $E(W/cm^2)$  : 단위면적당 입사하는 적외선 복사 에너지,  $A_d$  : 소자의 적외선 흡수 면적

이 식으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta T = \frac{\epsilon E_0 A_d}{G_c \sqrt{(1 + \omega^2 \tau^2)}}, \quad \tau = C / G_c \quad (2-10)$$

$\tau$  : 열시정수(thermal response time)

식 (2-9), 식 (2-10)은 열감지 방식의 모든 센서에 적용될 수 있다. 저항형 볼로미터의 경우 출력전압은

$$V_s = \frac{i_b \alpha R \epsilon E_0 A_d}{G_c \sqrt{(1 + w^2 \tau^2)}} \quad (2-11)$$

이 되고 응답도는

$$R = \frac{i_b \alpha R \epsilon A_d}{G_c \sqrt{(1 + w^2 \tau^2)}} \quad (2-12)$$

이 된다. 식 (2-12)에서 보면 응답도는 TCR값에 비례하고  $G_c$ 값에 반비례함을 알 수 있다. 그런데 TCR값은 어느 정도 한계가 있지만  $G_c$ 값은 소자 설계 시 수 order를 줄일 수 있다. 열적 고립 구조(thermal isolation structure)가 중요한 이유가 바로 여기에 있다. 저항형 볼로미터 설계, 제조시 온도변화를 크게 하기 위해 매우 작은  $G_c$ 값을 갖는 구조로 설계해야 하며 TCR이 큰 재료를 감지층으로 사용 하여야 하고 빠른 응답시간의 요구에 부응하는 작은 C값을 갖는 센서층의 부피가 고려되어야 한다.

볼로미터 소자의 응답도를 구할 때 중요하게 고려해야 할 점의 하나는 바이어스 전류에 의한 소자의 온도변화이다. 볼로미터는 저항소자이기 때문에 신호를 읽기 위해서는 소자에 바이어스를 가해야 하고 이 때문에 열이 발생하여 실제로 소자의 온도는 항상 기관의 온도보다 높게 나타난다. 이는 소자의 성능에 영향을 미치는데 식 (2-6), 식(2-9)으로부터 식(2-13)으로 나타낼 수 있다<sup>[11][31]</sup>.

$$C \frac{d(\Delta T)}{dt} + G_c (\Delta T) = \epsilon E A_d + i_b^2 R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (2-13)$$

적외선에 의한 온도변화는 바이어스에 의한 온도변화에 비해 아주 작으므로 이에 대한 영향을 무시할 수 있고 바이어스에 의한 소자의 온도상승은 소자가 평형 상태에 이르렀을 때 식 (2-14)과 같다.

$$\Delta T = \frac{i_b^2 R_0}{G_c - \alpha i_b^2 R_0} \quad (2-14)$$

소자의 저항을  $R_b$ 라고 하면 응답도는 식 (2-15)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{i_b \alpha R_b \epsilon A_d}{G_c \sqrt{(1 + w^2 \tau^2)}} \quad (2-15)$$

#### 다. 잡음(Noise)특성

감지소자의 성능은 응답도에 좌우되지만 소자의 물리적인 한계를 결정하는 것은 소자의 잡음이다. 큰 응답도를 갖더라도 출력신호가 소자의 잡음보다 작으면 의미가 없기 때문이다. 저항형 볼로미터 시스템에서 발생하는 잡음들은 판독회로에서 발생하는 전기적인 잡음을 제외한 볼로미터 저항에 의한 존슨 잡음(Johnson noise)과 볼로미터 물질의 구조나 전기적 접촉(contact)에 의한 1/f 잡음으로 구분된다.

존슨 잡음은 나이퀴스트 잡음(Nyquist noise)라고도 하는데 볼로미터 저항에서 전하 운반자의 열 여기(Thermal Excitation)에 의해 발생하는 변동에 의한 잡음으로 주파수에 무관하고 식 (2-16)으로 나타낼 수 있다<sup>[11][31]</sup>.

$$v_j = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (2-16)$$

$v_j$  : 존슨 잡음 전압(rms), k : 볼츠만 상수, T : 절대온도, R : 볼로미터 저항,  
 $\Delta f$  : 전기적 대역폭

잉여 잡음(excess noise)은 바이어스를 흘려 줄 때 발생하는 데 크게 1/f잡음, telegraph 잡음으로 나뉜다. 1/f잡음은 존슨 잡음과는 무관하며 식 (2-17)으로 나

타낼 수 있다. 이때  $K$ 는  $1/f$  잡음 상수로 저항체 물질의 구조, 전기적 접촉내의 결합 등에 영향을 받는다. telegraph 잡음은 일명 popcorn noise라고 하며 저항체 물질의 구조나 접촉의 알려지지 않은 불완전성에 의해 갑작스런 전압의 변화에 의해 생긴다<sup>[11][31]</sup>.

$$v_e^2 = V^2 \frac{K}{f} \quad (2-17)$$

일반적으로 잡음특성은 낮은 주파수의 영역대에서  $1/f$ 잡음의 증가와 더불어 증가하며 고주파수대 영역에서는 존슨 잡음과 동일하게 된다. 대부분의 마이크로 볼로미터의 잡음은 존슨 잡음이며 바이어스를 증가시킴에 따라  $1/f$  잡음이 전체 잡음을 좌우한다.

#### 라. 감지도(Detectivity)

감지도는 적외선 소자 성능 측정의 절대적인 척도로서 소자의 적외선에 대한 응답도를 소자와 증폭기에서 발생하는 잡음에 대해 정규화된 값을 말한다. 위에서 구한 응답도와 잡음으로 감지도를 구할 수 있는데 이는 볼로미터에 입사한 적외선을 전기적 신호로 얼마나 잘 변환시켜 주는가 하는 정도와 미세한 온도 차이를 얼마나 잘 구분해주는가를 나타내는 척도가 된다. 감지도는 식 (2-18)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[11][31]</sup>.

$$D^* (cm \sqrt{Hz} / W) = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{V_n} R \quad (2-18)$$

여기서  $R$ 은 응답도,  $A_d$ 는 소자 면적,  $V_n$ 은 잡음전압 그리고  $\Delta f$ 는 등가 잡음 대역폭(equivalent noise bandwidth, ENBW)인데 잡음 전압의 절대값이  $\Delta f$ 에 따

라 다른 값을 가질 수 있지만 잡음전압을  $\Delta f$ 로 정규화 한 값( $\frac{V_n}{\sqrt{\Delta f}}$ )은 동일하게 된다. 따라서  $R$ ,  $NEP$ (Noise Equivalent Power),  $D(1/NEP)$ 등은 증폭기의 gain, 소자의 면적, 전기적 대역폭 등에 따라 다른 값을 보이지만 두개의 센서를 비교하기 위해 전기적 대역폭에 대해 단위 면적( $cm^2$ )와 단위 주파수(1Hz)에 대한 값으로 정규화한 값을 사용한  $D^*$ 를 이용하면 정규화된 감지도를 구할 수 있다. 지금까지 정리한 각 성능 지수로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 큰 감지도를 얻기 위해서는 소자의 적외선 흡수율과 TCR이 높아야 한다.
2. 소자에 가해지는 바이어스가 클수록 감지도가 높다.
3. 소자의 열전도도(thermal conductance)가 낮을수록 큰 감지도를 얻을 수 있다.

## 제 2.3 절 $CO_2$ 감지용 적외선 기준 필터

적외선 필터는 많은 적외선 센서에서 중요한 요소가 되고 있다. 적외선 필터링(Infrared Filtering)은 여러 가지 목적으로 사용될 수 있는데 대역필터(bandpass filter)와 기준필터(reference filter)의 차이점을 구별하는 것이 중요하다. 본래 대역필터는 입사하는 적외선을 필터링함으로써 원하지 않는 파장을 제거하는데 사용되고 따라서 단지 측정하고자 하는 파장에서만 흡수 측정이 이루어진다<sup>[33]</sup>. 기준필터는 안정적인 센서 출력, 장시간동안의 안정성, 그리고 센서 보정을 위해 필수적인 기준 신호를 제공하는데 주로 흡수를 기반으로 하는 광학적 가스 센서(optical gas sensor)에서 사용된다<sup>[34]</sup>. 이것은 입사된 신호의 특정 파장대에서 흡수에 의해 수행된다. 이런 기준필터는 역시 레이저의 intercavity element, monochromators, 광 통신 시스템에서의 파장 분할기(wavelength demultiplexers)<sup>[35]</sup>나 그것 자체로 압력을 잴 수 있는 압력센서로서 사용될 수 있다<sup>[36]</sup>.

가장 널리 사용되는 기준필터 중의 하나는 패브리-페롯 필터(Fabry-Perot filter)이다<sup>[37]</sup>. 이것은 공동(cavity)에 의해 분리된 두개의 평행한 반투명의 거울(mirror)로 구성되어 있다. 이 필터의 광학적 투과 특성은 두 거울 사이의 간격이 입사 빛 파장의 1/2를 곱한 것과 같을 때 여러 개의 뚜렷한 동조 투과 피크로 구성된다. 이런 투과 피크는 공동 내에 빛이 여러 번 반사하기 때문에 생긴다. 이런 필터의 투과 응답은 공동의 깊이를 변하게 하여 바꿀 수 있다. 그러나 필터의 스펙트럼 응답은 작은 갭 변화에 매우 민감하여 이런 특별한 문제를 해결하기 위한 개선의 노력이 제안되었다. 그것들은 고정된 갭에서 어떤 원하지 않은 공동의 변화를 방지하기 위해 사용되는 분리층(separator layer)으로 실리콘 같은 투과가 되는 기관으로 구성된다. 또 다른 어려움은 협대역필터(narrow bandpass filter)가 기준 신호를 제공하는데 사용될 때 발생하는데 간섭 필터의 대역폭(bandwidth)내에서 가스에 의한 흡수는 분리된 창에서만 발생하는데 이는 전형적으로 0.5nm나 그 이하의 스펙트럼 넓이(spectral width)를 갖는다. 그러므로 방사된 적외선의 특

정 부분이 흡수 과정에서 중요한 역할을 한다.

광음향필터(opto-acoustic filter) 역시 일반적인 기준필터로 사용되는데 그것들은 다중 광분할 (wavelength division multiplexing)이나 적외선 광음향 감지기에서 공진 내지는 비공진 가스 셀로서 광범위하게 사용된다. 특히 후자는 기준필터로 사용되지만 상대적으로 크기가 크고 비싸며 제작공정이 칩 레벨(chip level)에서 이루어진다<sup>[38]</sup>.

본 논문에서는 실리콘 기판에서 기판 미세가공(bulk micromachining) 기술을 이용하여 광학용 가스 기준필터를 제작하였다. 궁극적인 목적은 그것들을 마취상태나 중환자실에 있는 환자의 기도에서 나타나는 호흡 가스의 측정을 위한 기준 신호를 제공하기 위해 가스 센서 시스템에 집적화하는데 있다. 제안한 발상은 공동 내에 순수한 측정대상 가스(이산화탄소 99.9%이상)를 채워놓고 측정하고자 하는 가스의 흡수 스펙트럼과 정확히 일치하는 기준 신호를 얻는 것이다.

## 제 3 장 $CO_2$ 감지용 마이크로 볼로미터 제작

### 제 3.1 절 MEMS 기술의 마이크로 볼로미터 제작 응용

최근 반도체 집적회로 제조기술을 응용한 미소기계 제작이 가능하게 됨에 따라 마이크로미터 크기의 미소 기계부품이나 각종 센서와 이들의 동작에 필요한 집적 회로를 하나의 칩(chip)으로 일체화시키는 MEMS(Microelectromechanical System)기술이 등장하였는데 많은 장점을 가지고 있어 의료용 등 많은 연구 분야에서 활발하게 진행 중이다<sup>[39-42]</sup>. Fig 3.1과 같이 MEMS 기술은 크게 표면 미세 가공(surface micromachining)기술, 기판 미세가공(bulk micromachining)기술, LIGA(Lithographie, Galvanoformung, Abformung)기술, 양극접합(anodic bonding) 등의 접합(bonding)기술 등으로 분류할 수 있다<sup>[43]</sup>.

표면 미세가공 기술은 기판(substrate) 위에 기계적 안정성을 부여해주는 구조층 박막(structural thin film)과 목적하는 특성을 담당하게 되는 기능성 박막(functional thin film)을 증착(deposition)하고 노광전사(lithography)와 식각(etching)방법을 이용하여 마스크(mask)에 설계된 소자 형상 그대로 제작하는 박막 가공기술로서 선택적 식각이 가능한 희생층을 이용하여 다양한 형태의 구조물 제작이 가능하다. 특히 IC제조 기술과의 호환성이 우수하므로 기판에 미리 형성된 회로 위에 소자를 직접 제작하여 일체화, 집적화 시킬 수 있는 장점이 있다<sup>[44-46]</sup>.

기판 미세가공 기술은 화학 가스를 이용한 등방성 화학적 식각(isotropic chemical)을 주로 사용하는 표면 미세가공 기술과는 달리 보통 기판으로 많이 사용하는 실리콘의 결정 방향에 따른 이방성 화학적 식각(anisotropic chemical etching)을 주로 이용하여 기판 자체를 가공하는 기술이다. 기판에 불순물을 침투 시키거나 내식성 박막 혹은 전기화학적 경계층을 이용하여 식각을 조절하거나 정지시켜 목적하는 구조물을 제작할 수 있다<sup>[47-49]</sup>.

LIGA 기술은 고 종횡비(high aspect ratio)구조물을 얻기 위해서 고안된 특수

기술로서 노광전사와 전기도금을 이용하여 구조물을 제작하는 방법이다. 즉, PMMA같은 아크릴 수지나 두꺼운 감광제(thick photoresist)를 이용하여 몰드(mold)를 형성한 후 전기도금으로 Ni, Cu 등의 고 종횡비 금속 구조물을 얻는 방법이다<sup>[50][51]</sup>.

마지막으로 마이크로 단위의 소자들을 패키징(packaging)하기 위한 접합 기술은 표준화된 패키징 공정이 가능한 일반적인 전기소자와 달리 마이크로 단위에서 제작된 센서나 액추에이터같은 MEMS구조물의 패키징 디자인을 제품 설계 초기부터 고려해야 하는 중요한 공정이다. 또한 미세한 크기의 MEMS구조물에서는 다양한 기계적인 시스템이 응용되기 때문에 표준화된 패키징 방법이 존재하지 않는다. 따라서 MEMS패키징 기술은 각각의 시스템의 목표에 따라서 적절히 설계해야만 한다. MEMS구조물에 대한 패키징의 목적은 외부 환경으로부터 소자의 보호와 외부의 오염물로부터 각각의 구조물들에 대한 오염의 방지와 성능 향상을 위한 높은 진공도의 유지 등을 들 수 있다<sup>[52]</sup>.

이러한 MEMS 기술의 응용은 다양한 센서(sensor)와 액추에이터(actuator) 등의 기능성 소자들을 감지와 구동을 위한 집적회로와 함께 동일 기판 위에 초소형화된 마이크로칩의 형태로 제작 가능하게 되었다. MEMS 기술의 장점은 기계와 전자 등의 각기 다른 요소가 접목된 복합 소자의 경(輕), 박(薄), 단(短), 소(小)화를 구현하는 동시에 집적화의 용이성, 다기능화, 우수한 신뢰성을 확보할 수 있다는 점이다<sup>[53-55]</sup>.

MEMS 기술은 마이크로 볼로미터 제작에도 응용되어 감지성능의 향상, 첨단 신호처리 기능을 반도체 집적회로에 통합시켜 일괄공정에 의해 소자를 제작할 수 있다. 특히, MEMS 기술을 이용하여 제작된 마이크로 볼로미터는 작은 열용량(thermal capacity)을 가지는 효과적인 열적 고립구조(thermal isolation structure)의 형성이 용이하며 회로와의 monolithic한 제조공정을 사용함으로써 저가로 제작이 가능하다<sup>[56]</sup>.

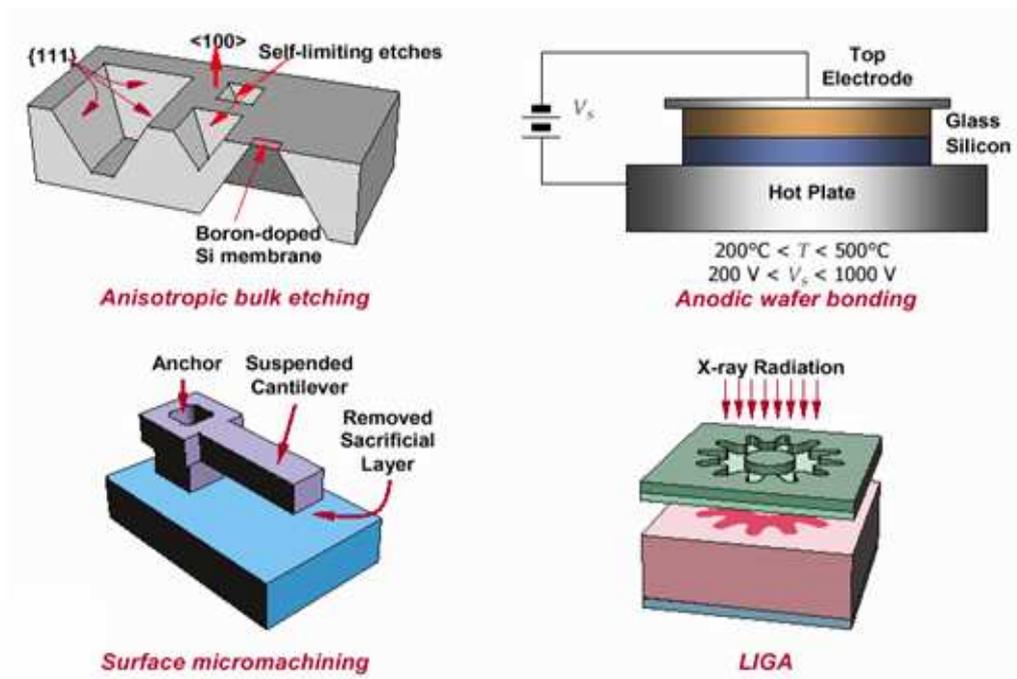


Fig 3.1 MEMS technology

제 3.2 절 열적 고립을 위한 뜯 구조위에 형성된  $\lambda/4$  공진 흡수 구조

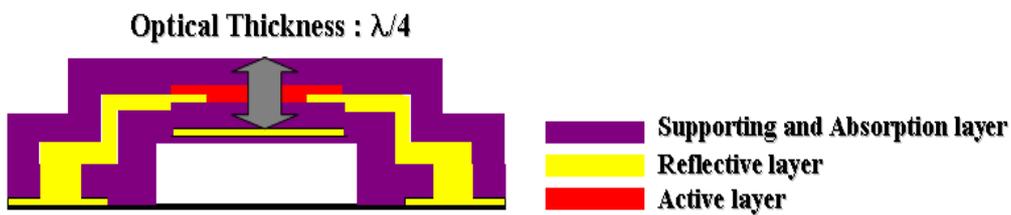


Fig 3.2  $\lambda/4$  structure of  $\text{CO}_2$  detecting microbolometer

표면 미세가공 기술을 이용하여 제작된 뜬(floating) 구조에 기초한  $\lambda/4$  공진 흡수를 이용하는 볼로미터는 처음에 인체 감지용 열상 장비에 이용하기 위해 개발되었다<sup>[32]</sup>. 이때  $\lambda$ 는 광원에서 방사하는 파장을 말하며 인체에서 방사하는 적외선 파장이 약  $10\mu\text{m}$ 이므로 기존의 인체 감지용 볼로미터는  $2.5\mu\text{m}$  높이로 뜬 구조를 갖는다.

본 논문에서는 이 원리를 이용하여 이산화탄소 흡수 피크 파장인  $4.26\mu\text{m}$ 의  $\lambda/4$  공진 흡수 구조를 제작하는 방법을 제안하였다. 그러나 기존의 방법은 반사층(reflecting layer)을 뜬 구조 밑에 두어 뜬 높이가  $\lambda/4$ 가 되게 제작되는데 이는 구조층(supporting layer) 및 감지층(active layer)의 광학적 두께를 고려하지 않아 실제 두께에 굴절율을 곱한 값인 광학적 두께는 더 증가하게 되어 흡수율이 오히려 감소한다. 또한 공정상에서 발생하는 스트레스 등으로 인해 구조가 뒤틀릴 경우 흡수율이 오히려 더 감소하는 경향을 보인다<sup>[57]</sup>.

따라서 본 연구에서는 열적 고립 구조(thermal isolation structure)를 위해 형성된 뜬 구조위에 반사층, 구조층으로 사용되는 흡수층(absorption layer) 그리고 감지층을 형성하여 흡수층과 감지층의 총 광학적 두께가  $\lambda/4$ 인 공진 흡수 구조를 제안하였다. 이 방법은 공정상에서 발생할 수 있는 구조적인 결함에 덜 민감하고 spectrometer에 의해 미리 알고 있는 이산화탄소를 비롯하여 측정하고자 하는 여러 가스의 흡수 피크 파장에 따라 흡수층과 감지층(특히 흡수층)의 광학적 두께를 쉽게 계산하여 제작할 수 있다. 따라서 각각의 가스 측정에 적합한 최대의 적외선 흡수 특성을 보이는 적외선 감지기를 제작할 수 있는 장점을 가지게 된다.

### 제 3.3 절 표면 미세가공 기술에 의한 $CO_2$ 감지용 마이크로 볼로미터 제작

본 연구에서 제작한 표면 미세가공(surface micromachining) 기술을 이용한  $CO_2$  감지용 마이크로 볼로미터 제작 공정은 Fig 3.3과 같고 다음은 이에 대한 각 과정을 설명하였다.

1. 기관으로 사용되는 실리콘 웨이퍼에 절연층으로 사용할 질화실리콘( $SiN_x$ ) 박막을 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 약 3000Å 정도 증착 후 열적 고립 구조 형성을 위해 사용될 희생층으로 비감광성(Non-photosensitive) 폴리이미드(polyimide)를 사용하였다. 뜯 구조체 제작 시 희생층의 역할은 기본적으로 뜯 공간의 확보 및 그 위에 형성되는 구조체의 후속 공정을 위한 기저층 형성을 목적으로 한다. 또한 희생층의 형상에 따라서 최종 구조체의 기계적 안정성과 후속 공정의 편리성을 좌우한다. 따라서 희생층 재료의 선택과 그 형상은 매우 중요하고 희생층 선택 시 고려되어야 할 주요 인자로는 뜯 구조체 형성을 위해 희생층의 제거가 용이하고 구조체의 다른 재료와의 식각 선택비가 크고 형상을 쉽게 조절할 수 있는 재료가 우선적으로 선택되어야 한다. 이런 조건을 만족시키는 물질로 폴리이미드를 사용하였다.

폴리이미드는 curing 조건에 따라서 접착력과 식각 특성이 크게 영향을 받는데 낮은 온도에서 curing된 경우 불완전한 이미드화에 의해서 기관과의 접착력이 크게 저하되며 식각 시 부유물이 남는 경향을 보인다. 높은 온도에서의 curing이나 과한 curing 시간은 폴리이미드를 경화시켜 식각률이 저하되는 현상이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 과도한 응력 조절과 적절한 이미드화를 위해 프로그램이 가능한 대류식 오븐에서 4°C/min의 속도로 curing 온도를 천천히 증가시켜 300°C에서 30분간 유지한 후 이와 같은 속도로 상온으로 온도를 내리는 방법을 사용하였다.

폴리이미드의 미세 패턴 형성은 RIE(Reactive Ion Etch) system을 이용하여 건

식 식각을 수행하였다. 이 때 형성된 패턴 측면 벽의 기울기는 최종적으로 희생층 제거 후 구조체의 지지다리(supporting legs) 형상을 만들므로 완만한 측면벽 경사는 지지다리의 기계적 안정성을 개선 할 수 있으며 후속 공정인 금속 증착과 식각 공정시의 금속이 단락되는 것을 방지할 수 있다. 폴리이미드의 RIE에 의한 등방성 식각에서 발생하는 under-cut현상은 구조체 지지다리의 형상에 그대로 남고 이 현상에 의한 과도한 응력 집중은 구조체가 뒤틀리게 하는 원인이 된다. 이런 문제점을 해결하기 위해 의도적으로 경사지게 패턴을 형성한 두꺼운 감광제인 AZ9260을 식각 마스크로 사용하였다.

2. 희생층으로 사용될 폴리이미드 위에 입사되는 적외선을 반사할 반사층(Reflection layer)을 형성한다. 반사층으로 사용한 금속은 Cr과 Au이고 RF sputter장비를 이용하여 각각 500Å씩 증착한 후 패턴을 형성하였다. 반사층 총 두께인 1000Å는 10.6 μm 파장의 CO<sub>2</sub> 레이저와 파워미터(powermeter)를 이용하여 측정한 결과 반사율 99%이상으로 반사층으로 사용하는데 충분하였다.

3. 만약 마이크로 볼로미터 구조층이 과도한 잔류응력을 가지고 있다면 구조체의 뒤틀림이나 크랙이 발생할 수 있다. 이와 같은 구조의 불안정성의 완화 및 개선을 위하여 구조층의 응력 조절(stress control)은 부유 구조물 제작에 큰 영향을 미치는 주요 인자가 된다. 또한 희생층과의 식각 선택비(etching selectivity), 소자의 동작을 위해 이미 기관 위에 형성된 검출회로(ROIC)의 열화 방지를 위한 저온 공정의 가능성 등이 구조층 재료를 선택하는 인자가 된다. PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 질화실리콘 박막(SiN<sub>x</sub>)은 전기적으로는 부도체이며 응력 조절과 화학적 보호막으로의 적용이 가능하며 400℃ 이하의 저온에서 증착과 식각이 가능하므로 구조층 재료의 선택 요건을 만족한다. 따라서 본 연구에서는 Plasma Therm Incorporation사의 PECVD 790 시스템을 사용하여 흡수층(Absorption layer) 및 구조층(Structure layer)으로 적용할 질화실리콘 박막을 약 3000Å정도 증착하였다.

4. 전극과 감지층을 연결할 금속선을 형성하기 위해 Cr과 Au를 RF Sputter장비를 이용하여 각각 300Å, 500Å 증착 후 패턴을 형성하였다. 이때 금속선은 지지다리 위에 형성되고 선폭이 3μm로 매우 가늘어 ICP(Inductive Coupled Plasma) RIE 장비를 이용하여 건식 식각을 실시하였다. 이때 폴리이미드의 기울기로 인해 기울기 벽면에 증착된 금속이 남지 않도록 충분한 식각시간을 갖게 하였다.

5. 마이크로 볼로미터의 적외선 감지층으로 사용되는 물질은 높은 TCR(Temperature coefficient of resistance)값, 출력 신호의 감쇠를 줄이기 위한 낮은 소자저항, 작은 잡음특성(1/f잡음, 존슨잡음), IC(Integrated circuit) 공정과의 연계성, 제조 공정의 저렴화 및 단순화, 높은 재현성 등을 갖추어야 한다. 현재 마이크로 볼로미터의 적외선 감지층 재료로 사용되는 것은 Ti 등의 금속, 바나듐 산화막(VOx), Poly-SiGe 등과 같은 반도체(semiconductor) 그리고 YBaCuO같은 초전도체(superconductor)등의 연구가 활발히 진행 중이다<sup>[58-61]</sup>.

바나듐 텅스텐 산화막(V-W-Ox)은 기존의 바나듐 산화막, 비정질 실리콘 등과 비교해서 상온에서 비교적 높은 TCR값과 우수한 잡음 특성을 가지며 동시에 증착 조건 변화에 따라 비저항 값의 조절이 용이하다는 장점이 있다. 뿐만 아니라 기존의 반도체 제조 공정과의 호환 가능성이 높아 마이크로 볼로미터 적외선 감지층 재료로 우수한 특성을 가진다<sup>[62]</sup>.

본 연구에서는 바나듐과 텅스텐이 각각 97:3의 비율로 혼합된 타겟을 이용하여 RF Sputter를 이용하여 약 100Å 정도 증착한 후 대류식 오븐에서 300°C의 온도로 열에 의한 산화 과정을 통해 바나듐 텅스텐 산화막을 제작하였고 열처리 시간에 따른 온도와 저항 변화에 대한 그래프는 Fig 3.4과 같다. 이때 30분 열처리한 시편의 TCR은 -2.69%/°C(25°C 기준)이고 60분 열처리한 경우 -3.25%/°C로 TCR값은 개선되는 경향을 보이지만 저항이 30분 열처리한 것보다 크게 나와 볼로미터 저항에 따른 존슨잡음이 증가한다. 따라서 열처리 시간에 따른 TCR값과 온도에 따른 저항값을 적절히 trade off시켜 볼로미터의 응답도 및 감지도를 최적화시킬 수 있도록 조건을 찾아야 한다. 본 연구에서는 40분간 열처리한 바나듐 텅스텐 산

화막을 제작하였고 이때 TCR은  $-3.01\%/^{\circ}\text{C}$  이었다.

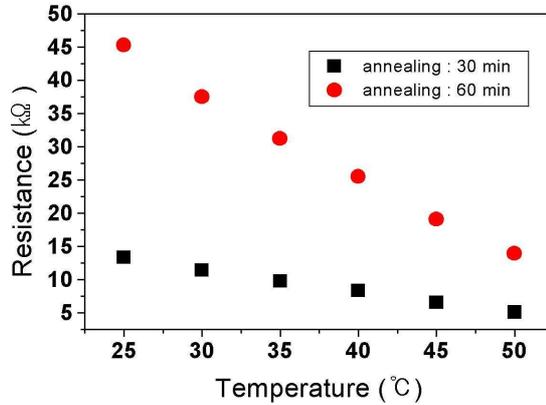


Fig 3.4 temperature by annealing time vs resistance in  $V_{0.97}W_{0.03}$

6. 2절에서 설명한  $\lambda/4$  공진 흡수 구조를 형성하기 위해 반사층 위에 형성된 질화실리콘 박막과 감지층으로 사용한 바나듐 텅스텐 산화막을 광학적 두께를 계산하여 증착하여야 한다. 이산화탄소 흡수 피크 파장인  $4.26\mu\text{m}$ 의  $\lambda/4$ 는 약  $1\mu\text{m}$ 이고 질화실리콘 박막의 굴절율인 1.7을 고려하여 계산하면 실제 증착되는 두께는 약  $6000\text{\AA}$ 가 되어야 한다. 과정 3에서 증착한  $3000\text{\AA}$ 의 질화실리콘 박막에 같은 방법으로  $3000\text{\AA}$ 의 질화실리콘 박막을 증착한 후 RIE를 이용하여 패턴을 형성하였다. 이때 희생층이 있는 바닥까지 충분히 식각을 하여 다음 과정인 ashing에서 가스 침투를 용이하게 한다.

7. 희생층 제거는 뜯 구조의 안정화를 위해 건식 방법인 산소 라디칼을 이용하는 마이크로 웨이브 asher를 이용하였으며 벽면 ashing이 이루어져 희생층이 제거되는 조건을 확립하여 수행하였다. ashing시 질소의 첨가가 벽면 ashing에 기여하는 것을 확인하였으며 높은 플라즈마 파워(400W)로 인한 온도상승으로 전극으로 사용된 금속에 피해를 방지하기 위해 시간을 짧게 여러 번 반복하여 수행하였다.

최종적으로 ashing된 마이크로 볼로미터의 주사전자현미경(SEM) 사진은 Fig

3.5와 같다. 희생층으로 사용한 폴리이미드가 완전히 제거가 되었음을 알 수 있다. 또한 폴리이미드 패턴 형성시 적절한 기울기를 주어 과도한 응력 집중을 막아 뜯 구조가 뒤틀림 없이 형성되었고 금속선 역시 패턴 형성 시 잘 연결되었음을 확인할 수 있다.

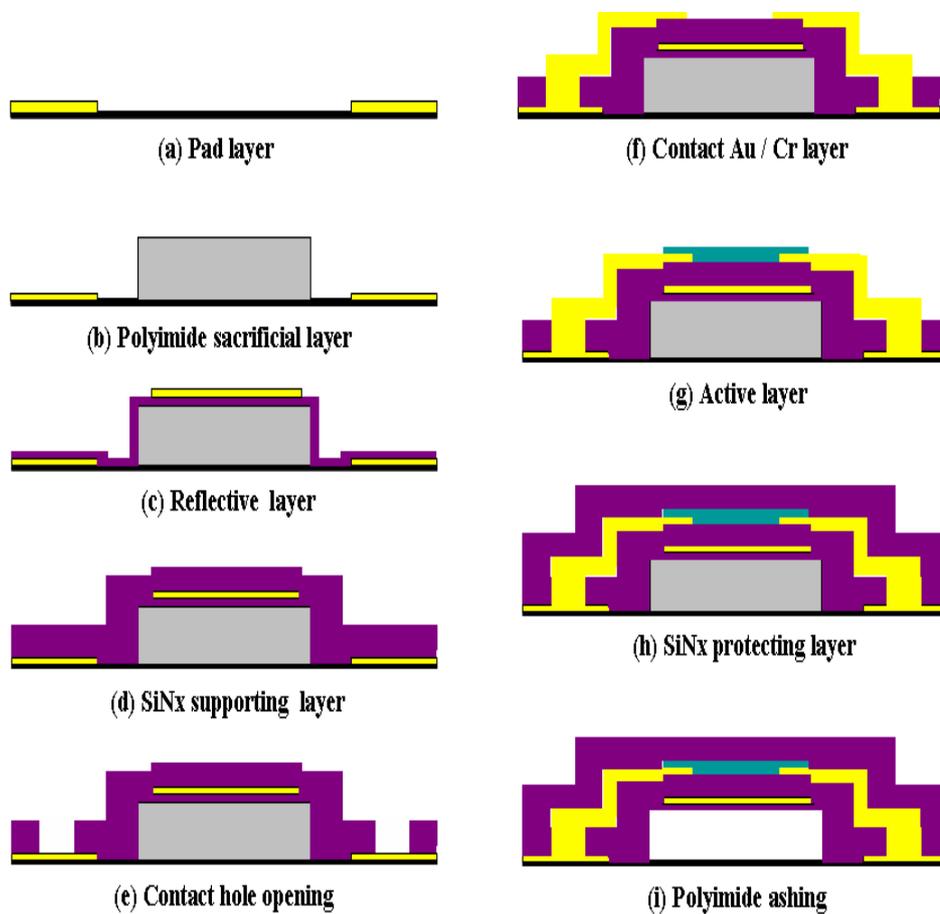


Fig 3.3 Schematic of microbolometer fabrication process

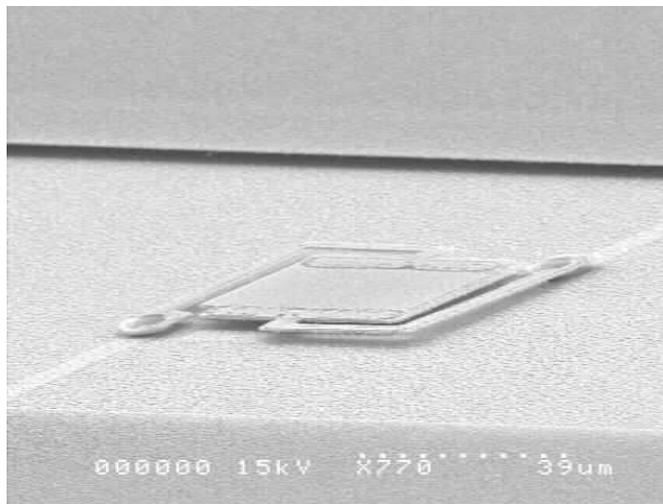
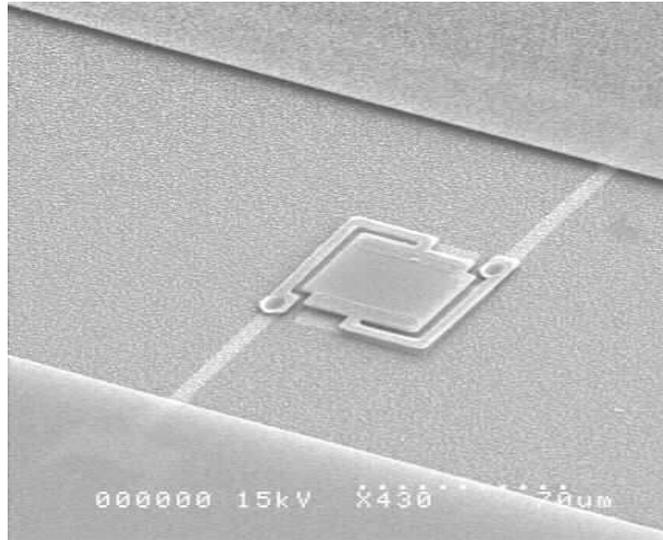


Fig 3.5 SEM image of the fabricated microbolometer

## 제 4 장 기준신호를 제공하는 이산화탄소 필터 칩( $CO_2$ Filter Chip)

### 제 4.1 절 이산화탄소 필터 칩의 유용성

Fig 4.1은 본 연구에서 제안한 집적화된 이산화탄소 센서의 도식도와 센서를 이루는 각각의 유닛에서의 신호변화를 나타낸 그림이다. 이산화탄소 센서는 광원, 이산화탄소 필터 칩, 이산화탄소가 포함된 측정대상 가스를 흘려보내는 튜브, 대역필터, 감지기의 순서로 집적화 되어 있고 이산화탄소 필터 칩을 이용해 기준신호를 만들기 위해서는 순수한 이산화탄소를 채운 공동(cavity)부분과 그렇지 않은 부분 모두 적외선 광원을 통과하게 된다. 이 때 공동을 통과한 적외선은 이산화탄소에 의해 이산화탄소 흡수 피크 파장인  $4.26\mu m$  근처에서 "pre-absorption"이 일어난다. Fig 4.1에서 보듯이 측정하고자 하는 가스에 포함된 이산화탄소의 농도에 따라 흡수되는 적외선은 공동을 통과한 값에 영향을 거의 주지 못하고 대역필터를 통과해 감지기에 감지되는 적외선의 세기는 오직 "pre-absorption"에 의해서만 영향을 받는다. 따라서 광원의 드리프트에 상관없이 같은 비율로 측정 신호와 기준 신호를 얻을 수 있으며 측정대상 가스에 포함된 수증기 및 기타 오염물질의 영향을 거의 받지 않으며  $4.26\mu m$ 에서 흡수 특성을 보이는 오염물질이 포함되어 있다고 하더라도 측정 신호와 기준 신호는 같은 비율로 감소하므로 오직 이산화탄소에 의한 신호만을 감지할 수 있는 장점이 있다.

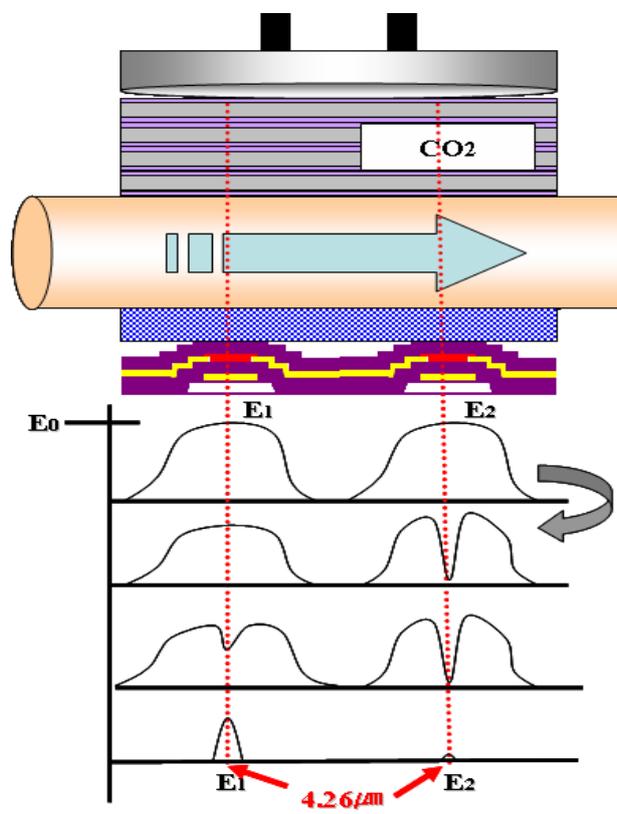


Fig 4.1 Schematic of a proposed CO<sub>2</sub> sensor and signal change on each unit

## 제 4.2 절 antireflective coating

본 연구에서 제작된 이산화탄소 필터 칩은 실리콘 기판으로 제작되고 적외선이 이를 통과하는 구조로 되어 있다. 따라서 이산화탄소 농도를 측정하기에 충분한 광량을 얻기 위해 가능한 한 광원에서 나온 적외선의 투과율이 높아야 한다. 그러나 공기에서 실리콘 기판( $n=2.43$ )까지의 굴절률이 큰 차이를 보이기 때문에 적외선이 입사되는 표면에서 높은 반사 손실이 있다<sup>[63]</sup>. 본 연구에서는 이런 손실을 최소화하기 위해 실리콘 기판에 antireflective coating layer을 기판 양면에 코팅을 실시하였다. 코팅 물질로는 PECVD로 증착한 질화실리콘 박막(SiNx)를 사용하였다.

한 종류의 antireflective layer가 양면에 코팅된 실리콘 기판의 경우, 방사된 적외선은 air( $n_{air}$ ), coating( $d,n$ ), silicon( $n_{si}$ ), coating( $d,n$ ) 그리고 air의 순서로 매개체를 통과한다. 이런 층에서 어떤 흡수도 없고 방사된 적외선이 표면에 수직으로 들어온다면 투과도는 식 (4-1)에 의해 계산할 수 있다<sup>[64]</sup>.

$$T_{total} = \left[ 1 - \frac{(n_{si}n - n_{air}n)^2 \cos^2(2\pi nd/\lambda) + (n^2 - n_{air}n_{si})^2 \sin^2(2\pi nd/\lambda)}{(n_{si}n + n_{air}n)^2 \cos^2(2\pi nd/\lambda) + (n^2 - n_{air}n_{si})^2 \sin^2(2\pi nd/\lambda)} \right]^2 \quad (4-1)$$

$d$  : the thickness of the antireflective coating film

$n$  : the reflective index of the antireflective material

$n_{air}$  : the reflective index of air( $n_{air}=1$ )

$n_{si}$  : the reflective index of silicon( $n_{si}=3.43$ )

$\lambda$  : the wavelength of the infrared light passing through the media

SiNx의 두께를 다양하게 하여 이산화탄소 흡수 피크 파장인  $4.26 \mu\text{m}$ 에서 최대의 투과율을 갖는 코팅 두께를 식 4-1을 통해 미리 예상해 볼 수 있다. Fig 4.2는

PECVD로 증착한 SiNx의 굴절율 1.7과 입사하는 적외선 파장을  $4.26\mu\text{m}$ 로 하면 최대 투과율이 SiNx의 두께가  $0.6\mu\text{m}$ - $0.63\mu\text{m}$ 에서 관찰되는 SiNx의 두께의 함수로써 투과 응답을 보여준다. 이 예상값을 바탕으로 SiNx를  $0.62\mu\text{m}$  증착하여 antireflective layer로 사용하였다. Fig 4.3은 투과율이 다른 두께를 갖는 SiNx에 대한 파장의 함수로서 그래프를 나타낸 것이다. 이 그래프는 원하는 파장대에서 antireflective coating 물질 두께를 최대의 투과율을 얻기 위해 조정할 수 있다는 것을 보여준다. 예를 들어  $7\mu\text{m}$ 대의 파장대에서는 최대의 투과율은 SiNx  $1\mu\text{m}$ 의 두께에서 얻을 수 있다. 이것은 antireflective coating이 이산화탄소 외에 다른 가스의 필터로 사용될 수 있는데 이는 다른 파장대에서 흡수 피크를 가지기 때문에 본 연구에서 제안한 가스 필터 칩은 여러 가지 가스 분석기에 쉽게 적용할 수 있다는 장점을 가진다는 것을 의미한다.

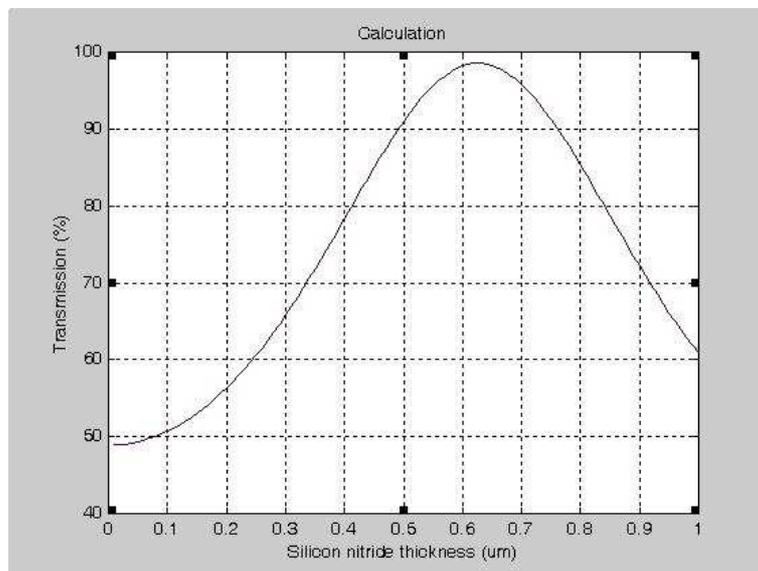


Fig 4.2 The calculated transmission rates through a  $500\mu\text{m}$  thick silicon wafer coated with different thickness of SiNx, at the wavelength  $\lambda = 4.26\mu\text{m}$

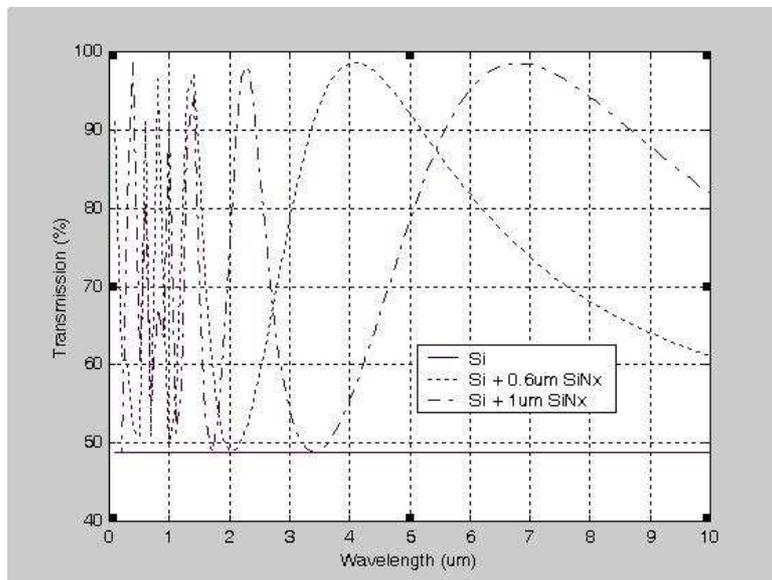


Fig 4.3 The calculated transmission rates vs wavelength through a  $500\ \mu\text{m}$  thick silicon wafer coated with different thickness of SiNx

### 제 4.3 절 실리콘 몸체미세가공 기술을 이용한 이산화탄소 필터 칩 제작

본 연구에서 제작한 이산화탄소 필터 칩은 센서 시스템에서 사용될 광원의 크기를 고려하여 제작하였으며 공동(cavity)안에 채울 이산화탄소의 압력을 조절하기 위해 입구와 출구를 마스크 설계시 고려하여 시제품(prototype) 형태로 제작하였다. Fig 4.4는 제작한 이산화탄소 필터 칩의 공정도로 다음은 이에 대한 각각의 과정을 설명하였다.

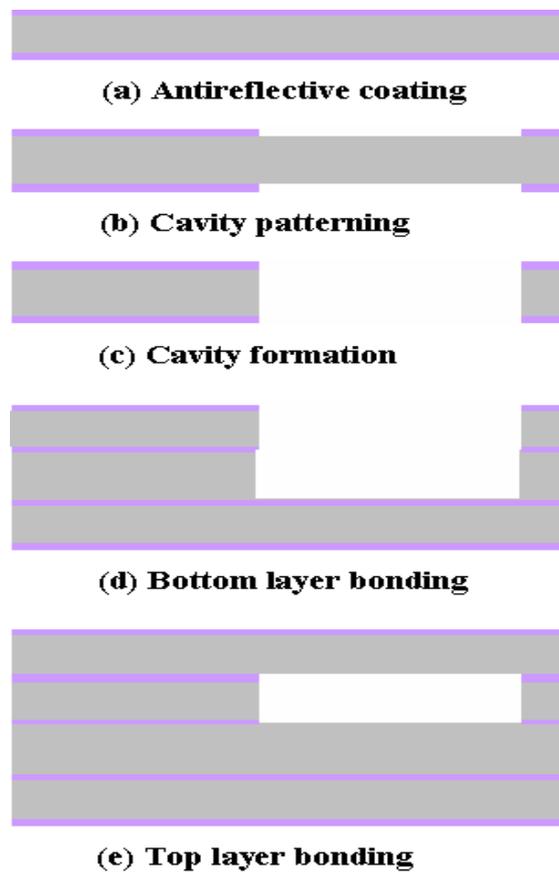


Fig 4.4 CO<sub>2</sub> filter chip fabrication process

1. 양면을 polishing한  $500\mu\text{m}$  두께의 실리콘 기판에 antireflective coating 물질로 사용할 질화실리콘 박막을 1절에 설명한 내용을 바탕으로 PECVD장비를 이용하여  $6200\text{\AA}$  정도 증착한다. 이 때 총 4장의 실리콘 기판에 이 과정을 반복하여 제작한다.
2. 이산화탄소를 채울 부분에 포토리소그래피 공정에 의해 패턴을 형성한 후 RIE를 이용하여 공동이 위치할 부분의 질화실리콘 박막을 식각하였다.
3.  $500\mu\text{m}$  두께의 실리콘 기판에 공동을 형성하기 위해 건식 식각 장비인 STS사의 Deep-RIE장비를 이용하여 이방성(anisotropic) 식각을 실시하였다. 이 때 1 과정에 제작한 실리콘 기판 중 한 개의 실리콘 기판을 2 과정을 동시에 실시하여 두 장의 실리콘 기판에 공동을 형성한다.
4. 3과정에서 형성한 두 장의 실리콘 기판과 1과정에서 형성한 실리콘 기판을 실리콘 본딩용 에폭시(epoxy)인 M-BOND 610 ADHESIVE를 이용하여 본딩한다. 이 에폭시를 접합면에 바른 후 열판(Hot Plate)에서 약  $175^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 1시간가량  $1\text{Pa}$ 이상의 압력으로 본딩한다. 이때 이산화탄소를 채울 공동 부분이 정렬되어 본딩이 이루어지도록 하기 위해 공동 부분 패턴을 형성한 마스크(mask)에 정렬키(Alignment key)를 넣어 각각의 소자로 절단(dicing)하기 전에 이 정렬키에 의해 정렬한 후 본딩을 하는 방법을 사용하였다.
5. 공동 부분을 덮을 실리콘 기판을 본딩하였는데 이때 이산화탄소 환경하에서 본딩을 하는 방법으로 실리콘 본딩용 에폭시를 사용하는 대신 anodic boning이나 fusion bonding시 순수한 이산화탄소가 채워져 있는 챔버(chamber)에서 본딩을 실시하는 방법이 있다. 본 연구에서는 Fig 4.5와 같이 이산화탄소가 들어가고 나갈 수 있는 Inlet부분과 Outlet부분을 공동 부분 패턴 형성에 포함하여 Deep-RIE에 의해 공동이 형성될 때 같이 형성되게 하고 그 부분에 이산화탄소를 주입하고 내보낼 통로로 사용할 바늘(needle)을 sealing용 에폭시로 고정한 후 공동 부분을

덮을 실리콘 기판을 실리콘 본딩용 에폭시를 이용하여 본딩하였다. 그리고 마지막으로 채워진 이산화탄소가 새어나가지 않게 하기 위해 집합면 주위를 sealing용 에폭시를 이용해 고정하였다. Fig 4-6은 위와 같은 방법으로 실제 제작된 이산화탄소 필터 칩의 사진이다.

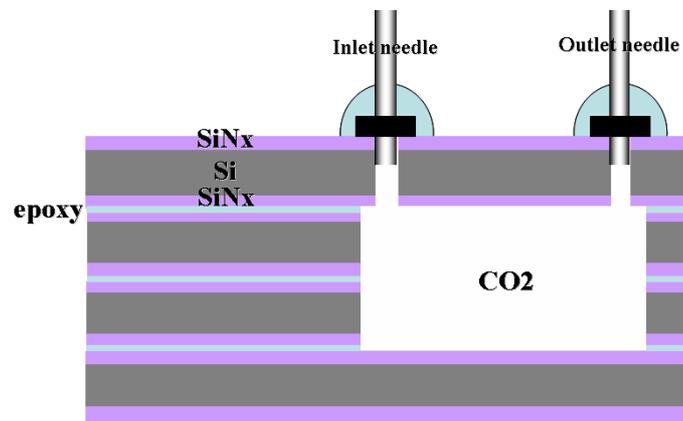


Fig 4.5 Schematic of CO<sub>2</sub> filter chip

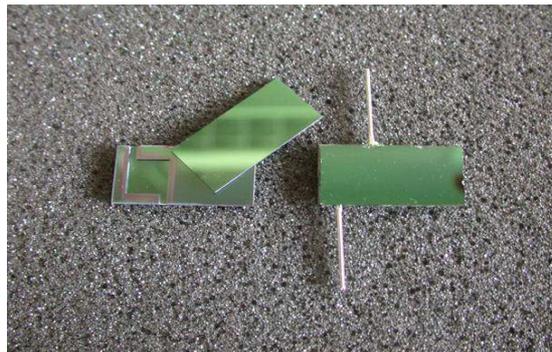


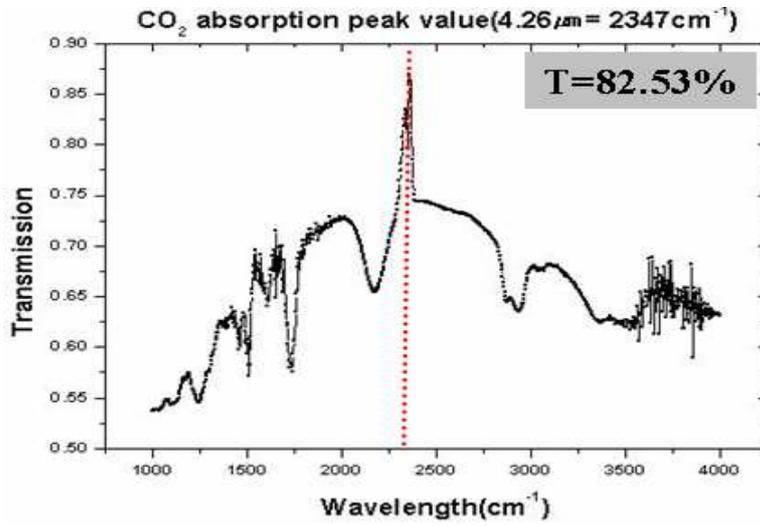
Fig 4.6 Optical image of CO<sub>2</sub> filter chip

## 제 4.4 절 이산화탄소 필터 칩의 특성 평가

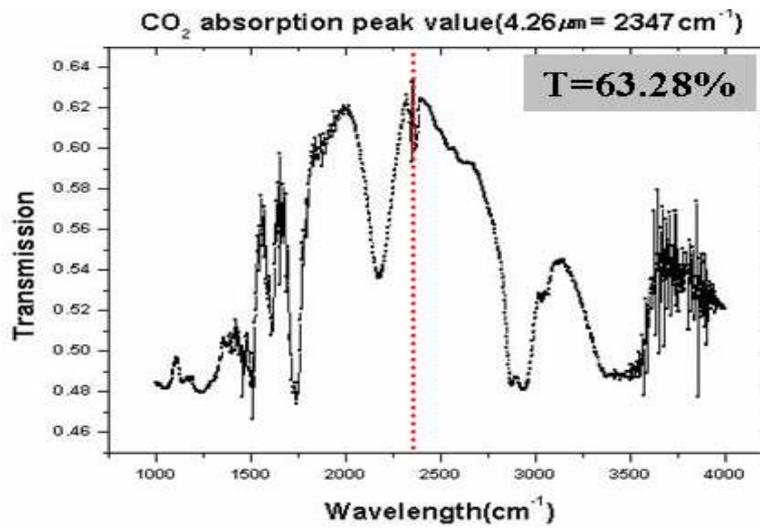
제작된 이산화탄소 필터 칩은 이산화탄소가 채워진 부분과 채워지지 않는 부분 모두 적외선을 통과하여야 한다. 이때 적외선 광원에서 나온 에너지가 감지기에서 신호를 얻기 충분하도록 최대한 투과하여야 하고 이산화탄소가 채워진 부분은 기준신호를 제공하기 충분하도록 이산화탄소가 채워져  $4.26\mu\text{m}$  파장에서 최대한 흡수해야 한다.

Fig 4.7은  $0.62\mu\text{m}$ 의 코팅 두께를 갖는  $\text{SiNx}$ 를 양면 polishing된 실리콘 기판에 증착한 한개의 층과 광학적 특성이 좋은 실리콘 본딩용 에폭시(epoxy)인 M-BOND 610 ADHESIVE로 본딩한 네 개의 층으로 된 실리콘 웨이퍼의  $4.26\mu\text{m}$ 에서의 투과율을 BRUKER사의 IFS28 FTIR(Fourier Transform Infrared) spectrometer를 이용하여 측정한 그래프이다. Fig 4.2의 그래프는 흡수율을 고려하지 않은 투과율에 의한 값으로 Fig 4.7(a)의 그래프에서 약 85%의 투과율을 보이는 것으로 보아  $2-5\mu\text{m}$  파장대 적외선의 반사율, 투과율 특성이 우수한 물질인 실리콘은 본 논문에서 제안한 이산화탄소 필터 칩을 제작하는데 적합한 물질임을 알 수 있다<sup>[65]</sup>. Fig 4.7(b)는 이산화탄소가 채워지지 않은 부분인 4개의 antireflective coating된 실리콘의  $4.26\mu\text{m}$  파장에서의 투과율을 나타낸 것으로 감지기에서 신호를 얻기에 충분히 투과됨을 알 수 있다.

Fig 4.8은 이산화탄소의 압력에 따른  $4.26\mu\text{m}$  파장에서의 투과율을 FTIR spectrometer로 측정한 그래프를 나타낸 것으로 챔버안에서 이산화탄소의 압력이 크면 클수록 많은 이산화탄소가 챔버안에 포함되므로 결국  $4.26\mu\text{m}$ 에서 흡수가 커짐을 알 수 있다. Fig 4.8(a)는 0.5 bar의 압력으로 이산화탄소가 채워진 챔버를 통과한 적외선의  $4.26\mu\text{m}$  파장에서의 투과율이고 Fig 4.8(b)는 1 bar의 압력으로 이산화탄소가 채워진 챔버를 통과한 적외선의  $4.26\mu\text{m}$  파장에서의 투과율을 나타낸 그래프로 채워진 이산화탄소의 압력에 따라  $4.26\mu\text{m}$  파장에서 더 많은 흡수가 일어남을 알 수 있다.



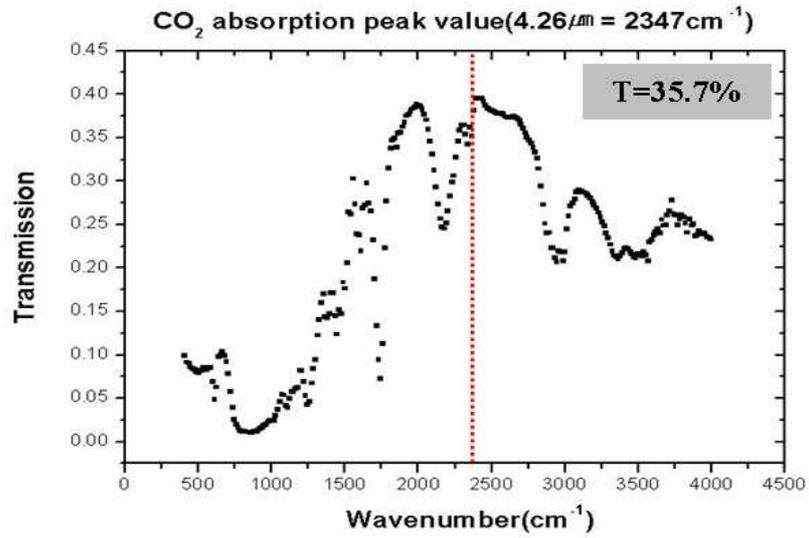
(a)



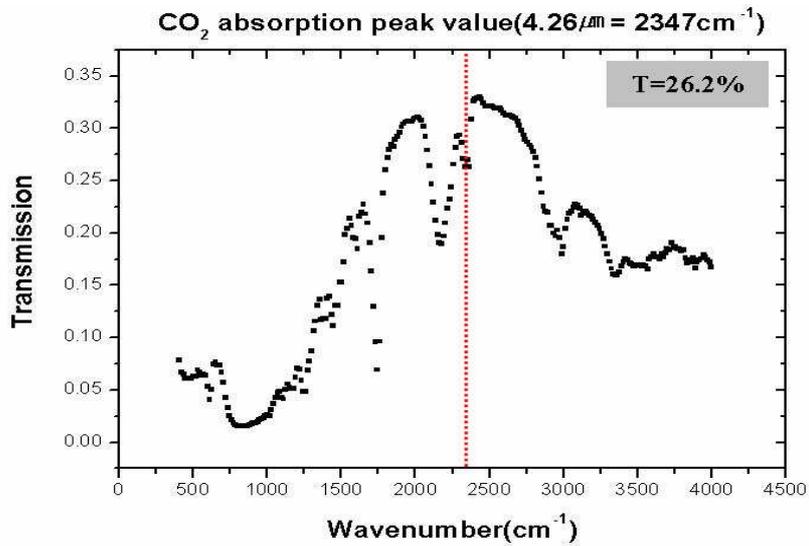
(b)

Fig 4.7 Transmission vs Wavelength using FTIR spectrometer

(a) 1 layer (b) 4 layers



(a)



(b)

Fig 4.8 Transmission vs Wavelength using FTIR spectrometer

(a) 0.5 bar (b) 1 bar

## 제 5 장 마이크로블로미터 특성 평가

### 제 5.1 절 마이크로블로미터 특성 측정용 시스템 구성

마이크로 블로미터의 적외선 감지특성 평가 시 소자의 항온 유지와 외부 배경과의 열 교환에 따른 열 요동(thermal fluctuation)을 제거하는 것이 중요하므로 본 연구에서는 Fig 5.1과 같이 항온 유지를 위한 TE(Thermo-Electric) cooler와 window가 장착된 진공 패키지(vacumn package)를 제작하여 소자의 성능 평가를 수행하였다. 이런 진공 패키지는 Rotary Pump 시스템과 연결되어 10 mTorr 이하의 진공도에서 유지될 수 있으므로 블로미터의 열 손실은 복사와 대류에 의한 것은 제거되며 소자와 기판 사이의 지지다리에 의한 열전도에 의한 것으로 한정시킬 수 있다는 장점이 있다.

패키지 안의 블로미터가 위치할 스테이지 밑면에는 TE cooler가 연결되어 있어서  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  이하의 편차를 갖도록 온도를 유지할 수 있다. TE cooler는 Peltier효과를 이용한 고체식 열펌프(solid state heat pump)라고 할 수 있고 본 연구의 package에서는 실리콘 PN junction을 이용하여 순방향 바이어스에서는 전자-정공쌍(electron-hole pair)이 생성되면서 열이 발생하게 되고 역방향 바이어스에서는 소멸되면서 열을 빼앗아갈 수 있도록 하였다. 따라서 소자를 설정된 일정 온도로 유지할 수 있도록 내장된 온도 센서의 출력 값에 따라서 역방향 또는 순방향 신호가 가해지고 cooler가 동작한다. 입사된 적외선의 정확한 광량 평가와 이산화탄소 흡수 피크 파장인  $4.26\mu\text{m}$  근처에서의 방사된 적외선만 필요하므로 배경으로부터의 임의의 적외선 복사를 제한하기 위해 적외선이 조사되는 방향에 소자가 위치한 진공 패키지 앞면에 이산화탄소 흡수 피크 파장인  $4.26\mu\text{m}$ 에서 대역폭 180nm을 갖고 90%이상 투과율을 보이는 대역필터를 window로 사용하였다. Fig 5.2는 마이크로 블로미터의 적외선 검출특성 평가를 위하여 제작된 진공 패키지의 광학 사진이다.

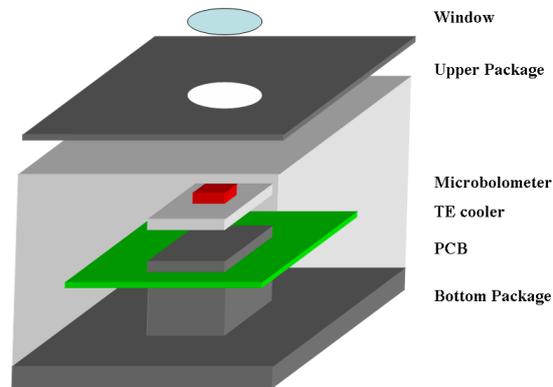


Fig 5.1 Schematic diagram of vacuum package for IR measurement

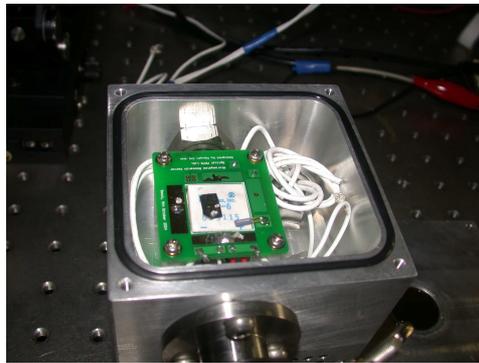


Fig 5.2 Optical image of the vacuum package

Fig 5.3은 볼로미터의 적외선 검출특성 평가를 위한 기본적인 측정시스템의 구성을 보여준다. 입사하는 적외선 광량을 정확하게 규정하기 위한 방법으로 적외선 방사율(emissivity)이 거의 1에 가까운 흑체(blackbody)를 적외선 광원으로 사용하였다. 따라서 흑체의 온도가 설정되면 적외선의 광량을 Plank 복사 법칙에 따라서 계산할 수 있다. 본 연구에서는 광원으로 Graseby Infrared 사의 모델 563 black body source(BBS)를 사용하였다. BBS로부터 조사되는 적외선은 일정 크기를 가지는 aperture를 통과하는데 이 때 볼로미터의 감지층에 입사되는 적외선 광량을 증가시키기 위해  $0.6\mu\text{m} - 20\mu\text{m}$ 의 적외선 파장에서 70%이상의 투과율을 보이는 ZnSe(Zinc Selenide) 렌즈를 사용하였다. 시스템 구성 시 정확한 광량 계산

을 위해 BBS와 ZnSe 렌즈 그리고 볼로미터의 정확한 정렬(alignment)과 ZnSe 렌즈의 초점거리 등 거리 측정이 중요하다.

BBS를 통해 발산하는 적외선이 BBS의 aperture를 통과해 초퍼(chopper)에 도달하면 초퍼 블레이드(chopper blade)에 의해 적외선의 주파수가 변하고 초퍼의 주파수에 따라 마이크로 볼로미터는 물리적인 양인 저항값이 주기적으로 바뀌게 된다. 즉, 적외선이 초퍼를 통해 입사될 때와 입사되지 않을 때의 저항차이로 발생하는 전압차이를 전치증폭기(pre-amplifier)를 이용하여 증폭함으로써 입사광량에 해당하는 교류신호를 얻을 수 있다.

마이크로 볼로미터는 감지도 측정의 특성을 향상시키기 위해 간이 챔버(chamber)로 진공패키징(vacumn packaging)을 하여 진공에서 적외선을 감지하도록 한다. 센서에서 나온 전압은 전치증폭기를 통과하면서 impedance matching을 하여 잡음 레벨이 센서와 동일하게 만들어준다. 이때 전치증폭기는 바이어스 컨트롤러에 연결하여 필요한 바이어스를 가해준다. 이 증폭된 신호는 lock-in amplifier로 입사되어 주 증폭이 이루어지고 이로부터 잡음전압, 신호전압 등의 측정이 행하여진다. 신호전압의 측정은 초퍼의 주파수와 동일한 주파수에서 얻어지며 이는 초퍼의 주파수를 기준(reference)로 lock-in amplifier에 입력함으로서 얻어지고 잡음전압은 lock-in amplifier의 내부 oscillator를 이용하여 측정한다.

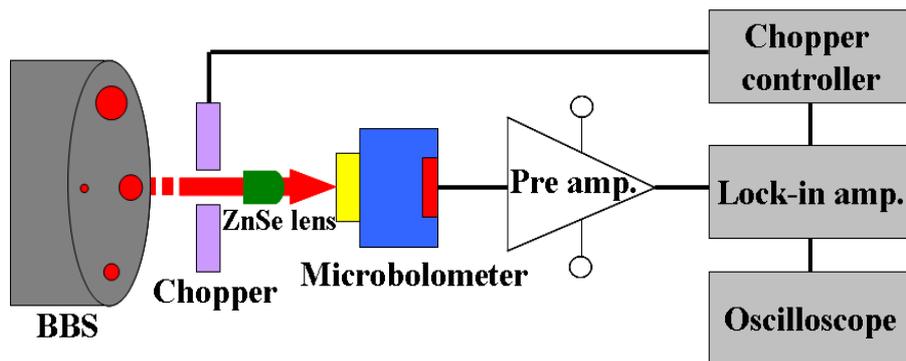


Fig 5.3 Measurement system for measuring IR detecting characteristics

## 제 5.2 절 이산화탄소 감지용 마이크로블로미터의 적외선 감지 특성 평가

블로미터의 적외선 감지 특성 평가를 위하여 앞 절에서 기술된 BBS를 포함한 측정 시스템을 사용하여 블로미터의 잡음, 신호전압 및 광량을 측정하여 그에 대한 응답도와 감지도 특성을 측정하였다.

### 5.2.1 열전도도( $G_c$ ) 측정

제작된 블로미터의 열전도도는 소자에 직류전류를 흘리고 저항을 측정함으로써 구할 수 있다. 소자에 직류전류( $I_b$ )를 흘리면 소자의 온도가 정상상태에 이르렀을 때 다음과 같이 구할 수 있다<sup>[31]</sup>.

$$G_c \Delta T = R I_b^2 \quad (5-1)$$

식 (2-6)과 식 (5-1)로부터 식 (5-2)와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} - \frac{\alpha}{G_c} I_b^2 \quad (5-2)$$

따라서 소자에 여러 직류전류를 걸고 그 때의 저항을 측정하면 식 (5-2)에 의해  $\frac{\alpha}{G_c}$  값을 알 수 있고 TCR을 측정하면 열전도도를 알 수 있다. TCR은 Fig 5.4와 같이 -3.01 %/K이고 대기중에서와 진공중(5mTorr 이하)에서의 열전도도를 측정 한 결과는 Fig 5.5와 같이 각각  $6.93 \times 10^{-6} (W/K)$ 와  $9.22 \times 10^{-7} (W/K)$ 로서 이는 대기중에서는 공기에 의해 기판으로 빠져나가는 열이 지지다리에 의해 열전

도에 의해 빠져나가는 열보다 크며 따라서 대기중에서의 전도는 소자의 감지도에 영향을 끼침을 알 수 있다. 따라서 마이크로볼로미터는 진공 패키징을 하는 것이 소자 성능을 향상시킬 수 있다.

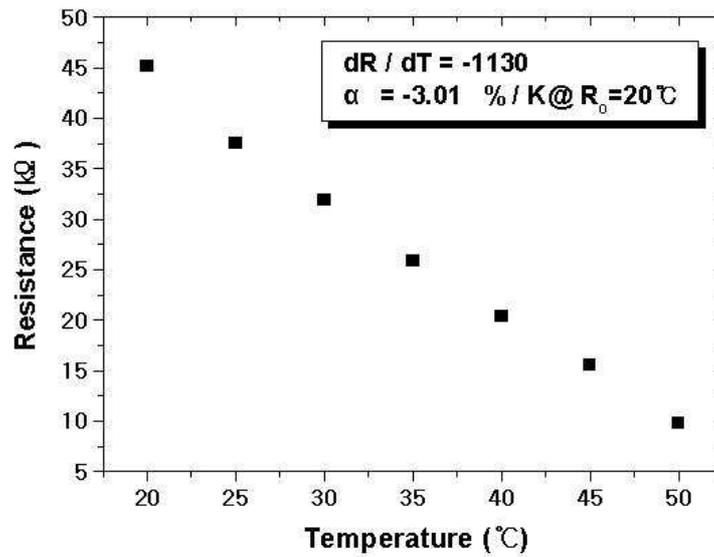
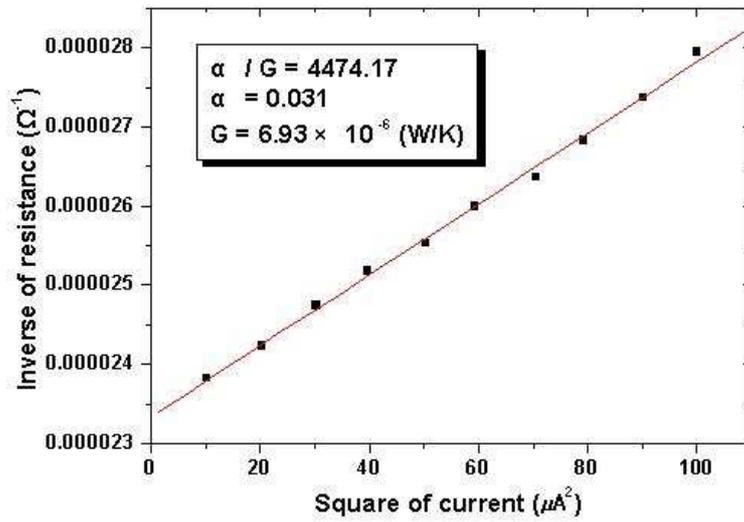
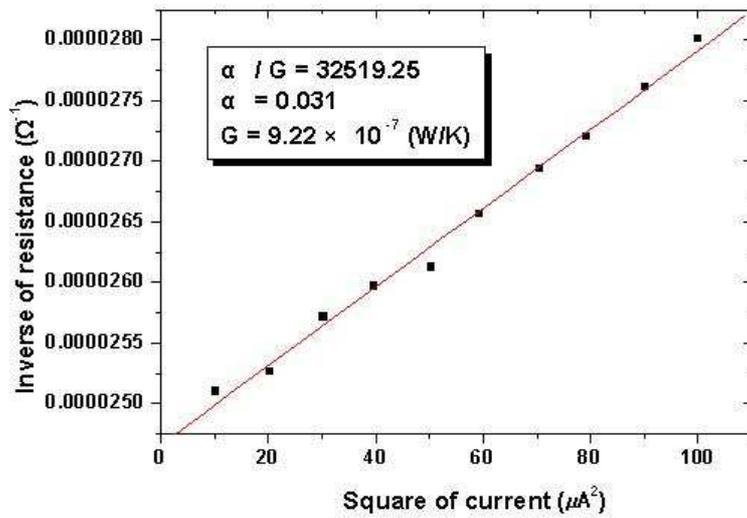


Fig 5.4 Temperature vs Resistance of fabricated microbolometer



(a)



(b)

Fig 5.5 Thermal Conductance measurement

(a) in air (b) in vacuum (below 5 mTorr)

## 5.2.2 잡음전압 및 신호전압 측정

잡음전압은 주파수의 증감에 따라 다른 값을 가지고 일정 주파수 대역에서 우세하게 작용하는 잡음이 존재한다. 소자 작동과 특성에 중요한 영향을 미치는  $1/f$  잡음은 소자 보호막의 성능에 의해 좌우되며 보호막의 밀도(density)변화에 따라  $1/f$  잡음이 우세하게 되는 주파수 대역도 변화한다. 즉, 보호막 표면의 trap density가 크면  $1/f$  잡음이 우세한 영역이 수백 Hz까지 증가하고 표면의 trap density가 작으면 수십 Hz로 제한이 된다.

볼로미터의 잡음 측정은 lock-in amplifier의 내부 oscillator의 주파수를 변화시키면서 측정을 하였다. Fig 5.6과 같이 잡음 값은 주파수가 증가할수록 줄어드는데 이는 낮은 주파수에서는 주파수에 반비례하는 특성을 가지는  $1/f$  잡음이 큰 영향을 미치지만 높은 주파수에서는 볼로미터 소자 자체의 잡음인 존슨잡음이 주요한 잡음원이 되기 때문이다. 식 (2-16)에 의해 100Hz의 동작주파수에서 계산된 존슨잡음 전압값은 약 20nV로 이를 확인해 볼 수 있다.

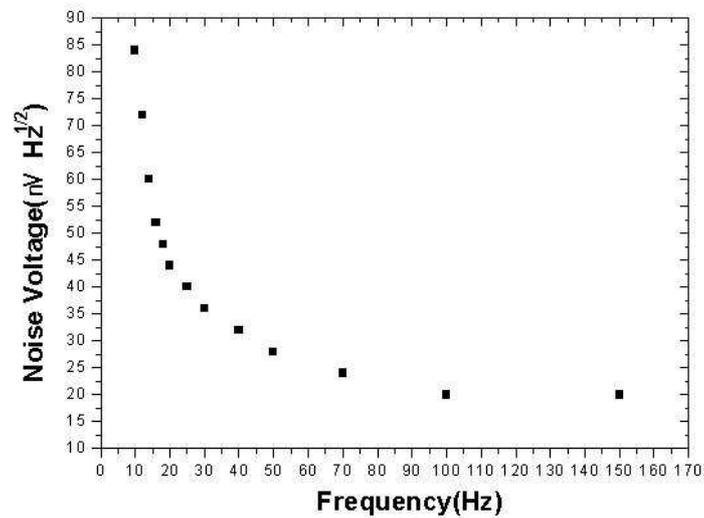


Fig 5.6 Noise characteristics as a function of the modulation frequency

신호전압은 초퍼의 주파수를 기준(reference)로 하여 입사광량에 대한 교류신호 전압을 측정하였다. lock-in amplifier를 통해 표시된 신호전압은 전치증폭기의 gain값이 포함되어 있으므로 실제소자의 신호에 gain이 곱해져 있는 것으로 표시된다. 따라서 응답도를 구할 경우에 gain값을 나누어주어야 한다. 초퍼의 주파수에 대해 신호전압 값이 적절하게 나오지 않을 때는 BBS, 초퍼, 볼로미터가 직선적인 정렬(Linear Alignment)이 되어 있는지 확인하여 다시 측정하였다. 또한 신호측정을 위해 가해지는 바이어스 전류가 증가함에 따라 신호값도 증가하고 일정 바이어스 이상이 되면 신호값이 일정하게 되는데 이에 대한 특성을 알아보고자 바이어스 전류에 따른 신호전압을 측정하였다.

### 5.2.3 특성 평가를 위한 적외선 광량 계산

BBS로부터 소자에 입사되는 광량은 소자의 위치에서 직접 측정하는 것이 아니라 계산에 의해서 이루어진다. 이것은 단순한 BBS광량을 계산하는 것이 아니라 BBS에서 소자까지의 여러 가지 factor를 고려하여야 하므로 정확한 계산이 필요하다.

BBS에서 나오는 광량은 Plank's Equation에 의해서 계산된다<sup>[11]</sup>.

$$E_0 = \frac{E'_0 A_{BBS} A_d}{\pi L^2} \quad (5-3)$$

$$E'_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (\exp (hc/\lambda kT) - 1)} d\lambda \quad (5-4)$$

$\lambda$  : wavelength in  $\mu$

$2\pi hc^2$  :  $3.715 \times 10^4 \text{ W}\mu^4 / \text{cm}^2$

$\frac{ch}{k}$  :  $1.43879 \times 10 \mu \text{K}$

L : 초퍼와 소자사이의 거리

$A_{BBS}$  : BBS aperture 의 크기

T : Absorbed Temperature in Kelvin

c : velocity of light =  $3 \times 10^{10}$  cm/s

h : Plank's constant =  $6.626 \times 10^{-34}$   $Ws^2$

k : Boltzmann's constant =  $1.38707 \times 10^{-23}$   $Ws/K$

만약 적분구간이 0에서 무한대이면 Stefan-Boltzmann 법칙을 이용하여 간단히 구할 수 있다<sup>[11][31]</sup>.

$$E'_0 = 5.67 \times 10^{-12} T^4 = \sigma T^4 \text{ (watt/cm}^2\text{)} \quad (5-5)$$

위에서 구한 광량이 볼로미터의 window를 통과시 투과도를 고려할 경우, window를 통해 센서의 활성창에 입사될 때 빛의 세기는 window의 투과도에 의해 제한이 된다. 윈도우로 사용되는 물질의 투과도는 FTIR등을 이용해 측정할 수 있다. 필요한 파장대에서 투과도를 구하고 이를 위에서 구한  $E'_0$ 에 곱하여 그 파장대에서 적분을 하면 window를 통과할 때의 광량을 계산할 수 있다.

$$E_0 = \frac{A_{BBS} A_d}{\pi L^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (\exp (hc/\lambda kT) - 1)} T(\lambda) d\lambda \quad (5-6)$$

위에서 구해진 광량에 BBS의 aperture와 초퍼 블레이드(blade) 모양에 따라 고려되어야 하는 modulation factor(=0.2)를 곱하면 더 정확한 입사 광량을 구할 수 있다. 본 논문에서 사용한 측정 시스템에는 BBS로부터 입사된 광량이  $10^{-10}$ W 정도로 계산상 신호를 측정하기 충분하지 않은 광량이므로 ZnSe렌즈를 사용하여 볼로미터에 집광하는 방법을 사용하였다. ZnSe렌즈를 통해 들어온 적외선이 감지 면적 전체에 다 입사된다고 가정하면 계산된 입사광량은  $4.3 \times 10^{-8}$ W이다.

## 5.2.4 마이크로볼로미터의 적외선 감지 특성

마이크로볼로미터의 성능은 크게 응답도와 감지도로 비교하여 판단할 수 있다. 볼로미터에 입사한 광량에 반응하는 정도인 응답도는 전치증폭기 크기에 따라 그 값이 달라질 수 있다. 따라서 응답도에 전치증폭기의 gain값을 R값에 나누어주어 그 값을 규격화할 수 있다. 식 (2-7)을 다음과 같은 식으로 다시 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{V_s}{E_0 G} \quad (5-7)$$

여기서 신호전압  $V_s$ 는 측정장비를 이용하여 BBS에서 소자를 거쳐 전치증폭기로 신호를 증폭한 후 lock-in amplifier에서 측정할 수 있고 입사광량  $E_0$ 는 이론적인 식을 이용하여 BBS로부터 소자에 입사되는 광량을 계산할 수 있으며 전치증폭기의 gain인 G는 전치증폭기에서 정해지는 상수이다.

위의 식으로부터 계산된 광량과 측정된 신호전압을 이용해서 응답도를 계산한 결과 Fig 5.7과 같은 주파수에 따른 특성을 나타내었다. 전치증폭기의 gain은 500이며 낮은 주파수에서 응답도는 급격히 감소하다가 높은 주파수로 갈수록 점점 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 또한 바이어스 전류에 따른 응답도를 나타내었는데 약  $6.25 \mu\text{A}$ 의 바이어스 전류를 가해주었을 때 최대의 응답도를 나타냄을 알 수 있다. 이는 추후 마이크로볼로미터의 적외선 감지 특성을 최적화하기 위해 가해지는 바이어스 전류의 범위를 결정해 주게 된다.

감지도는 식 2-18로부터 계산할 수 있다. Lock-in amplifier에서 신호전압을 읽어 응답도(R)을 구하고  $\frac{\sqrt{\Delta f}}{V_n}$  값도 lock-in amplifier에서 구할 수 있으므로 소자의 면적만 측정하여 식에 대입하면 감지도를 구할 수 있다. Fig 5.7에서 보듯이 가해진 바이어스 전류  $6.25 \mu\text{m}$ 일 때 최대의 응답도를 보임으로 이 때의 감지도를 측정하였다. 이 때의 측정 조건은 Table 5.1과 같고 Fig 5.8에서 주파수에 따른 감

지도 변화를 보여주고 있다. 감지도의 최대값이 낮은 동작 주파수가 아닌 특정 주파수에서 나타나는 경향을 보이는데 이는 잡음 신호의 증가가 응답도의 증가보다 적외선 특성 평가의 척도인 감지도에 보다 큰 영향을 미치는 것을 증명해주는 결과라고 생각된다. 따라서  $1/f$ 잡음, 배경 잡음 및 측정시스템에 의한 전기적인 잡음이 측정된 잡음전압에 상당한 크기를 가지며 이런 잡음성분들을 효과적으로 제거할 수 있다면 보다 나은 감지도 특성을 갖게 할 수 있을 것으로 생각된다. Fig 5.9는 가해진 바이어스 전류에 따른 감지도의 변화를 나타내는데 이는 Fig 5.7의 그래프에서와 마찬가지로 추후 마이크로볼로미터의 적외선 감지 특성을 최적화하기 위해 가해지는 바이어스 전류의 범위를 결정할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 마이크로볼로미터 제작시 흡수층 및 구조층으로 사용한 질화실리콘 박막의 흡수율은 일반적으로 적외선 영역에서 30-40% 정도이므로 입사된 적외선을 좀더 흡수할 수 있는 물질을 흡수 구조에 사용하게 된다면 응답도 및 감지도의 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서 제작한 마이크로볼로미터를 기존의 발표된 볼로미터들과 Table 5-2에서 특성을 비교하였다. 거의 대등한 수준의 성능을 보임을 확인할 수 있으며 위에서 언급한 문제점들을 효과적으로 해결한다면 보다 우수한 특성을 갖는 마이크로볼로미터 제작이 가능할 것으로 판단된다.

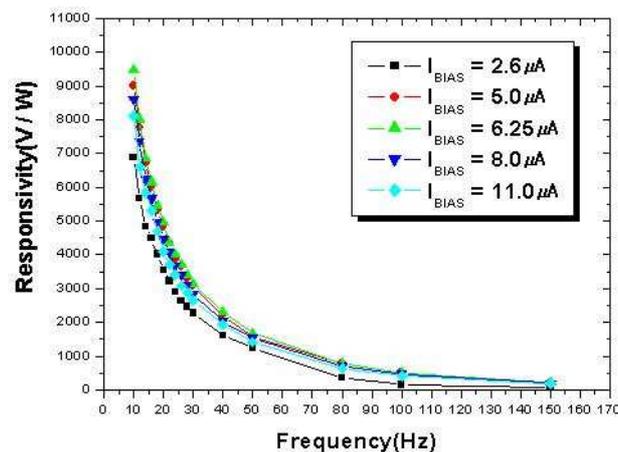


Fig 5.7 Responsivity characteristics as a function of the modulation frequency

Table 5.1 Measurement parameters

Parameter	Value
BBS temperature	1273 K
BBS aperture	0.4 inch
Distance from BBS to lens	6 cm
Pixel size	2450 $\mu m^2$
Bolometer TCR	-3.01 %/K @ $R_0 = 20^\circ C$
Pixel resistance	42.7 K(at R.T)
Preamplifier gain	500
Chopper frequency	10 Hz
Responsivity	9465 V/W
Detectivity	$5.857 \times 10^8 cm.Hz^{1/2}/W$

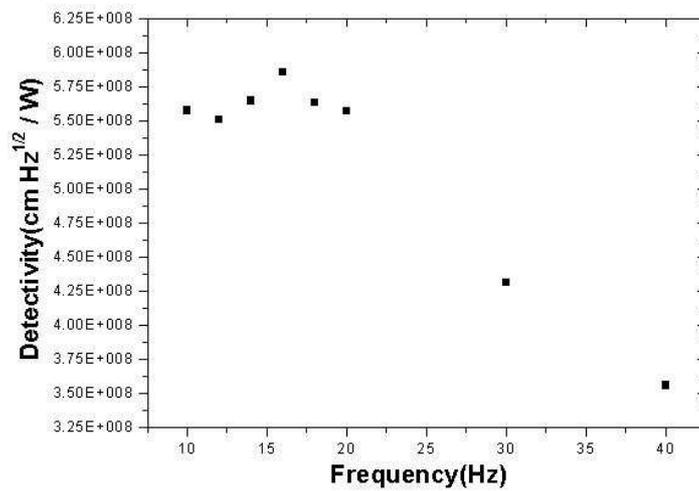


Fig 5.8 Detectivity characteristics as a function of the modulation frequency

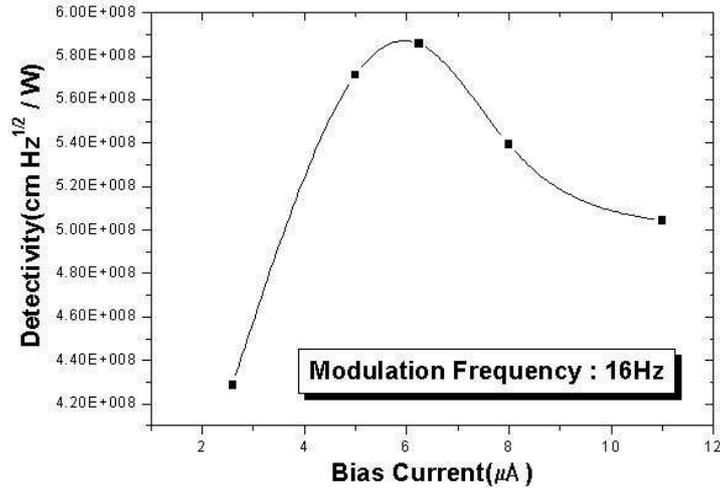


Fig 5.9 Detectivity characteristics as a function of bias current

Table 5.2 Comparisons of characteristics of various bolometers

Active layer	Detectivity	Reference
YBCO	$1.19 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/W$	Mahmoud Almasri et al <sup>[58]</sup> .
VO <sub>x</sub>	$1.94 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/W$	Changhong Chen et al <sup>[59]</sup> .
Poly-SiGe	$7.48 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/W$	Liang Dong et al <sup>[60]</sup> .
Ti	$5.0 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/W$	HyungKuw Lee et al <sup>[61]</sup> .
<b>V-W-O<sub>x</sub></b>	<b><math>5.857 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/W</math></b>	<b>Our Device</b>

## 제 6 장 이산화탄소 측정 센서 시스템

### 제 6.1 절 MEMS기술을 이용한 집적화된 이산화탄소 센서 시스템의 유용성

Fig 6.1은 본 논문에서 수행한 이산화탄소 감지 시스템의 한 응용 예로서 마취 상태의 환자나 중환자실에 있는 환자의 기도를 통해 환자상태를 모니터링하는데 사용되는 capnograph의 센서부를 보여주는 그림이다<sup>[65]</sup>. 센서부는 환자 튜브 밖에 위치하고 있고 일반적으로 광원, 필터, 감지기로 구성이 된다. 환자의 호흡가스에는 이산화탄소 외에도 수증기 및 기타 오염 물질이 많이 포함되어 있다. 이 때 정확한 이산화탄소만의 농도를 측정하기 위해서는 센서부의 장기간의 안정성을 요구하며 환자의 호흡가스가 들어가는 챔버안의 오염 물질에 대한 보상이 필요하다.

본 연구에서 제안한 센서의 작동 원리는 Fig 6.2와 같다. 시스템은 적외선 광원 바로 아래에 이산화탄소로 채워진 공동(cavity)과 그렇지 않은 부분으로 나뉘는 이산화탄소 필터 칩을 위치시킨다. 이산화탄소 필터 칩의 공동을 통과한 적외선은 4.26um 근처에서의 이산화탄소 흡수 피크 파장에서 “pre-absorption”에 의해 기준 빔을 만드는데 사용된다. 한가지의 가스를 측정하고자 할 때 공동 안에 그 가스와 정확히 같은 가스를 사용함으로써 필터는 기도에 있는 가스로부터 같은 흡수 특성을 가짐을 나타낸다. 필터 칩의 공동이 아닌 부분을 통과한 적외선은 환자의 기도 내의 이산화탄소에 의해 흡수되고 그에 따른 가스 농도를 나타낸다. 튜브에서의 더 높은 이산화탄소 농도는 샘플 빔의 흡수를 증가시킨다. 공동을 통과한 적외선에 의해 측정된 기준 신호와 그렇지 않은 부분을 통과한 적외선에 의해 측정된 측정 신호의 비는 환자 기도내에서의 적외선 흡수의 정도를 나타내고 따라서 가스 농도를 나타내게 된다.

본 논문에서 제안한 이산화탄소 센서 시스템은 일반적인 시스템에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있다. 이산화탄소 필터 칩과 감지기로 사용할 마이크로 볼로

미터가 실리콘 미세가공 기술을 사용하여 제작될 수 있는데 이는 센서 크기를 작게 만들고 상대적으로 낮은 공정 가격, 그리고 신뢰성이 매우 높은 장점을 가진다. 또한 광원의 변조(modulation)를 위해 전기적인 변조가 가능한 적외선 광원을 사용함으로써 센서의 집적화를 이룰 수 있다. 이런 적외선을 이용한 센서 시스템의 또 다른 장점은 직접적으로 가스와 접촉없이 가스의 농도를 측정할 수 있다는 것이다.

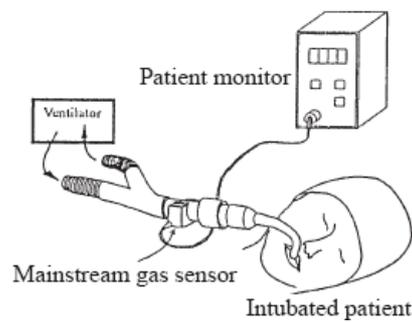


Fig 6.1 Schematic diagram of capnograph sensor unit placed outside the patient airway

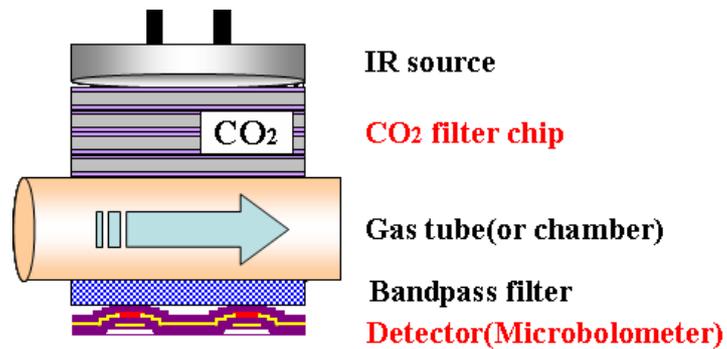


Fig 6.2 The infrared sensor system for measurement of CO<sub>2</sub> concentration

## 제 6.2 절 센서 시스템 구성 및 특성 평가

제작된 이산화탄소 필터 칩과 마이크로볼로미터를 이용하여 본 논문에서 제안한 이산화탄소 센서 시스템이 이산화탄소 농도에 따른 신호를 검출함을 확인해 보았다. Fig 6.3과 Fig 6.4는 이산화탄소 농도에 따른 신호를 측정하기 위한 측정 시스템을 나타내는데 입사광량의 정확한 계산을 위해 적외선 광원은 BBS를 사용하였고 볼로미터의 성능 향상을 위해  $4.26\mu\text{m}$  파장에서 대역폭 90nm을 갖는 대역 필터를 window로 한 진공 패키징 장치를 그대로 사용하였다. 이산화탄소 농도에 따라 볼로미터에서 감지한 신호의 변화를 읽기 위해 여러 가지 농도를 나타낼 수 있도록 질소를 섞어주는 방법으로 각각 2.04%, 2.43%, 3.03%, 4.76%, 7.69%, 11.11%의 이산화탄소 농도를 얻었고 이에 따른 신호 변화를 측정하였다.

Fig 6.5는 이산화탄소 농도에 따른 볼로미터에서의 신호 변화를 측정한 그래프이다. 이산화탄소 농도에 따른 볼로미터에서의 출력 전압 값은 이산화탄소 필터 칩의 공동이 아닌 부분을 통과한 적외선이 측정하고자 하는 이산화탄소가 들어있는 챔버를 통과했을 때 얻은  $V_{\text{SIGNAL}}$  값과 이산화탄소 필터 칩의 공동부분을 통과한 적외선이 측정하고자 하는 이산화탄소가 들어있는 챔버를 통과했을 때의 출력 전압값의 차이에 비례한다. 즉, 측정하고자 하는 이산화탄소가 포함된 챔버를 통해 볼로미터에서 측정된 출력 전압 값  $V_{\text{SIGNAL}}$ 과 기준 신호를 얻기 위해 이산화탄소 필터 칩에서 이산화탄소가 채워져 있는 공동 부분을 통과하여 볼로미터에서 측정된 출력 전압 값을 이산화탄소가 없는 초기 상태에서 볼로미터에서 측정된 출력 전압 값에서 뺀  $V_{\text{REFERENCE}}$ 의 비는 입사된 적외선의 세기에 대한 투과율을 나타내는 전압 값이 된다. 따라서 Fig 6.5의 그래프에서 보듯이 이산화탄소가 증가함에 따라 볼로미터에서 감지하는 출력 전압 값도 비어 램베르트 법칙에 따라 비선형적으로 감소함을 확인할 수 있다. 볼로미터를 통해 측정된 출력 전압값은 신호 처리를 통해 측정된 출력 전압값에 따른 이산화탄소 농도를 나타내는 시스템에 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

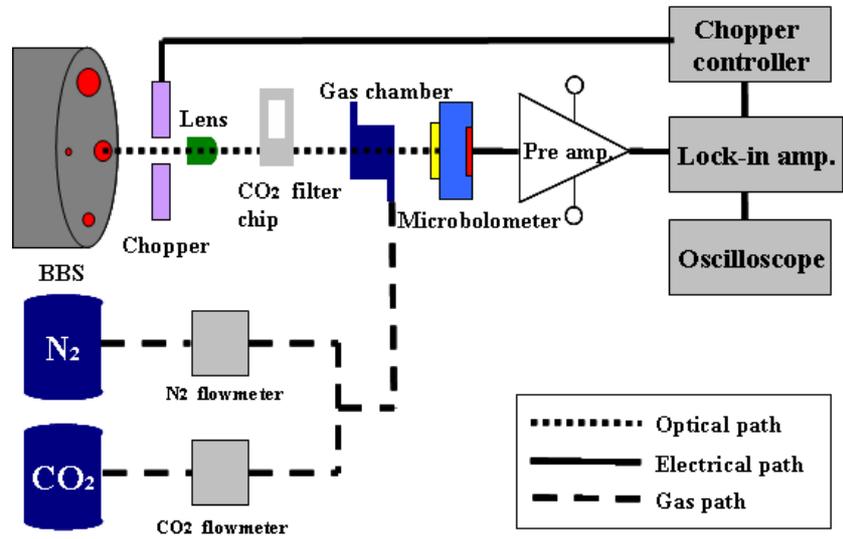


Fig 6.3 Schematic diagram of measurement system for CO<sub>2</sub> concentration measurement

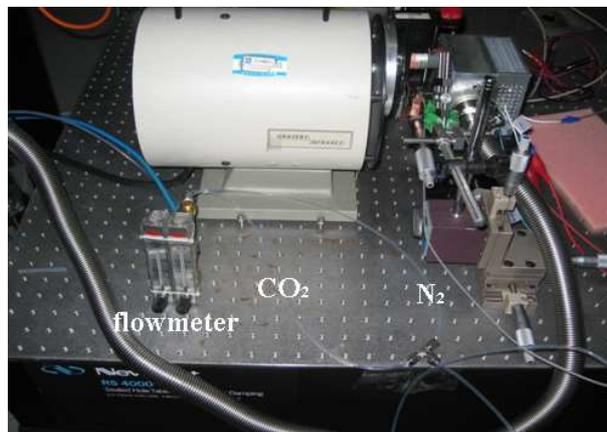


Fig 6.4 Optical image of measurement system for CO<sub>2</sub> concentration measurement

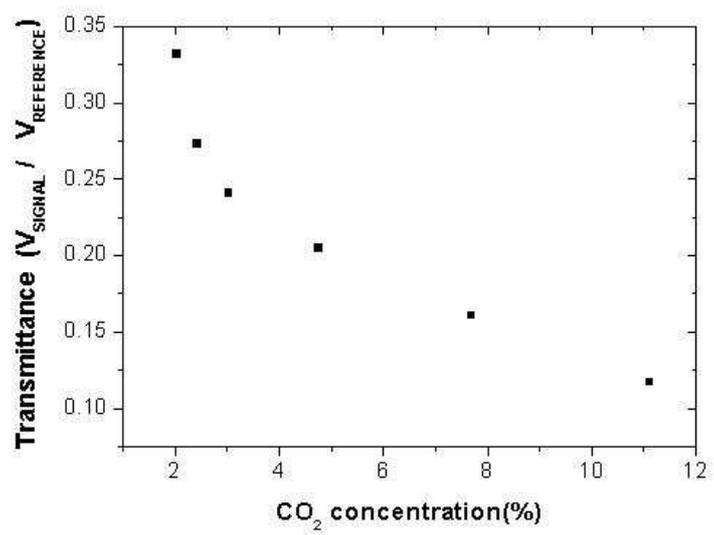


Fig 6.5 Transmittance vs CO<sub>2</sub> concentration

## 제 7 장 결론

본 논문에서는 MEMS 기반의 적외선 감지소자인 마이크로볼로미터를 이용한 CO<sub>2</sub> 센서 시스템을 제작해 보고 특성을 평가해 보는 연구를 수행하였다.

첫째, 적외선을 이용한 이산화탄소 감지기로써 MEMS 기술인 표면 미세가공 (surface micromachining) 기술을 이용하여 마이크로볼로미터를 제작하였는데 기존에 공정상에서 발생하는 스트레스 등으로 인한 뜬 구조의 뒤틀림에도 소자의 성능에 큰 영향을 받지 않는 뜬 구조위에 반사층, 흡수층, 감지층을  $\lambda/4$  구조로 하여 우수한 특성의 마이크로볼로미터를 제작하였다. 측정 결과 최대  $5.857 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/W$ 의 감지도를 가지는데 측정 시스템의 전기적인 잡음을 줄일 수 있는 것을 고려하면 기존에 개발된 볼로미터와 비교했을 때 본 논문에서 제작한 볼로미터의 성능이 대등한 수준임을 확인하였다.

둘째, 기존의 비분산식 적외선 가스 센서에서 측정 신호의 보정을 위한 다양한 기준 신호를 제공하는 방법에서 보다 정확한 기준신호를 제공하기 위해 순수한 이산화탄소로 채워진 이산화탄소 필터 칩을 MEMS 기술인 몸체 미세가공 (bulk micromachining) 기술을 이용하여 제작하였다. 더 많은 이산화탄소를 공동(cavity) 안에 채우기 위해 압력을 높이면서 채워 보았는데 채워진 이산화탄소를 확실하게 밀봉시키는 방법이 확립되지 않은 문제가 있었다. 이산화탄소 환경 하에서 fusion bonding같은 기술을 이용하여 1bar 이상의 압력으로 이산화탄소를 채울 경우 좀더 신뢰성 높은 기준신호를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

셋째, 위에서 제작된 마이크로볼로미터와 이산화탄소 필터 칩은 모두 MEMS 기술에 의해 제작되며 특히 마이크로볼로미터는 기존의 열형 감지기와 달리 신호의 변조를 위해 기계적인 초퍼가 필요 없으며 웨이퍼 레벨에서 monolithic한 공정이 가능하여 본 논문에서 제안한 집적화된 이산화탄소 센서 시스템을 구성하는데 적합하다. 텅스텐, poly-Si 등을 이용한 필라멘트 형태의 적외선 광원과 최근 활발한 연구가 진행중인 photonic crystal 기술을 이용한 대역 필터 역시 MEMS 내지는 NEMS(Nanoelectromechanical System)공정에 의해 제작이 가능하므로 향후

MEMS 기술로 제작된 비분산식 이산화탄소 센서는 단일 칩으로 제작이 가능하고 다른 가스에 의한 간섭이 없으며 저전력 소비, 소형화 등의 장점을 가진 우수한 성능을 가지는 이산화탄소 센서로의 활용 가능성을 제시한다.

## 참고문헌

- [1] Joda Wormhoudt "Infrared methods for gaseous measurements", Marcel Dekker Inc., (1985)
- [2] J. Schilz , thermophysica minima: thermoelectric infrared sensors (thermopiles) for remote temperature measurements; pyrometry, PerkinElmer Optoelectronics (1999).
- [3] Ozmen, B. Matysik, F.-M. Bings, N.H. Broekaert, J.A.C., Spectrochimica acta. Part B, Atomic spectroscopy, v.59 no.7, (2004) 921
- [4] J.W. Gardner, P.N. Bartlett, Measurement science & technology, v.11 no.7, (2000) 24
- [5] Werle, P., Mücke, R. D'Amato, F. Lancia, T., Applied physics. B, Lasers and optics, v.67 no.3, (1998) 597
- [6] Frank, J., Meixner, H., Sensors and actuators. B, Chemical, v.78 no.1/3, (2001) 114
- [7] Yussouff, M. Brailsford, A.D. Logotbetis, E.M., Sensors and actuators. B, Chemical, v.34 no.1/3, (1996) 475
- [8] Dann, R J, Sensor review, v.14 no.3, (1994) 33
- [9] Yamashita, K., Murata, A., Okuyama, M., Sensors and actuators. A, Physical, v.66 no.1/3, (1998).29
- [10] Nebiker, P.W, Pleisch, R.E, Fire safety journal, v.36 no.2, (2001) 173
- [11] E.L. Dereniak "Infrared detectors and systems", John Wiley & Sons, Inc., (1994)
- [12] Per-Anders Wallin, "FTIR analysis of gaseous emissions A report from the practice", Olle Moberg AB, (1997)
- [13] Sutapun, B., Tabib-Azar, M., Sensors and actuators. B, Chemical, v.69 no.1/2, (2000) 63
- [14] Calaza, C., Meca, E., Marco, S., Moreno, M., Samitier, J., Fonseca, L., Gracia, I., Cane, C., IEEE sensors journal, v.3 no.5, (2003) 587
- [15] Yan, Wen-Bin, Lasers and Electro-Optics, 2001. CLEO '01. Technical Digest., (2001) 288
- [16] Liddiard, K.C., Infrared physics, v.34 no.4, (1993) 379
- [17] Chen, Changhong, Yi, Xinjian, Zhang, Jing, Xiong, Bifeng International journal of infrared and millimeter waves, v.22 no.1, (2001) 53

- [18] Rogalski, A., Progress in quantum electronics, v.27 no.2/3, (2003) 59
- [19] Stark, I., Stordeur, M., Thermoelectrics Eighteenth International Conference on, (1999) 465
- [20] Willing, B., Kohli, M., Muralt, P., Setter, N., Oehler, O., Sensors and actuators. A, Physical, v.66 no.1/3, (1998) 109
- [21] Lockyer, Nicholas P., Vickerman, John C., Laser chemistry, v.17 no.3, (1997) 139
- [22] Linderstrom-Lang, C.U., International journal of heat and mass transfer, v.7 no.11, (1964) 1195
- [23] Gondal, M.A, Dastageer, A., Shwehdi, M.H., Talanta, v.62 no.1, (2004) 131
- [24] Tanaka, A., Matsumoto, S., Tsukamoto, N., Itoh, S., Chiba, K., Endoh, T., Nakazato, A., Okuya, IEEE transactions on electron devices, v.43 no.11, (1996) 1844
- [25] Michael A. Frakes, CRITICAL CARE NURSE Vol 21, No. 5, (october 2001) 23
- [26] Joseph Z. Su, Malgosia Kanabus-Kaminska, "FTIR Gas Measurement in Home Smoke Alarm Tests", Research Report 107, (2002)
- [27] James T. et al., Advanced Environmental Sensing Technology II, Tuan Vo-Dinh, Stephanus Büttgenbach, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 4576 (2002)
- [28] Shang, Liping Zheng. Dezhong Zhang. Xiaobin, Proceedings of SPIE Vol. 4221 (2000)
- [29] I.Y. Park, S.K. Lee, H.J Park, K.M. Kang, B.S. Song, S.W.Knag, J.H. Cho, proceeding of the 23rd annual EMBS International Conference, (2001) 3296
- [30] Roger James Francey, Lloyd Paul Steele, Accred Qual Assur, (2003) 200
- [31] A. Rogalski, "Infrared Detectors", Gordonand Breach Science Publishers., (2000)
- [32] Paul W. Kruse, David D. Skatrud, "Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems", Academic press., (1997)
- [33] J.P. Silveria, J. Anguita, F. Briones et al., Eurosensors XI, Warsaw, Poland, (1997) 175
- [34] R.J Solomon, Hewlett-Packerd J. 32(9), (1981) 2
- [35] E.S. Tony, S.K. Chaudhuri, J. Lightwave Technol. 12(7), (1994) 1144

- [36] K. Yamasita, A. Murata, M. Okuyama, Transducers 97, Chicago, USA, (1997) 1067
- [37] J. Peerlings, A. Dehe et al., Eurosensors XI, Warsaw, Poland, (1997) 1353
- [38] H.G Kraft, J.W. Bevan, Infrared Phys., 21(1981) 337
- [39] J. Bryzek, K. Peterson, W. McCully, IEEE Spectrum. Vol. 31, (1994) 20
- [40] R.T. Howe, R.S. Muller et al., IEEE Spectrum. Vol. 27, (1991) 29
- [41] R.T Howe, J.Vac. Sci. Technol., Vol. 16, (1988) 1809
- [42] K. Wise, K. Najafi, Science, Vol. 254(1991) 1335
- [43] Gregory T.A. Kovacs, "Micromachined Transducers Sourcebook", WCB McGraw-Hill Inc., (1998)
- [44] J.M. Bustillo, R.T. Howe, R.S. Muller, Proceedings of the IEEE, Vol 86. No. 8, (1998) 1552
- [45] R.S. Payne, S. Sherman, Proc. IEEE Solid-State Circuits Conf., (1995) 164
- [46] R.T. Howe, B.E. Boser, Sensors and Actuators, Vol. A56, (1990) 167
- [47] K.E. Peterson, Proceedings of the IEEE, Vol. 70, (1982) 420
- [48] K.E. Bean, IEEE Trans. Electron. Dev., ED-25 (1978) 1185
- [49] Gregory T.A. Kovacs, K.E. Peterson, Proceedings of the IEEE, Vol. 86 No. 8, (1998) 1536
- [50] A.B. Frazier, M.G. Allen, Proceedings of the IEEE MEMS, (1992) 87
- [51] H. Guckel, Proceedings of the IEEE MEMS, (1998)
- [52] Chung, G.-S., Kim, J.-M., Sensors and actuators. A, Physical, v.116 no.2, (2004) 352
- [53] J. Bryzek, Sensors and Actuators, A(56), (1996) 1
- [54] M. Pottenger, B. Eyre et al., Solid-State Technology, (september 1997) 89
- [55] K.D. Wise, IEDM 96, (1996) 11
- [56] B.E. Cole, R.E. Higashi, R.A. Wood, Proceedings of the IEEE, Vol. 86, (1998) 1211
- [57] K.T. Kim, J.Y. Park, Y.H. Han, H.K. Kang, H.J. Shin, S. Moon, J.H Park, Sensors and Actuators, Vol. 110, (2004) 196
- [58] M. Almasri, D.P. Butler et al., JMEMS, Vol. 10, (september 2001)
- [59] C. Chen, X. Yi, X. Zhao, B. Xiong, Sensors and Actuator A, Vol. 90, (2001) 212
- [60] L. Dong, R. Yue, L. Liu, Sensors and Actuators, (2003)
- [61] H.K. Lee, J.B. Yoon, E.S. Yoon, S.B. Ju, Y.J. Yong, W. Lee, S.G. Kim,

- IEEE Trans. Electron devices, Vol. 46, (1999) 1489
- [62] Y.H. Han, K.T. Kim, Chi Ahn, H.J. Shin, I.H. Choi, S. Moon, JKPS, (2004)
- [63] D. Rossberg, Sensors and Actuators A 54, (1996) 793
- [64] D.K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, 2nd ed., (1989) 401
- [65] S.G. Kaplan, L.M. Hanssen, Infrared Physics & Technology 43, (2002) 389
- [66] T. Corman, "Vacumn-Sealed and Gas-Filled Micromachined Devices", ph.D papers, Electrical Engineering, Royal Institute of Technology, (1999)

## ABSTRACT

### An Integrated CO<sub>2</sub> Sensor System Using Microbolometer

Kim, Shin Keun

Dept. of Biomedical Engineering

The Graduate School

Yonsei University

In this work, we fabricated CO<sub>2</sub> gas sensor based on the MEMS infrared sensor and characterized its electrical and CO<sub>2</sub>-sensing properties.

The fabricated CO<sub>2</sub> gas sensor by MEMS technique has many advantages over NDIR(nondispersive) CO<sub>2</sub> sensor such as monolithic fabrication, very high selectivity on CO<sub>2</sub>, low power consumption and compact system. Microbolometer by surface micromachining was fabricated for gas detector and CO<sub>2</sub> filter chip by bulk micromachining was fabricated for signal referencing.

By using the proposed and fabricated gas sensor, we are expected to measure CO<sub>2</sub> concentration more accuracy with high reliability.

---

Key words : Infrared, NDIR, CO<sub>2</sub> gas sensor, surface micromachining, microbolometer, bulk micromachining, CO<sub>2</sub> filter chip, The fabricated CO<sub>2</sub> gas sensor by MEMS technique