Journal of the Korean Vacuum Society
Vol. 6, No. 3, August 1997, pp. 220~226

유전체 다이아프램을 이용한 다모드 광섬유 압력센서

金明奎 · 權大赫* · 金鎭雙** · 朴在熙*** · 李正熙**** · 孫炳基****

한국전자통신연구원 반도체연구단 *경일대학교 전자공학과
**인제대학교 전자공학과 ***계명대학교 컴퓨터전자공학부
****경북대학교 전자전기공학부
(1997년 5월 2일 접수)

Multimode fiber-optic pressure sensor based on dielectric diaphragm

Myung-Gyoo Kim, Dae-Hyuk Kwon*, Jin-Sup Kim, Jae-Hee Park***, Jung-Hee Lee****, and Byung-Ki Sohn****

Semiconductor Div., ETRI, P.O. Box 106 Yusong, Taejon 305-600 Korea
**Department of Electronic Engineering, Kyungil University, Taegu 712-701 Korea*
***Department of Electronic Engineering, Inje University, Kimhae 621-749 Korea*
****School of Computer & Electronic Engineering, Kaemyung University, Taegu 704-701 Korea*
*****School of Electronic & Electrical Engineering, Kyungpook Nat'l University, Taegu 702-701 Korea*
(Received May 2, 1997)

요 약 - 실리콘 미세가공기술로 형성된 프레임 모양의 실리콘 기판에 의해 지지되는 100 nm-Au/30 nm-NiCr/150 nm-Si_3N_4/300 nm-SiO_2/150 nm-Si_3N_4 광반사막을 제조하였으며, 이것을 광섬유와 결합하여 강도형 다모드 광섬유 압력센서를 제작하고 그 특성을 조사하였다. $Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4$ 다이아프램을 광반사막으로 사용하기 위하여 이 다이아프램의 뒷면에 NiCr 및 Au 박막을 각각 진공증착하여 광반사막에서의 광투과에 의한 광손실을 수 %로 감소시킬 수 있었다. 유전체 다이아프램의 상하에 각각 있는 Si_3N_4막은 KOH 수용액에 의한 실리콘 이방성 식각시 자동식각 정지층 역할을 하여 다이아프램 두께의 재현성이 우수하였다. 다이아프램의 크기가 3×3 mm^2, 4×4 mm^2 및 5×5 mm^{2}인 센서는 각각 0~126.64 kPa, 0~79.98 kPa 및 0~46.66 kPa의 압력범위에서 선형적인 광출력-압력 특성을 나타내었으며, 이들 센서의 압력감도는 각각 약 20.69 nW/kPa, 26.70 nW/kPa 및 39.33 nW/kPa로서, 다이아프램의 크기가 증가할수록 압력감도도 증가하였다.

Abstract - An optical intensity-type pressure sensor has been fabricated by coupling multimode optical fiber with 100 nm-Au/30 nm-NiCr/150 nm-Si_3N_4/300 nm-SiO_2/150 nm-Si_3N_4 optical reflection layer supported by micromachined frame-shape silicon substrate, and its characteristics was investigated. For the application of $Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4$ diaphragm to the optical reflection layer of the sensor, NiCr and Au films were deposited on the backside of the diaphragm by thermal evaporation, respectively, and thus optical loss caused by transmission in the reflection layer could be decreased to a few percents. Dielectric diaphragms with uniform thickness were able to be also reproduced because top- and bottom-Si_3N_4 layer of the diaphragm could automatically stop silicon anisotropic etching. The respective pressure ranges in which the sensor showed linear optical output power-pressure characteristics were 0~126.64 kPa, 0~79.98 kPa, and 0~46.66 kPa, and the respective pressure sensitivities of the sensor were about 20.69 nW/kPa, 26.70 nW/kPa, and 39.33 nW/kPa, for the diaphragm sizes of 3×3 mm^2, 4×4 mm^2, and 5×5 mm^2, indicating that the sensitivity increases as diaphragm size increases.

1. 서 론

압력센서는 압력을 전기적인 신호로 변환시키는 소자로서 가전제품을 비롯하여 자동차, 생체공학용 의료기, 환경감시 및 산업체의 대규모 시스템제어 등에 광범위하게 응용되고 있다. 최근에는 시스템의 자동화가 가속됨에 따라 효율적인 시스템 제어를 위한 고감도의 압력센서가 요구되고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 전기적 신호방식의 압력센서에서는 미소압력의 측정이 힘들고 원격측정에 있어서 전력공급이 어려울 뿐만 아니라 신호전송시 잡음의 영향을 심하게 받는다. 이에 비해 광섬유를 이용한 압력센서에서는 광섬유 그 자체가 광신호의 송수신로 역할을 겸할 수 있으며, 또한 주위의 전자장, 고온 및 부식 등의 열악한 환경에 의한 영향을 거의 받지 않을 뿐만 아니라, 높은 정밀도 및 빠른 응답특성을 얻을 수 있다. 따라서 광섬유 압력센서는 국방, 항공, 의료 및 산업 등의 광범위한 응용분야에서 그 연구가 활발히 진행되고 있다[1~4]. 또한 많은 관련 광부품들의 지속적인 개발과 가격인하 등으로 인해 광섬유 압력센서는 실용화 단계에 있다.

지금까지 다수의 연구자들이 광섬유를 응용한 압력센서에 대한 연구결과를 보고하여 왔다. 그 대표적인 예로서 Y. Haga 등이 광섬유 절단면 위에 반도체 사진식각 공정을 적용한 초소형 압력센서의 제작에 대한 가능성을 보고한 바 있으며, O. Tohyama 등은 실리콘 미세가공기술을 이용하여 제조된 박막과 광섬유를 결합한 압력센서에 대해 보고한 바 있다[5,6]. 그러나 이러한 압력센서에서는 그 구조가 복잡하고 제조공정이 까다로울 뿐만 아니라, 주로 실리콘 다이아프램을 사용함으로써 압력센서의 특성이 온도에 민감하다. 또한, K. Iwamoto 등은 압력의 변화에 따라 스테인레스 다이아프램의 휨정도가 달라지는 특성을 이용하여 7.9~39.3 MPa의 넓은 측정범위에서 매우 선형적인 압력감지특성을 나타내는 압력센서를 개발하였으며, 이를 오일펌프내에 부착하여 그 압력을 측정하기도 하였다[7]. 그러나 이 압력센서에서는 스테인레스 다이아프램을 사용함으로써 넓은 압력범위에서의 측정은 가능하지만 미소한 압력의 측정이 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 $Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4$(이하 'N/O/N'으로 표기함) 다이아프램과 광섬유를 결합하여 기계적 및 열적으로 안정된 특성을 갖는 강도형 다모드 광섬유 압력센서를 제작하고 그 동적 특성을 조사하였다. 온도변화에 따른 내부 스트레스의 변화가 적고 여러 센서에서 열차단막 등으로 응용되고 있는 N/O/N 다이아프램을 제조하였고[8,9], 송수신용 광섬유다발과 마주보는 N/O/N 다이아프램위에 NiCr 및 Au 박막을 약 30 nm 및 100 nm의 두께로 각각 진공증착하여 광투과에 의한 다이아프램에서의 광손실을 수 %로 줄일 수 있었다. Au/NiCr/N/O/N 광반사막과 다모드로 이루어진 감지프로브를 결합하여 제작한 강도형 광섬유 압력센서는 센서헤더의 구조가 간단할 뿐만 아니라 절대압의 측정에 상당히 유리한 장점을 갖는다.

2. 압력센서의 제작 및 특성측정

2.1 광반사막의 제조

N/O/N 박막 형성을 위한 기판으로는 결정면이 (100), 비저항이 2~3 Ω · cm, 직경이 5 인치, 그리고 두께가 약 610 μm인 붕소(B)가 도핑된 P형 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 먼저 실리콘 웨이퍼위에 N/O/N 박막을 형성하기 위하여, 상층 및 하층의 Si_3N_4막은 780 °C에서 LPCVD방법으로 증착하였고, 중간층의 SiO_2막으로는 APCVD방법으로 380 °C에서 SiH_4와 N_2O의 혼합가스 분위기에서 불순물을 도핑하지 않은 LTO를 증착하였다. 이때 3층 유전체 박막에 나타나는 내부 스트레스를 최소화하기 위해서 Si_3N_4막의 경우는 상층 및 하층으로 나누어 각각 약 150 nm씩 증착하였고, SiO_2막의 경우는 상층 및 하층에 있는 Si_3N_4막 사이에 삽입되게 약 300 nm의 두께로 증착하여 샌드위치 구조의 적층 박막 전체 두께가 약 600 nm가 되도록 하였다.

상기한 공정을 통하여 최종적으로 3.2×10^8 Pa의 압축스트레스를 갖는 SiO_2막과 9.7×10^8 Pa의 인장스트레스를 갖는 Si_3N_4막으로 구성되는 N/O/N 박막을 형성함으로써 적층박막 전체는 인장스트레스를 나타내었지만, 이 스트레스에 의한 다이아프램의 손상은 없었다[8]. 상기한 공정으로 적층박막을 제조함으로써, 상온에서부터 약 400 °C까지의 온도범위에 걸쳐 기판의 온도변화에 따른 N/O/N 박막에 나타나는 스트레스의 변화를 감소시킬 수 있었으며, F. Völklein이 보고한 바와 같이 실리콘 기판보다 훨씬 낮은 열전도도를 갖는 N/O/N 박막을 제조할 수 있었다[8,10].

N/O/N 박막을 센서의 광반사막으로 응용하기 위한 Au/NiCr/N/O/N 광반사막의 제조공정을 Fig. 1에 나타내었다. 건식 식각공정에서 N/O/N 박막의 표면보호 및 N/

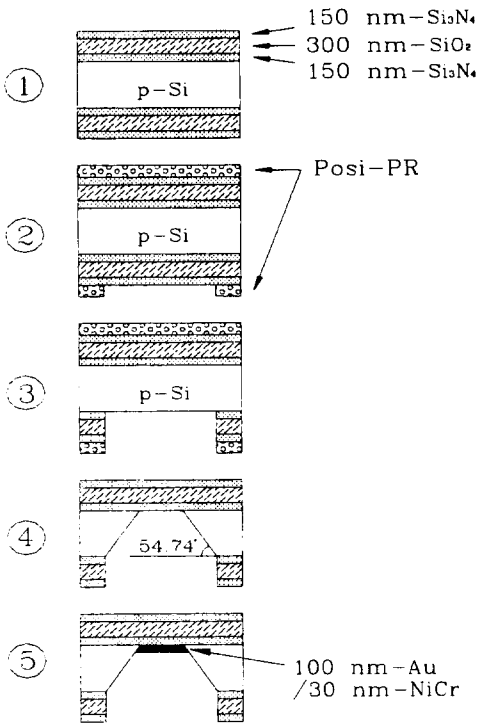

Fig. 1. Process sequence for the fabrication of Au/NiCr/N/O/N optical reflection layer.

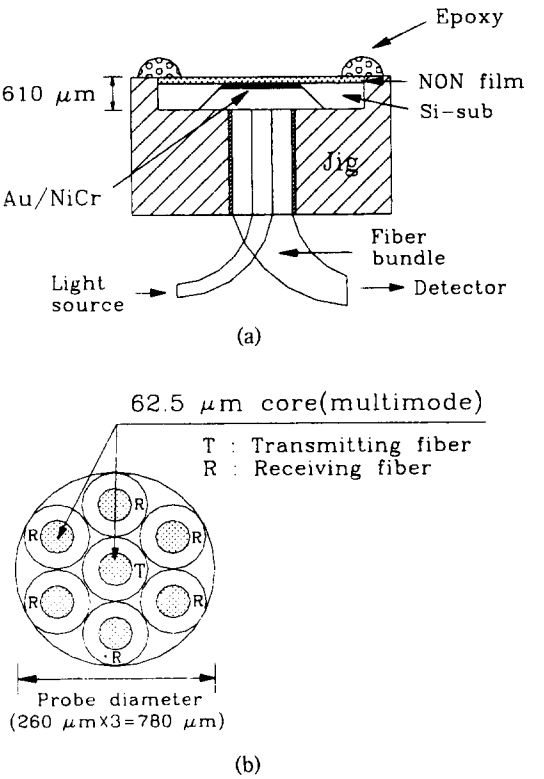

Fig. 2. Cross-sectional diagrams of (a) sensor header and (b) optical fiber sensing probe.

O/N 박막의 패턴형성을 위해 기판의 앞면 및 뒷면에 약 2 μm 두께로 양각 감광액(AZ1512)을 각각 스핀코팅하였다.

사진식각공정을 마친 후, 기판 뒷면의 상층 및 하층에 있는 150 nm-Si_3N_4막은 100 %의 CF_4 가스를 사용하여 각각 건식식각하고, 중간층의 300 nm-SiO_2막은 6:1 BHF로 약 1분간 습식식각하였다. 그 다음 시편들을 44 wt%의 KOH 수용액으로 80±1 °C의 항온조속에서 약 7시간동안 이방성식각을 하여 N/O/N 다이아프램을 제조하였다. 이때 실리콘기판의 깊이방향 식각률은 약 1.45 μm/min.였다. 강도형 압력센서에서 사용되는 광반사막은 낮은 광투과율 및 높은 광반사율을 가져야 하므로, N/O/N 박막 위에 glue층으로 먼저 30 nm의 두께로 NiCr을 증착한 후, 광반사율이 높은 약 100 nm 두께의 금을 진공증착하여 광반사막을 제조하였다. 여기서 박막의 두께는 엘립소미터로 측정하였다.

2.2 센서헤더의 제조 및 측정장치의 구성

Au/NiCr/N/O/N 다이아프램과 광섬유다발을 결합하여 제조한 센서헤더와 광신호의 송수신을 담당하는 광섬유 감지프로브의 단면 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 광신호의 송수신용 광섬유로 구성된 센서의 프로브는 7개의 광섬유를 압축 튜브속에 고정시킨 다발형태로 되어 있다. 감지프로브의 중앙에 있는 코아의 직경이 62.5 μm, NA(numerical aperture)가 0.273인 광송신용 다모드 광섬유를 FC(ferrule connector)를 사용하여 파장이 1.3 μm인 광원(stabilized light source : model MG921A, Anritsu, Japan)과 연결하였다. Au/NiCr/N/O/N 반사막 표면에서 반사된 광을 수신하는 가장자리에 있는 직경이 62.5 μm인 코아를 가지는 6가닥의 광섬유는 광검출기(photo-detector : model 261, Graseby Optronics, USA)에 연결되고, 센서헤더에서 나오는 광출력은 광전력계(optical power meter : model 731, Graseby Optronics, USA)로 측정하였다. 여기서 다모드 광섬유를 사용함으로써 압력센서의 동작점을 정확하게 선정할 수 있고 압력센서 출력의 재현성 및 출력감도를 향상시킬 수 있다[11,12].

압력특성을 측정하기 위한 장치의 개략도를 Fig. 3에

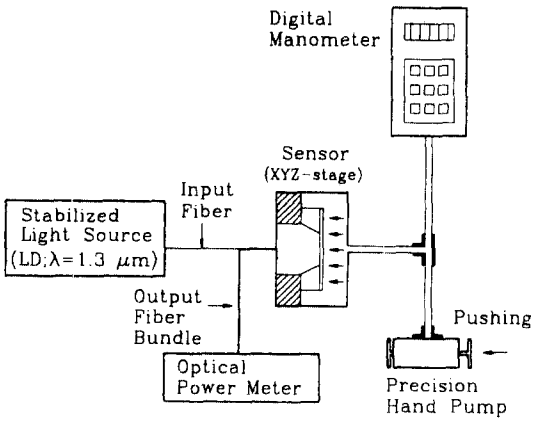

Fig. 3. Schematic diagram of measurement set up.

나타내었다. 광섬유다발의 절단면과 다이아프램사이의 거리조정은 제작된 센서의 압력감도 및 그것의 재현성에 있어서 매우 중요하다[13]. 따라서 본 실험에서는 이들의 거리조정을 정밀하게 하기 위하여 감지부에는 MicroBlock X-Y-Z flexure stage(model 17AMB001/D, Melles Griot, USA)를 사용하였다. 거리정렬을 위해 먼저 Au/NiCr/N/O/N 다이아프램을 지그(jig)위에 에폭시를 사용하여 고정시킨 후, 광섬유다발을 XYZ-stage위에 고정시켰다. 그 다음 X축을 이용하여 광섬유다발과 광반사막 표면과의 거리를 결정하였다. 광반사막에 압력을 핸드펌프로 인가시켰고, 디지탈 압력계(digital manometer : model PCL-200-KIT D, Meriam Instruments, USA)로 인가압력을 측정하였다. 이때 송신용 및 수신용 광섬유의 길이는 각각 약 2 m였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 N/O/N 다이아프램의 특성

압력센서의 광반사막으로 사용되는 다이아프램의 표면은 깨끗하고 평탄해야 한다. Fig. 4는 N/O/N 다이아프램의 표면 및 단면을 동시에 관찰하기 위하여 다이아프램을 단면이 나타나도록 절단하고 KOH 수용액으로 약 10분간 과다식각한후 이것을 기울여 촬영한 전자현미경 사진이다. 이 사진으로부터 다이아프램의 표면은 센서의 광반사막으로 사용할 수 있을 정도로 깨끗하고 평탄하며 다이아프램을 구성하는 중간층의 SiO_2막이 상층 및 하층의 Si_3N_4막에 비해 더 큰 식각률로 KOH 수용액에 의해 식각됨을 알 수 있었다.

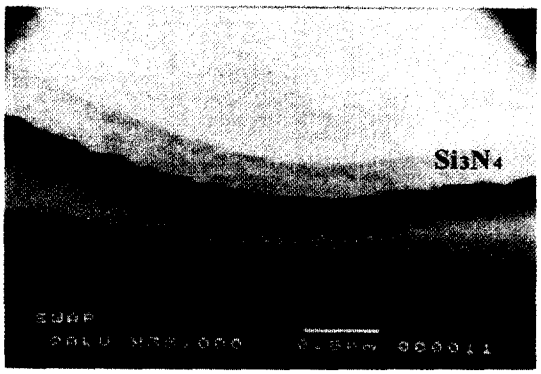

Fig. 4. Scanning electron microphotograph of N/O/N diaphragm overetched with KOH solution(in tilted view).

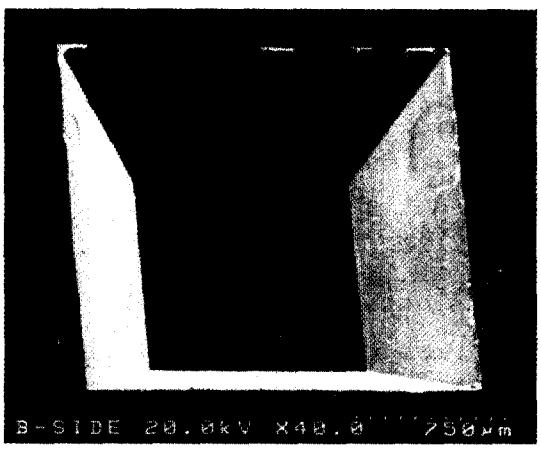

Fig. 5. Scanning electron microphotograph of diaphragm after silicon bulk micromachining(in bottom view).

Fig. 5는 실리콘 기판을 KOH 수용액으로 미세가공하여 제조한 N/O/N 다이아프램의 뒷면 및 이것의 가장자리에 남아있는 실리콘 프레임(frame)을 촬영한 주사형 전자현미경 사진으로서, 이 사진으로부터 실리콘과 N/O/N 박막과의 경계부분이 비교적 깨끗하게 식각되었으며, N/O/N 박막 표면에도 잔유 실리콘이 거의 없음을 알 수 있었다. 또한, 광학현미경을 통하여 육안으로 관찰하였을 때 다이아프램은 거의 투명하였고, 1,150 °C로 장시간동안 습식산화를 한 후에도 다이아프램의 변형이나 투명도의 변화는 거의 없었으며, 이 다이아프램의 광투과도는 파장 1.3 μm부근에서 약 50 %였다[14].

3.2 광반사막의 특성

Au/NiCr/N/O/N 반사막의 광특성 측정을 위해 크기가

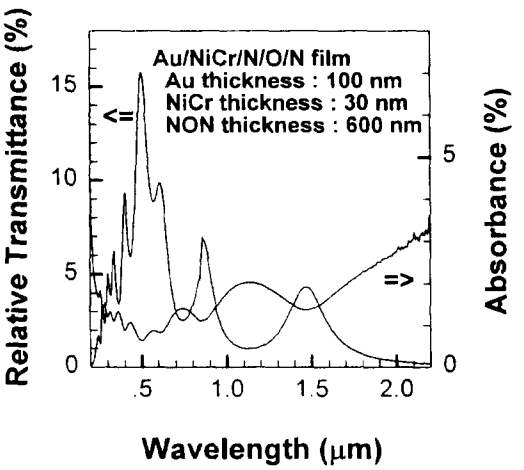

Fig. 6. Optical transmission and absorption spectra of optical reflection layer.

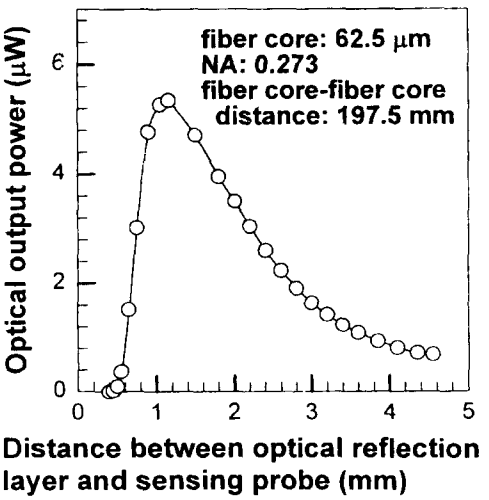

Fig. 7. Characteristic curve of optical output power versus distance between optical reflection layer and sensing probe.

8×8 mm^{2}인 다이아프램을 제조하였으며, 자외선-가시광선-근적외선 분광광도계(UV-VIS-NIR spectrophotometer: model U-3501, Hitachi, Japan)를 사용하여 파장 0.2~2.2 μm의 범위에 걸쳐 측정한 Au/NiCr/N/O/N 박막의 광투과 및 광흡수율을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 광반사막은 0.5 μm근방의 파장영역에서 약 15.8 %의 비교적 높은 광투과율을 나타내지만, 그 외의 나머지 영역에서는 N/O/N 다이아프램보다 훨씬 낮은 광투과율을 나타냈었다. 전영역에 걸쳐 진동하는 스펙트라가 나타나는 것은 광반사막을 구성하는 각 박막들 사이에서 입사광의 위상지연으로 인한 간섭효과 때문이다[15]. 또한, 측정한 대부분의 파장영역에서 광반사막의 광흡수율은 약 3 %이하였다.

3.3 압력센서의 특성

광섬유다발과 광반사막 표면과의 거리에 따른 압력센서의 광출력 특성을 Fig. 7에 나타내었는데, 이것은 전형적인 강도형 압력센서의 특성으로 알려진 것이다[16, 17]. 여기서 광출력은 압력을 인가하지 않고 감지프로브를 광반사막의 표면에서부터 멀어지도록 이동시키면서 측정한 값들이다.

본 실험에서는 간격이 약 400 μm일 때 최초의 광출력이 나타났으며, 약 1,150 μm에서 최대 광출력이 5.35 μW로 나타났고, 그후 간격이 증가함에 따라 광출력은 감소하였다. 최대 광출력점을 기준으로 하였을 때, 그 앞 부분의 기울기와 뒷부분의 기울기 크기의 차이는 있지만 모두 거의 선형적인 특성을 나타내었다. Fig. 7로부터 광반사막과 감지프로브 사이의 거리가 500~900 μm 범위일 때 거리에 따른 센서의 광출력 특성이 가장 선형적이며, Fig. 7의 기울기 즉 거리에 따른 센서의 광출력 변화는 거리가 900 μm이상인 영역에서보다 훨씬 더 큼을 알 수 있다. 또한 F. W. Cuomo는 출력 광강도가 증가하게 되면 감도도 증가한다고 보고한 바 있다[11]. 상기한 결과로부터 압력측정을 위한 다이아프램과 감지프로브간의 최적 정렬거리를 약 900 μm로 결정하였다. 광반사막과 감지프로브 사이의 정렬거리를 900 μm이하로 할 경우 센서의 광출력은 감소하게 되어 정렬거리를 900 μm로 하였을 때보다 압력감도도 감소하게 된다.

Au/NiCr/N/O/N 광반사막과 감지프로브 사이의 거리를 약 900 μm로 고정시킨 뒤, 대기압을 기준압력 즉 0으로 하였을 때 인가압력에 따른 광출력을 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 다이아프램의 크기는 각각 3×3 mm^2, 4×4 mm^2 및 5×5 mm^{2}였다. Fig. 8로부터 센서는 다이아프램의 크기에 관계없이 낮은 압력에서 좋은 선형성을 나타내었으며, 다이아프램은 선형적인 특성을 나타내는 압력범위보다 상당히 더 높은 압력에서 파괴됨을 알 수 있다. 또한 상기한 결과로부터 낮은 압력에서는 인가압력에 대해 다이아프램의 휨이 선형적인 응답특성을 보이나, 높은 압력에서는 인가압력이 증가함에 따라 다이아프램의 휨이 포화되어 감을 알 수 있었다. 다이아

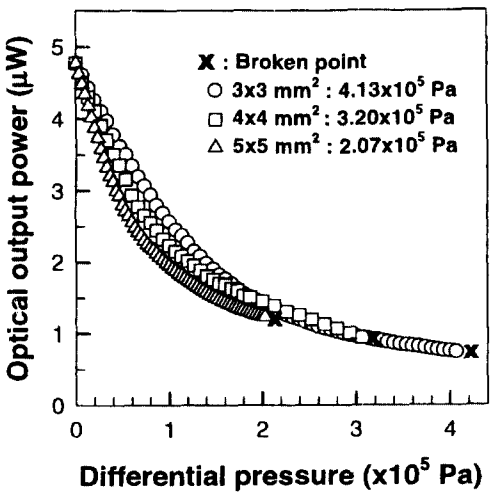

Fig. 8. Optical output power-differential pressure characteristics of pressure sensor.

프램의 크기가 3×3 mm^2, 4×4 mm^2 및 5×5 mm^{2}일 때 다이아프램에 인가할 수 있는 최대압력은 각각 약 4.13×10^5 Pa, 3.20×10^5 Pa 및 2.07×10^5 Pa로서 다이아프램의 크기가 증가할수록 다이아프램의 최대 인가압력은 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 8에서 나타낸 센서의 광출력-압력 특성으로부터 선형특성 영역에 대한 측정결과를 Fig. 9에 나타내었다. 다이아프램의 크기가 3×3 mm^2, 4×4 mm^2 및 5×5 mm^{2}일 때 센서의 선형 특성영역의 범위는 각각 0~126.64 kPa, 0~79.98 kPa 및 0~46.66 kPa로서, 다이아프램의 크기가 증가할수록 선형 특성영역의 범위는 감소하였다. Fig. 9에서 압력변화에 대한 광출력 변화의 비를 센서의 압력감도로 정의할 때, 각각의 선형 특성영역에서 다이아프램의 크기가 3×3 mm^2, 4×4 mm^2 및 5×5 mm^{2}인 센서의 압력감도는 각각 20.69 nW/kPa, 26.70 nW/kPa 및 39.33 nW/kPa로서, 다이아프램의 크기가 증가할수록 센서의 감도도 증가하였다. 여기서 광섬유의 휨에 의해 발생되는 센서의 광출력 변화를 최소화 하기 위하여 광섬유를 측정 테이블위에 고정시켰다.

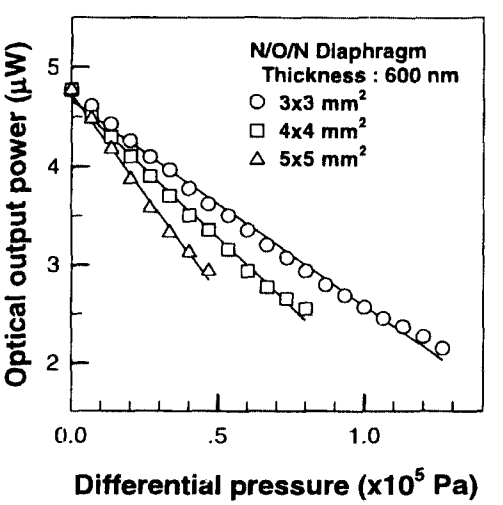

Fig. 9. Optical output power-differential pressure characteristics in the linear region.

4. 결 론

본 연구에서는 Au/NiCr/Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4 광반사막과 광전송용 및 광수신용 광섬유다발을 결합하여 광강도형 다모드 광섬유 압력센서를 제작하고 그 특성의 우수성을 확인하였다.

KOH 이방성 식각액으로 150 nm-Si_3N_4/300 nm-SiO_2/150 nm-Si_3N_4막이 증착된 실리콘 기판을 미세가공하여 상기한 구조의 유전체 다이아프램을 제조하고, 그 다음 유전체 다이아프램의 뒷면에 약 30 nm 두께의 NiCr 및 약 100 nm 두께의 Au를 각각 순차적으로 진공증착하여, 열적 및 기계적 특성이 안정되고 광투과에 의한 광손실이 수 %로 감소된 광반사막을 제조할 수 있었다.

다이아프램의 크기가 3×3 mm^2, 4×4 mm^2 및 5×5 mm^{2}인 압력센서의 경우, 다이아프램에 인가할 수 있는 최대압력이 각각 약 4.13×10^5 Pa, 3.20×10^5 Pa 및 2.07×10^5 Pa로서, 다이아프램의 크기가 증가할수록 다이아프램의 최대 인가압력은 감소하였고, 센서의 광출력-압력 특성이 선형적으로 나타나는 인가압력의 범위는 각각 0~126.64 kPa, 0~79.98 kPa 및 0~46.66 kPa로서, 다이아프램의 크기가 증가할수록 선형 특성영역의 범위는 감소하였으며, 또한 선형 특성영역에서의 압력감도는 각각 20.69 nW/kPa, 26.70 nW/kPa 및 39.33 nW/kPa로서, 다이아프램의 크기가 증가할수록 센서의 감도도 증가하였다.

본 연구에서 제작한 광섬유 압력센서는 수압 또는 수위 등을 측정하는 방재용 센서로 사용될 수 있으며, 향후 이 센서의 실용화를 위해서는 감도개선을 위한 다모드 광섬유 코아의 대구경화, 감지프로브의 재현성 향상 및 경제적인 측정장치의 구성 등에 관한 연구를 지속적으로 수행하여야 할 것으로 본다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 센서기술연구소의 연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. R. Wolthuis *et al.*, *IEEE Trans. on Biomedical Engineering* **40**(3), 298 (1993).
2. K. Seibert *et al.*, *Proc. of The 7th Int'l Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, 690 (1995).
3. E. Singer *et al.*, *Sensors and Actuators A* **41**, 542 (1994).
4. T. G. Giallorenzi *et al.*, *J. Quantum Electron* **QE-18**, 626 (1982).
5. Y. Haga *et al.*, *Technical Digest of The 12th Sensor Symposium*, 135 (1994).
6. O. Tohyama *et al.*, *Proc. of Transducers '95 · Eurosensors IX*, 596 (1995).
7. K. Iwamoto and I. Kamata, *Applied Optics* **29**(3), 375 (1990).
8. 김명규 등, 센서학회지 **4**(3), 51 (1995).
9. T. Elbel, *Sensors and Materials* **3**(2), 97 (1991).
10. F. Völklein, *Thin Solid Films* **188**, 27 (1990).
11. F. W. Cuomo, *Proc. of Ultrasonics International '89 Conference*, 354 (1989).
12. G. He and F. W. Cuomo, *J. of Lightwave Technology* **9**(11), 1618 (1991).
13. B. Culshaw, *Optical Fiber Sensing & Signal Processing* (Institution of Electrical Engineers, 1984) Chapt. 3.
14. 김명규 등, 광전자공학학술회의 논문집, 235 (1996).
15. J. A. Dobrowolski *et al.*, *Applied Optics* **31**(19), 3784 (1992).
16. A. Hu and F. W. Cuomo, *J. of Acoustical Society of America* **91**(5), 3049 (1992).
17. F. W. Cuomo, *J. of Acoustical Society of America* **73**(5), 1848 (1983).