

유리 집적 광 센서

기술해설

Integrated-Optic Sensors in Glass

형 창 희, 김 중 헌

(Hyoung, Chang-Hee and Kim, Jong-Heon)

Key Words (중요단어) : Glass (유리), Integrated-optic sensor (집적광센서), Ion-exchange (이온교환), Silica-on-silicon (실리콘상의 실리카), Michelson interferometer (마이클슨 간섭계), chemical sensor (화학센서)

1. 서 론

코히런트 광원으로 레이저를 사용하고 광전송 매체로써 저손실의 유리섬유를 사용한 이래로 광통신의 기술은 급속히 발전되어 가고 있으며 그 응용분야의 범위도 넓어지고 있다.

그 중에서 하나의 기판 재료에 여러가지의 광소자들을 집적할 수 있는 집적 광학 (integrated optics)기술이 1969년 미국의 Miller에 의해서 소개되어 진 이후에 집적광회로 (integrated-optical circuits; IOCs)는 광통신 분야 뿐만아니라 센서 응용에도 적용되고 있다.¹⁾ 특히 수년전 부터는 여러가지 센서원리들이 소개되고 있는데 거리, 속도, 압력 그리고 물질농도등과 같은 물리적 크기들을 측정하는데 이용되어 오고 있다. 또한 새로운 집적광학 기술의 발전으로 집적광센서는 일반적으로 사용되던 전자화학적 센서의 대체 방법으로 주목을 받기 시작했으며 그 응용분야도 매우 다양해 지고 있다.²⁾

집적광센서는 측정물체와의 접촉이 없이 원격 조정 및 측정이 가능하고 센서의 크기를 최소화할 수 있을 뿐만아니라 경량화시킬 수 있는 장점이 있고 광신호를 이용하기 때문에 전기신호를 이용하는 기존의 센서와 비교하여 전자기 장해 (electromagnetic interference)가 전혀 발생하지 않으며 주변환경으로 부터의 영향에 민감하지 않으므로 정밀한 측정이 가능하다.

집적광회로를 이용한 광센서의 제작을 위해서는 가급적 감쇄가 적은 재료를 선택하여야 하는데 일반적으로 유리, LiNbO₃와 같은 유전체 크리스탈 또는 III-V족 화합물 반도체등을 사용한다. 이 중에서 유리의 경우는 매우 낮은 감쇄를 나타내며 제조공정 기술이 복잡하지 않고 제작비용도 적게 들어서 집적광센서용 재료로서 적합하다.

본 해설에서는 유리 집적광센서의 제작에 적합한 유리 재료들의 종류와 특성을 설명하였으며 이들 유리의 종류에 맞도록 개발되어진 제작 기술 중에서 이온교환 (Ion exchange) 방법과 silica-on-silicon (SOS) 방법을 소개하였다. 그리고 이러한 공정기술을 응용하여 제작되어진 유리 집적광센서 중에서 물체의 거리를 측정하기 위한 마이클슨 간섭계 (michelson interferometer)와 물질의 농도를 측정하기 위한 화학센서 (chemical sensor)들을 소개하였다.

2. 유리도파로 재료

집적광학의 응용을 위해서는 무엇보다도 가능한 낮은손실을 갖는 유리도파로의 재료선택이 필수적인데 유리종류를 선택하는데 있어서는 다음과 같은 몇가지 사항들을 고려하여야 한다.

- ① 높은품질의 표면을 갖는 큰면적의 기판
- ② 400~1600nm의 파장영역에서 매우 낮은 감쇄를 갖는 기판
- ③ 염수용해와 마스크 제작을 위해서 필수적인 부식용액에 대해서 충분한 화학적 안정성을 갖는 기판
- ④ 유리섬유의 굴절율과 잘 정합되는 낮은 굴절율을 갖는 재료

집적광학에서 사용되는 유리 재료는 일반적으로 사용되는 유리와 구별되어야 하며 따라서 높은 광학적 품질 (optical quality)과 매우 낮은 오차를 갖는 특수유리를 이용하여야 하므로 유리도파로의 제작 방법 및 사용되는 이온의 종류에 따라서 이에 적합한 유리재료들이 개발되었다. Shott사는 이를 위하여 BGG21, BGG31 그리고 BGG35와 같은 특수유리를 제작하였다.^{3,4)}

BGG21은 SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃-K₂O의 구성을 갖는 유리재료로 부분적으로 O₂대신에 fluorine으로 치환시킨 것으로 수정 유리섬유의 굴절율과 유사

한 굴절율 $n=1.468$ 을 갖는다. 따라서 광섬유와 집적광회로의 칩(chip) 결합시 큰 반사손실을 방지할 수 있다. 또한 300~1600 nm의 파장영역에서 높은 전송도 (transmission)를 나타낸다 (그림 1). BGG21은 특히 Cs^+ -이온교환에 적합하며 작은 확산상수를 갖기 때문에 단일모드 도파로에 사용되고 매우 낮은 감쇄를 나타낸다 ($<0.1 \text{ dB/cm}$). BGG31의 시스템은 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ 로써 BGG21의 구성에서 K_2O 대신 Na_2O 로 대체 시킨 것으로 BGG31은 BGG21과 마찬가지로 낮은 굴절율을 갖으며 400~1600 nm의 파장영역에서 높은 전송도를 갖고 만족할 만한 화학적 안정성을 나타낸다. BGG31은 Ag^+ 이온 교환을 이용한 다중모드 도파로의 제작에 적합하도록 개발되었으며 기판과 도파로의 굴절율 차이가 매우 작다. BGG35도 BGG31과 거의 유사하나 기판과 도파로의 굴절율 차이가 0.1 정도로 BGG31보다 매우 크다. 그림 2에서는 Ag^+ -이온교환시 AgNO_3 의 농도변화에 따른 BGG31과 BGG35의 굴절율 변화를 나타내었으며 그림에서 보는바와 같이 BGG31과 BGG35의 굴절율 차이가 매우 큰것을 알 수 있다. 표 1은 BGG21과 BGG31 유리재료의 특성들을 나타내었다.

집적광학에서 사용되는 또 다른 유리 재료로 실리카 유리가 있는데 실리카 유리는 5 Mol.-% ZrO_2 와 15 Mol.-% Na_2O 를 함유하고 있다.⁵⁾ 그러나 실리카 유리도파로의 경우에는 유리(glass)-필름(film)-디포지션(deposition)과 에칭을 통하여 수정 실리콘 기판위에 실리카 도파로를 형성 시키므로 제작공정 과정이 이온교환 방법과 다르다.

3. 유리도파로 제작기술

표 1. BGG 21유리와 BGG31유리의 특성

Table 1. Properties of BGG21 and BGG31.

	BGG21	BGG31
glass system	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$
partial substitution of O_2 by	fluorine	fluorine
K_2O in Mol.-%	12.5	-
Na_2O in Mol.-%	-	12.5
refractive index nd	1.468	1.474
transformation temperature T_g in $^\circ\text{C}$	415	437
Pure transmission τ i(400-1600nm/25nm)	>0.995	>0.995
alkali resistance	1.0	1.0
acid resistance	4.0	4.0
spot resistance	1.0	1.0

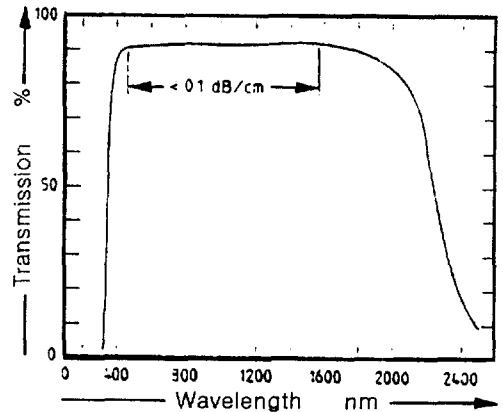


그림 1. BGG21의 전송도

Fig. 1. Transmission of BGG21.

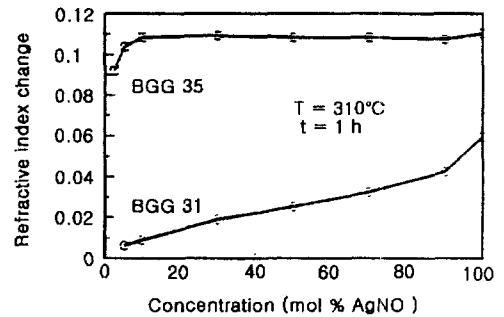


그림 2. BGG31과 BGG35에서 이온 농도에 따른 굴절율 변화

Fig. 2. Refractive index change depending on ion-concentration in BGG31 and BGG35.

유리도파로를 제작하기 위해서 일반적으로 이온교환방법과 SOS (silica-on-silicon)방법을 사용한다.

3-1. 이온교환방법

유리에서의 이온교환은 이전부터 잘 알려진 기술로써 광학유리를 제작할때 화학적으로 경화하는 과정에서 사용되어 왔었다. 이온교환 과정시 KNO_3 가 대표적으로 사용되었으며 이온교환을 통한 굴절율의 증가로 인해 도파영역을 만들수 있게 된다.^(6,7) 표 2는 이온교환시 사용되는 여러 가지 이온의 특성을 나타내었다.

이온교환 방법에는 열에 의한 이온교환 방법과 전자장에 의한 이온교환방법으로 구분할 수 있다. 열에 의한 이온교환 방법은 가장 단순한 이온교환 방법으로 그림 3 같이 Na^+ 이온을 갖는 유리기판을 높은 온도에서 K^+ 이온을 갖는 염용해에 담그면 용해에 포함되어 있는 이온들이 유리기판으로 확산되어 들어가게 되고 유리기판내에 있던 Na^+ 이온들이 유리표면으로 부터 이동하여 상호간에 이온들의 교환이 이루어지게 된다. 이때 용해로 부터 확산되어 들어온 이온들 때문에 유리기판에서 이 영역의 굴절율이 높아지게 되어 유리 광도파로를 형성하게 된다.

이온교환시 주의하여야 할 점은 사용되는 두 이온의 반지름의 차이가 작아야 하는데 그렇지 않으면 표면이 파손되게 된다. 그밖에도 염용액의 취급이 용이하여야 하는데 특히 가능한한 유독성분이 없어야 한다.

열에 의한 이온교환의 경우에는 교환과정이 매우 느린것이 큰 단점인데 특히 다중모드 도파로를 제작하기 위해서는 많은 시간을 필요로 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 그림 4와 같이 전기장에 의한 이온교환방법을 사용한다.

먼저, 유리기판의 윗면과 아랫면을 서로다른

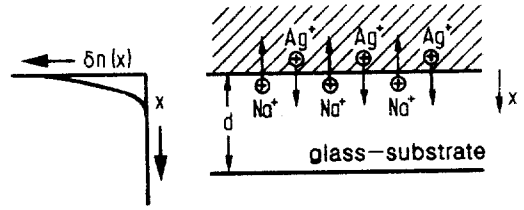


그림 3. 열에 의한 이온 교환
Fig. 3. Thermic ion-exchange.

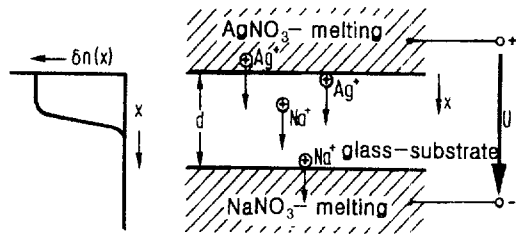


그림 4. 전기장 보조에 의한 이온교환
Fig. 4. Field assisted ion exchange.

두개의 용해로 부터 격리시키고 (에노드 용해와 캐소드 용해) 각 용해에 전극을 삽입시킨 후 외부로 부터 전기장을 가해준다. 이때 에노드용해에서 높은 굴절율 값을 갖는 금속이온 (K^+ 이온)들이 용해로 부터 유리기판 내부로 침투하여 들어가 고 유리내에서 자유롭게 이동하던 동일한 수만큼의 이온(Na^+)들이 유리 기판으로 부터 캐소드 용해로 이동한다. 열에 의한 이온교환과 전기장에 의한 이온교환시 생성된 유리도파로의 굴절율 분포를 보면 열에 의한 이온교환의 경우 굴절율 분포가 지수함수적으로 감소하는 반면에 전기장에 의한 경우에는 구형적인 분포를 나타낸다.

표 2. 염용해를 위한 이온
Table 2. Ions for salt melting.

ion	radius in pm	coordination number	index difference	LD50 in mg/kg	salt
Li^+	59	4	0.02	710	Li_2CO_3
Li^+	76	6			
Na^+	99	4	-0.02-0.002	1955	$NaNO_3$
Na^+	102	6			
K^+	138	6	0.009	1894	KNO_3
Rb^+	152	6	0.01	1200	$RbCl$
Cs^+	167	6	0.04	1200	$CsNO_3$
Ag^+	126	6	0.1 (0.22)	2820	Ag_2O
Tl^+	150	6	0.1	25	Tl_2SO_4

이와같이 이온교환 방법을 이용한 유리 집적광 소자를 제작하는 과정은 그림 5와 같다. 먼저 얇은 금속 또는 유전물질층을 형성하고 있는 웨이퍼 경화한 후 증발 시킨다. 일반적으로 포토리소그래픽 과정을 통해서 제작하고자 하는 도파로의 구조를 마스크에 부식시킨 다음 이온교환 과정을 거쳐서 유리도파로를 생성한 후 유리도파로의 표면에 손상이 가지 않도록 마스크를 제거한다.

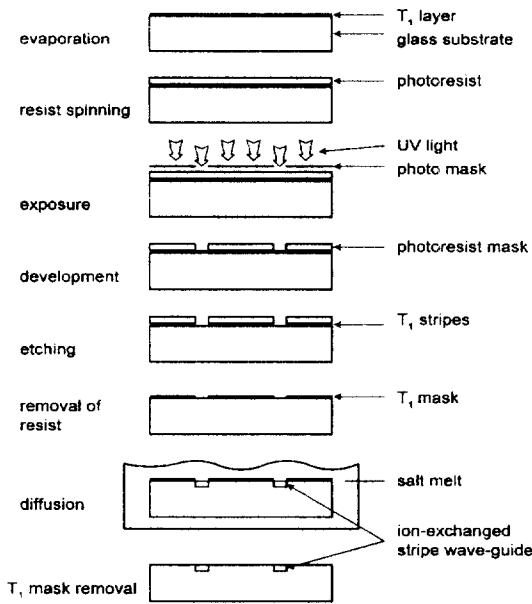


그림 5. 이온교환에 의한 유리도파로의 제작과정
Fig. 5. Fabrication process for ion exchanged glass waveguide.

3-2. SOS-제작방법

실리카 도파로의 제작을 위해서는 기존에 사용되는 이온교환 방법은 실리카 도파로 제작에 적용할 수 없으며 이에분여 여러가지 공정방법이 연구되었는데 그중에서 대표적인 방법은 표 3과 같다. 각 공정과정은 유리-필름 디포지션과 에칭 과정의 결합으로 이루어져 있고 광섬유와 저손실 채널 도파로가 최상으로 정합되기 위해서 일반적으로 flame hydrolysis deposition (FHD)방법과 reactive ion etching (RIE)방법을 사용한다. 이러한 방법에 의해서 제작된 실리카 도파로는 코어의 크기가 약 $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ 인 단일모드 도파로가 있으며 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 의 코어를 갖는 다중모드 도파로를 제작하는데 있어서도 매우 용이하다.

그림 6은 단일모드 매립형 도파로(buried

waveguide)의 제작과정을 나타냈다. 그림 6에서 보듯것과 같이 먼저 flame hydrolysis에 의해서 Si-기판위에 버퍼와 코어의 두 연속적인 유리입자층 들을 침전시킨후 기공이 있는 유리층들을 갖는 Si-웨이퍼를 경화시키기 위해서 1200~1300℃까지 가열한다. 이때 버퍼와 코어층은 각각 $20\mu\text{m}$ 와 $8\mu\text{m}$ 의 두께를 갖으며 버퍼와 코어의 굴절률 차이는 약 0.25%정도가 된다. RIE방법을 이용한 기존의 실리콘 집적회로 기술을 이용하여 채널도파로를 위한 코어를 형성시킨 다음 코어를 $30\mu\text{m}$ 정도의 두꺼운 FHD-SiO₂ 클래딩으로 덮어 띄워서 도파로를 매립시킨다. 실리콘 상의 실리카 도파로와 연관되어 있는 SiO₂와 Si의 물리적 특성은 표 4와 같다.

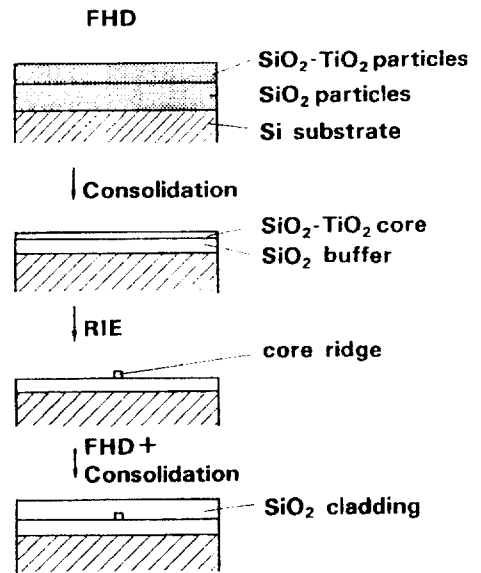


그림 6. SOS방법에 의한 유리도파로 제작공정
Fig. 6. Fabrication process of silica waveguide by SOS method.

4. 센서 응용

유리를 이용한 집적광센서들은 여러분야에서 적용어 되고 있는데 그중에서 대표적인 응용분야인 거리 측정과 화학성분의 농도를 측정하기 위하여 제작되어진 single michelson interferometer, double michelson interferometer 및 chemical sensor의 예를 들어서 실제 적용 가능성을 제시하고자 한다.

4-1. Michelson-Interferometer

표 3. 실리카 도파로의 제작 공정들

Table 3. Process of silica Waveguide fabrication.

Process	Glass	Ref.
FHD + RIE	SiO ₂ -TiO ₂	NTT
CVD + RIE	SiO ₂ -GeO ₂ SiO ₂ -P ₂ O ₅	LETI Bell
VD + RIE	SiO ₂ -TiO ₂	Hitachi

표 4. 실리카와 실리콘의 물리적 특성

Table 4. Physical properties of Silica and silicon.

	SiO ₂	Si
Refractive index	1.445	3.5
Wavelength λ (μm)	1.3	1.3
Transmission wavelength (μm)	0.12 to 4.5	1.2 to 10
Thermal conductivity (Wcm ⁻¹ deg ⁻¹)	0.014	1.6
Temperature coefficient of refractive index (10 ⁻⁵ deg ⁻¹)	1.0	
Specific heat (cal g ⁻¹ deg ⁻¹)	0.188	0.176
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ deg ⁻¹)	0.35	2.5
Young's modulus (10 ⁴ kgmm ⁻²)	0.78	1.1
Poission's ratio	0.19	0.42
Photoelastic constant (10 ⁻⁵ mm ² kg ⁻¹)	3.5	

높은 분석력을 가지며 접촉이 없이 원격으로 간섭계의 원리를 이용하여 거리를 측정하는 방법은 광센서의 기본적인 기능으로써 힘, 압력 그리고 굴절율과 같은 물리적 크기의 측정은 빛의 통과 경로에 대한 길이 측정으로부터 시작된다.

유리를 이용한 집적광 single michelson-interferometer(MI)에 의한 거리측정 센서의 구조는 그림 7과 같다.⁸⁾

먼저, 코히런트 광원으로 부터의 빛이 분극작용을 포함하고 있는 단일모드 광섬유를 통하여 MI에 전달된다. 이때 집적회로의 칩과 광섬유 사이의 접속시 발생하는 손실을 최소한으로 줄이기 위해서 도파로의 근접장(near field)과 유리섬유의 근접장이 서로 잘 정합되어야 한다. 광분배를 위해서 여기에서는 집적 광 방향성 결합기(directional coupler)를 사용하였다. 이 방향성 결합기의 출력단에는 측정 분기단(measuring arm)과 기준 분기단(reference arm)으로 구분되어 reference단에서 칩의 끝단에 거울을 붙여서 방향성 결합기로부터 분배된 일부 신호가 거울에

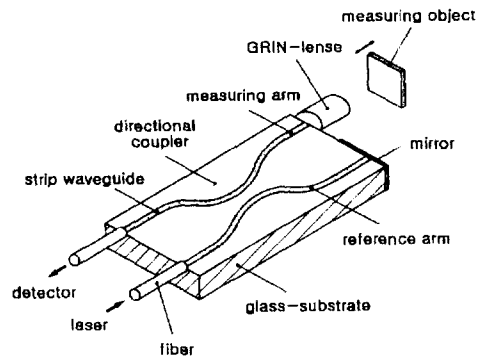


그림 7. 단일 Michelson 간섭계의 구조

Fig. 7. Structure of single Michelson interferometer.

의해서 전반사하여 검파기에 되돌아 간다. 그러나 측정 분기단은 GRIN-lens를 사용하여 측정 물체에 까지 평행한 광선들이 도달하여 반사되도록 하여 준다. 따라서 빛이 서로다른 거리를 거쳐서 진행한 후에 결합기를 통해서 다시 합쳐져

서 검파기에 전달 되는데 이때 검파된 빛의 밀도가 서로 간섭되어진 빛들의 위상차에 의해서 결정되어 진다.

그러나 Single MI의 경우에는 측정물체가 전방향 또는 후방향 중 한쪽으로만 이동하는 경우에서의 거리를 측정하는데 적합하며 측정물체의 진후 이동방향을 인식하면서 측정물체의 거리를 측정하기 위해서는 측정 신호들을 변조시켜야 하는데 이때는 열광학적 효과(thermo-optic effect)를 이용한 위상변조기(phase modulator)를 사용한 Double MI가 적합하다. 그림 8은 진후인식(forward-backward-recognition) 거리측정용 집적광 Double MI를 나타내었다.⁹⁾

Double MI는 진후식별의 필요성에 따라서 두 검파전류 I_{D1} 과 I_{D2} 의 직교 간섭계 신호들을 이용한다.

$$I_{D1} \sim \cos^2 \left[4\pi \left(\frac{n \Delta d}{\lambda_0} \right) \right] \quad (1)$$

$$I_{D2} \sim \sin^2 \left[4\pi \left(\frac{n \Delta d}{\lambda_0} \right) \right] \quad (2)$$

여기서 λ_0 는 측정파장, n 은 측정영역에서의 굴절율을 그리고 Δd 는 신호 반사계의 거리변화를 나타낸다.

여기서는 633nm의 파장을 갖는 HeNe-레이저를 광원으로 사용하였으며 빛이 분극작용을 포함하고 있는 단일모드 광섬유를 통하여 회로에 인가되고 Y-분파기(Y-beam splitter)에서 대칭으로 제작된 두개의 MI에 분배된다. 집적 광 방향성 결합기를 통하여 기준신호와 측정신호로 분리하고 측정신호를 collimation시키기 위해서 graded collimation lense를 사용하였으며 식 (1)과 식 (2)에서처럼 직교신호를 나타내기 위하여 기준분기

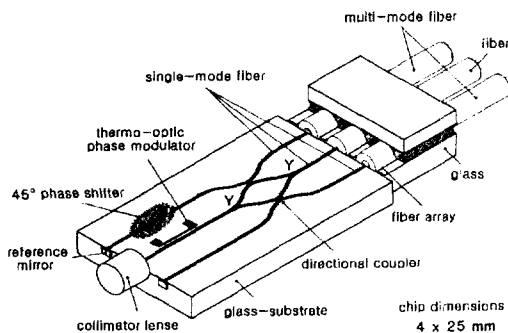


그림 8. 이중 Michelson 간섭계의 구조
Fig. 8. Structure of double Michelson interferometer

의 도파로를 45° 위상변화가 일어나도록 polishing하였다. 여기에서는 두개의 방향성 결합기를 사용하였으며 두개의 검파기들은 전방향 및 후방향으로의 이동을 감지하기 위하여 사용되어졌다.

4-2. Chemical sensor

최근에는 화학적 또는 생물학적 물질의 성분을 측정하기 위하여 광센서들이 많이 사용되고 있으며 보다 다양한 여러가지 방법으로 연구되어지고 있고 특히 집적광학을 이용한 센서들도 폭넓게 응용되어지고 있다. 여기에서는 그림 9와 같은 NH₃의 농도를 측정하기 위한 유리집적광센서를 소개 하였다.¹⁰⁾

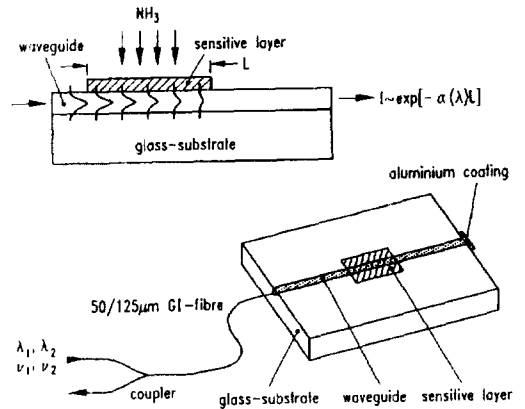


그림 9. NH₃ 센서의 구성도
Fig. 9. Block diagram of NH₃-Sensor.

집적광학을 이용한 화학센서들은 흡수성이 있는 evanescent field를 이용한 것으로 다중모드 스트립 도파로 위에 reaction-/indication-층으로 덮고 도파로에 파장이 600 nm인 레이저로부터 나온 빛이 통과하도록 했다. 이때 sensitive layer에 NH₃을 붙어 넣으면 immunized indicator가 노란색에서 파랑색으로 변하게 되고 색깔의 변화는 결국 도파로를 통해 진행해 나가는 빛의 감쇄를 가져온다. 이 감쇄는 sensitive layer에 있는 evanescent field의 흡수에 의해서 생기는 것으로 NH₃가 많이 닿을수록 감쇄가 증가하여 결국 도파로를 통하여 검파된 빛의 attenuation의 측정을 통하여 NH₃의 농도를 계산할 수 있게 된다. 그림 10에서는 500~700nm의 파장영역에서 서로다른 NH₃의 농도에 대한 집적광센서의 흡수 스펙트럼을 표시하였다. 파장이 600nm인 곳에서 흡수최대치가 나타나고 있으며 NH₃의 농도가

6 ppm인 경우 8 dB이상의 감쇄를 얻었다.

참 고 문 헌

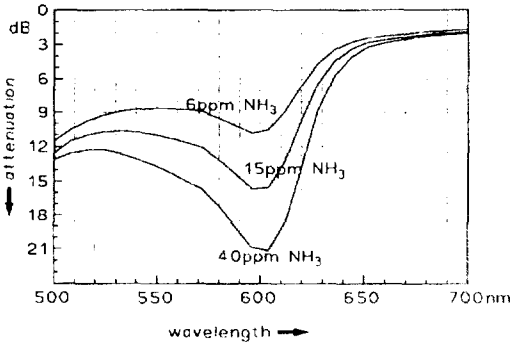


그림 10. NH₃ 농도에 따른 측정된 빛의 감쇄
 Fig. 10. The measured attenuation of beam according to NH₃ concentration.

5. 결 론

집적광학에서 사용되는 특수유리는 단순한 빛의 도파를 위하여 적합한 기판재료 중의 하나로 광전자 하이브리드(hybrid) 기술에 사용할 수 있는 우수한 기본 재료로서 평가 받고 있다. 유리를 이용한 집적광학은 여러가지 기술적 응용분야에서 시도되고 있으며 지난 몇년 간에는 통신과 센서분야에서 소자들이 개발되어 왔고 그중 일부는 상용화되었다. 유리를 이용한 집적광소자들을 상용화한 기업중에서 대표적인 기업으로는 프랑스의 Corning France, 독일의 IOT Entwicklungsgesellschaft fuer Integrierte Optik mbH 그리고 일본의 Nippon Sheet Glass (NSG) 등이 있다.

유리는 일반적으로 다른재료들 보다 제작공정이 간편할 뿐만아니라 비용이 저렴하기 때문에 집적광센서의 응용에 적합한 재료로 사용되어지며 Y-분배기 및 방향성 결합기와 같은 수동소자들은 이미 상용화 되어있다. 현재는 매우 간단한 기능을 갖는 소자 및 회로들이 제작되고 있지만 집적광학 기술의 지속적인 발전 추세로 볼 때 앞으로는 보다 복잡하고 다양한 회로들의 제작이 가능할 뿐 만아니라 그 응용범위의 폭도 넓어지리라 예측된다. 또한 기존에 사용되고 있는 유리재료 외에도 반도체로 도핑된 유리 (semiconductor doped glass) 또는 Nd로 도핑된 유리와 같은 특수재료의 개발로 광스위치 또는 능동소자들의 제작도 가능하리라 기대되며 따라서 보다 우수하고 경제적인 집적광센서 재료개발에 관한 지속적인 연구가 요구되어진다.

1. S. E. Miller, "Integrated optics : an introduction", Bell Tech. J., vol. 48, pp. 2059-2069, 1969
2. R. Kist, R. Th. Kersten, "Faser und integriert optische Monomode Sensoren", Laser und Optoelektronik, Nr. 1, pp. 17-30, 1984
3. L. Ross, "Improved substrates glass for planar waveguides by Cs ion-exchange", IGWO '86, Technical Digest, Atlanta, THBB2, 1986
4. N. Fabricius, "BG 3 : A New Glass for Multimode Waveguide Fabrication", EFOC/LAN '88, Amsterdam, Proc., pp. 59-62, 1988
5. M. Kawachi, "Silica waveguide on silicon and their application to integrated optic components", Optical and Quantum Electronics, vol. 22, pp. 391-416, 1990
6. T. Findakly, "Glass Waveguides by Ion-Exchange: A Review", Optical Engineering, vol. 24, pp. 244-250, 1985
7. H. J. Lilienhof, E. Voges, D. Diller, B. Pantshew, "Field Induced Index Profiles of Multimode Ion-Exchange Strip Waveguides", IEEE J. Quantum Electron., vol. No. 11, pp. 1877-1883, 1982
8. D. Jestel, "Integrated Optical Michelson Interferometry in Glass", Int. Congress on Optical Science and Engineering, Hamburg, 1988, SPIE vol. Micro Optics III, pp. 31-34, 1988
9. D. Jestel, A. Baus, E. Voges, "Integrated-optic interferometric micro-displacement sensor in glass with thermo-optic phase modulation", Electron. Lett. 26, pp. 1144-1145, 1990
10. R. Klein, E. Voges, "Integrated Optic Chemical Sensors", Micro System Technologies 91, Berlin, pp. 55-60, 1991