

실리콘 v-groove를 이용한 광섬유-광검출기 어레이 모듈 제작

(Fabrication of the Optical Fiber-Photodiode Array Module Using Si v-groove)

丁鍾珉*, 池尹圭*, 朴贊勇**, 劉址範***, 朴景鉉**, 金弘晚**

(Jong Min Cheong, Yoon Kyoo Jhee, Chan Yong Park, Ji Beom Yoo, Kyung Hyun Park and Hong Man Kim)

要約

본 연구에서는 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 1×12 메사형 PIN-PD 어레이를 이용한 광섬유-PD 어레이의 제작 및 특성 측정에 관해 다루었다. 고속 병렬 광섬유 데이터 링크에 이용할 수 있는 PIN-PD 어레이를 제작하기 위해 PIN-PD의 양자효율, 동작속도, PIN-FET 구조로 부터 수신감도 및 어레이에서 AC crosstalk 등 여러가지 변수를 두어 시뮬레이션한 후 설계/제작하였다. PIN-PD 어레이에서 단위소자는 활성층 영역(지름= $80 \mu\text{m}$)과 패드 부분(지름= $90 \mu\text{m}$)을 가진 메사형으로 설계하였으며, 단위소자 간격은 $250 \mu\text{m}$ 로 Si v-groove를 이용하여 패키징할 수 있게 하였고 AC crosstalk을 줄이기 위해 p-전극 패드 부분은 zigzag로 설계하였다. 제작된 소자가 설계 기준에 적합한지 여부를 판단하기 위해 그 특성을 측정하였다. 먼저, I-V 특성 측정 결과 암전류(I_d)는 -5 V 에서 1 nA 정도, C-V 특성 측정 결과 -5 V 에서 반절연(SI) InP 기판을 이용한 경우 0.9 pF 정도로 대개 균일한 특성을 보여주었다. 광섬유와 PD 사이에 효율적인 광신호 커플링을 위해 Si v-groove를 이용하였다. 10/125 SMF와 50/125 GI MMF 광섬유에서 나온 빔을 $80 \mu\text{m}$ 지름의 PD에 제안된 방법으로 커플링 할때 커플링 효율을 근사적으로 계산하였고 실험에 의해 그 응답도를 측정하였다. $1.55 \mu\text{m}$ 파장에서 SMF에 대해서는 0.93 A/W , 50/125 GI MMF에 대해서는 0.96 A/W 의 응답도를 보였다.

Abstract

We describe the design, fabrication, and performance of the optical fiber-photodiode 1×12 array module using mesa-type $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 1×12 PIN photodiode array. We fabricated the PIN PD array for high-speed optical fiber parallel data link optimizing quantum efficiency, operating speed, sensitivity from the PIN-FET structure, and electrical AC crosstalk. For each element of the array, the diameter of the photodetective area is $80 \mu\text{m}$, the diameter of the p-metal pad is $90 \mu\text{m}$, and the photodiode seperation is $250 \mu\text{m}$ to use Si v-groove. Ground conductor line is placed around diodes and p-metal pads are formed in zigzag to reduce AC capacitance coupling between array elements. The dark current(I_d) is 1 nA and the capacitance(C_{11}) is 0.9 pF at -5 V . No significant variations of I_d and CPD from element to element in the array were observed. We calculated the coupling efficiency for 10/125 SMF and 50/125 GI MMF, and measured the responsivity of the PD array at the wavelength is $1.55 \mu\text{m}$. Responsivities are 0.93 A/W for SMF and 0.96 A/W for MMF. The optical fiber-PD array module is useful in numerous high speed digital and analog photonic system applications.

* 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electrical Engineering, KAIST)
** 正會員, 韓國電子通信研究所 化合物半導體研究部
(Compound Semiconductor Research Group, ETRI)

*** 正會員, 成均館大學校 材料工學科
(Dept. of Material Engineering,
Seonggyungwan Univ.)
接受日字: 1993年 10月 4日

1. 서론

컴퓨터 분야와 통신 분야의 발전경향은 광대역(broadband), 초고속, 병렬처리 및 개선된 성능(신뢰도)을 향하고 있으며, 특히 공간 축소와 가격절감을 요구하고 있다. 이런 요구에 부응하기 위한 기술로서 단일 광전자 집적회로(monolithic optoelectronic IC) 기술이 각광을 받고 있다. OEIC 기술에서 광소자를 집적하는 방식은 두가지로 구분하여 생각할 수 있는데, 첫째는 여러 다른 기능을 가진 회로를 조합하여 집적하는 방식이고, 둘째는 같은 기능을 갖는 회로를 병렬로 집적하는 방식이다. 첫째 방식으로 집적한 예는 PIN-FET 집적 및 도파로-PIN PD(photodiode)의 집적 등이 있고, 둘째 방식의 예로는 LED(발광 다이오드), LD(laser diode) 어레이와 PIN-PD 어레이 등이 있다. 1960년대 초반에 반도체 레이저 발명 이래, 1980년대에 OEIC 개념이 도입되기 시작했고 작은 단위의 OEIC가 시도되었다. 이때 미국과 일본에서 LD, PD 어레이가 제작되었다.^[1,2] 그 이후 국내에서도 평면형 PIN PD 1X12 어레이가 제작된 바 있다.^[3] 1990년대에는 컴퓨터 분야에서 광을 이용한 병렬 상호연결 방식이, 통신 및 교환분야에서는 광교환 시스템이 개발될 전망이며, 광논리 소자를 포함한 광제어 시스템이 개발되어 2000년대에는 컴퓨터와 통신분야에서 광을 이용한 processing이 가능하리라 전망된다.

고속 고밀도 디지털 시스템의 상호연결에서 LED, LD 어레이 및 PIN-PD 어레이는 매우 중요한 소자이다. 이러한 어레이는 한 곳으로 집중되는 고밀도의 데이터 교환이 필요한 곳에서 소자가 차지하는 공간과 가격을 작게 하여 광채널을 이용한 데이터 전송방식 및 교환방식에 크게 기여할 것이다. 일반적으로 이런 어레이가 사용될 수 있는 곳을 살펴보면 다음과 같다.^[4,5]

첫째, 동떨어진 여러 지점의 광섬유가 star의 한 노드에 모이는 active star network를 갖는 시스템에서 사용될 수 있다. 파장분할 다중화 방식(WDM : wavelength division multiplexing)이나 시간분할 다중화 방식(TDM : time division multiplexing)으로 광교환을 하는 네트워크에서 고밀도의 상호연결을 갖는 star coupler에서 PIN-PD 어레이는 파장 demultiplexer에 한 부분으로 이용될 수 있다.

둘째, LD 어레이와 PIN-PD 어레이를 이용하여 상업지역과 주거지역에서 광섬유로 상호 연결된 광가입자 루프에도 이용될 수 있다.

셋째, 병렬처리 컴퓨터나 ATM(asynchronous transfer mode) 교환 시스템같은 차세대 대용량 디지털 시스템의 상호연결에 사용할 수 있다. 보통 컴퓨터의 I/O 인터페이스에서 병렬 인터페이스로 쓰이는 방식은 DC 커플링과 비동기식 전송방식인데 데이터 전송속도를 올리기 위해서는 광소자를 이용해 상호연결하는 것이 바람직하다.^[6] 전기적 배선에 의한 상호연결 방식은 기생 리액턴스, 임피던스 부정합, cross-talk, dispersion, skin 효과 및 pinout 문제등으로 소자들간 고밀도 집적에 많은 문제를 안고 있다. 특히, 고속 디지털 시스템의 동작속도 한계는 주로 패키징과 상호연결 기술에서 온다. 예를 들면, 가장 빠른 트랜지스터의 스위칭 시간은 10 ps 정도이나, 상업적으로 이용가능한 집적회로(GaAs IC)는 가장 빠른 것이 패키징에 의한 기생용량 등으로 인해 상승시간 및 하강시간이 100 ps 정도로 늦어지고, 보드와 보드를 상호연결 하였을 때는 상승시간이 1 ns 까지 늦어진다. 하지만 광학채널을 이용한 광 상호연결(optical interconnection)은 서로간의 커플링이 작고, 원신호의 손실 및 dispersion이 무시할 수 있을 정도로 작으므로 고속동작, 높은 집적도 및 장거리 전송에 유리하다. 이때 특히 어레이를 이용하여 병렬 인터페이스를 구현하면 직렬 인터페이스를 이용했을 때보다 간단한 회로로써 대용량 상호연결이 가능하다. 이러한 상호연결 구조에서 PIN-PD 어레이는 매우 유용하다.

본 연구에서 제작하고자 하는 부분은 광섬유-광검출기 어레이 모듈이다. 기존의 모듈들의 특성을 살펴보고, 본 연구에서 제안한 새로운 패키징 구조의 실험결과를 바탕으로 이 구조의 장점을 설명하고자 한다. 데이터 링크를 위한 어레이 모듈은 크기, 가격등을 포함한 compact한 설계가 요구된다.^[7] 기존의 광섬유-PD 어레이 패키징은 단순한 butt 커플링^[8,9]이나 광섬유를 45° polishing하여 커플링^[10] 하는 방식이다. Si v-groove를 이용한 제안된 방법은 전자에 비해 신뢰성과 패키징의 용이함과 더불어 광/전 인터페이스 면에서 우월하고, 후자에 비해 신뢰성과 패키징의 용이함에 있어서 우월하다. 특히 광섬유를 Si 기판에 embedding 시킴으로써 패키징을 더욱 쉽게 이룩할 수 있고, 보드간 광 상호연결등 시스템 응용성이 매우 크다고 보겠다.

제 2 장에서는 mesa형 PIN-PD 단위소자의 설계요건을 통해 PIN PD 1x12 어레이를 설계/제작하는 공정을 언급한다. Si v-groove에 대한 에칭원리를 간단히 설명하고 제작공정을 언급하며 광섬유-PD 어레이 얼라인 방법에 대해 설명한다. 또한 광섬유-PD

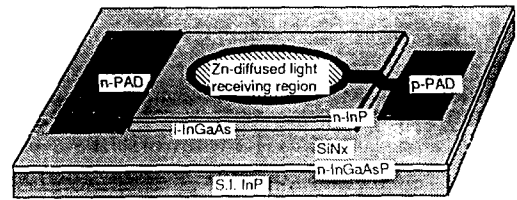
어레이 패키징에 대한 제작과정에 대해 언급한다. PIN-PD 어레이에서 각 단위 소자의 특성을 살펴보고 Si v-groove를 제작하여 효율성이 높고 패키징이 간편한 광섬유-PD 어레이간 광신호 커플링 방법에 대해 응답도 측정 결과를 언급한다. 광섬유로 SMF, 50/125 MMF를 각각 이용하였을때 커플링 효율을 계산하였고 실제 $80\ \mu\text{m}$ 지름을 가진 $250\ \mu\text{m}$ 간격의 PIN PD 어레이에 빛을 커플링 하였을때 응답도를 측정하였다. 측정 결과에 의하면 제안된 방법은 광섬유-PD 어레이 사이에 매우 효율적인 광신호 커플링 방법으로 여겨진다. 제 3 장에서는 이러한 결과들을 바탕으로 개선할 점등을 포함하여 앞으로의 전망에 대해 언급한다.

II. 광섬유-광검출기 어레이 모듈 제작 및 특성측정

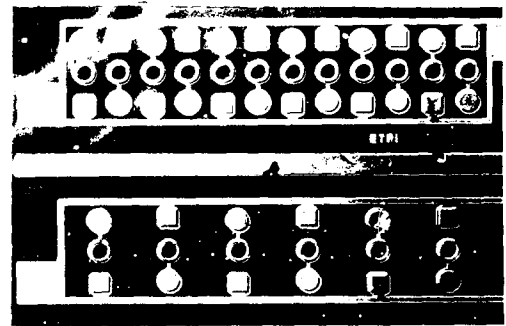
1. 메사형 PIN-PD 어레이 제작

메사형 PIN-PD는 신뢰도가 낮고 암전류가 크나 이를 보완할 수 있는 여러 기술들이 발전하고 있다. 특히 패드 캐패시턴스를 포함한 기생 정전용량을 크게 줄일 수 있어 고속동작 소자로 많은 관심의 대상이 되고있다. 제작된 메사형 PIN-PD 어레이 제작공정은 다음과 같다. SI(semi-insulating) InP 기판에 InGaAsP($1.3\ \mu\text{m}$ 조성)층, InGaAs층, 그리고 InP층을 순차적으로 성장한 wafer에서 lithography 공정을 시작한다. 광신호 흡수층으로 InGaAs 층의 두께는 $2\ \mu\text{m}$ 정도로 조절하였고 정전용량을 고려하여 잔류불순물 농도는 $2 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 정도로 조절하였다. 메사에칭을 통해 n-패드 부분과 p-패드 부분을 형성하였다. PECVD를 이용하여 SiNx를 코팅하고 이를 마스크로 지름이 $80\ \mu\text{m}$ 인 원형 opening을 형성 Zn를 확산하여 p-n 접합을 형성하였다. 절연막을 통해 n-전극 및 p-전극을 lift-off 방법으로 형성하였다. 증착에 이용된 금속은 Cr/Au($500\ \text{\AA}/5000\ \text{\AA}$) 이었다. 열처리를 통해 금속과 기판의 접착을 안정하게 하였다. 뒷면을 통해 광신호를 커플링하기 위해 뒷면을 $170(\pm 30)\ \mu\text{m}$ 까지 lapping한 후 polishing하여 AR(antireflection) 코팅을 하였다. AR 코팅은 $1.3 \sim 1.55\ \mu\text{m}$ 에 적합한 굴절율이 1.85 부근인 SiNx를 $1850\ \text{\AA}$ 두께로 하였다. 입사각이 20° 까지 반사율은 크게 문제되지 않는다. 입사각이 20° 일때 이 무반사막 두께에 대해 반사손실을 TE, TM 모드에 대해 이론적으로 계산하면 0.04 dB 이하로 무시할 수 있다. PIN PD 어레이의 단위소자 간격은 $250\ \mu\text{m}$ 이고 광신호 흡수 면적은 지름이 $80\ \mu\text{m}$ 정도이다.

제작된 단위소자 및 어레이 모습은 (그림 1)과 같다.



(a)



上 : 간격 $125\ \mu\text{m}$
下 : 간격 $250\ \mu\text{m}$

(b)

그림 1. 제작된 메사형 PIN-PD 단위소자 및 1×12 어레이(수광영역의 지름이 $80\ \mu\text{m}$ 이고 단위소자 간격은 $250\ \mu\text{m}$)

Fig. 1. Mesa-type PIN-PD unit device and 1×12 array(Diameter of the photodetective area is $80\ \mu\text{m}$ and separation is $250\ \mu\text{m}$)

단위소자에 대한 측정결과 암전류(I_d)는 $-15\ \text{V}$ 부근까지 수 nA 이하로 어레이 소자가 대개 균일한 특성을 보였으며, C-V 특성측정 결과 $-5\ \text{V}$ 바이어스 전압하에서 $0.9\ \text{pF}$ 이하로 균일하였다. 1×12 PIN PD 어레이의 단위소자들은 대개 균일한 특성을 보였다. 고속동작 소자로 PIN PD 어레이는 전기적 AC 누화(crosstalk)를 줄이기 위해 p-전극의 본딩패드는 지그재그로 제작하였고 주위에 그라운드 라인을 두었다.

2. 실리콘 v-groove 제작

광섬유 어레이와 PD 어레이 사이의 광신호 커플링을 위해서 많이 이용되고 있는 것은 Si v-groove이다. Si는 집적광학에서 광섬유-LD 또는 광섬유-PD

사이에 광신호 커플링을 위한 매개체로 많이 이용되고 있는 추세이다. 특히, Si v-groove는 광섬유를 고정할 수 있는 기계적 재료로서 뿐 아니라 반사면을 제공할 수 있어 매우 유용하다. 제안된 패키징 방법은 Si v-groove 자체 특성을 이용하여 광섬유를 embedding한 후 반사면을 통해 빛이 PD에 입사되도록 한다.

Si v-groove 에칭 원리(그림 2)는 다음과 같다.^[11,12]

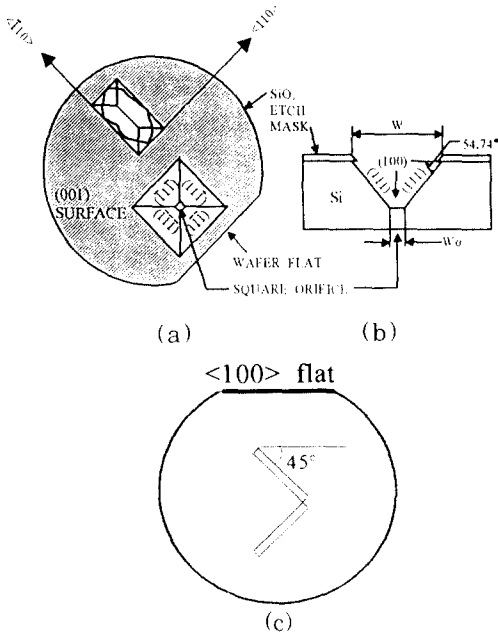


그림 2. 실리콘 v-groove를 위한 비등방성 에칭 (a) {111}면들이 측면을 이루어 v-groove를 형성하거나 사각형 hole을 형성한 모습 (b) v-groove의 단면도 (c) 에칭 용액에 따라 45°의 경사면을 얻을 수 있는 마스크 얼라인 방법.

Fig. 2. Anisotropic etching for Si v-groove (a) Self-limiting {111} etch planes define the sides of the v-groove of hole (b) Cross section through a v-groove (c) Mask align method to get walls having 45° angles to the surface using the etchant.

Si 기판은 단결정이므로 결정면의 방향에 따라 원자배열 밀도 및 원자간 결합구조가 다르다. 비등방성 에칭은 결정표면에서 결합에 참가하지 않는 bond 수가 많아질수록, 원자배열 밀도가 낮아질수록 에칭되

는 속도가 빨라지는 것을 이용한다. 보통 (100) 또는 (110) 방향의 결정면이 (111) 방향 결정면보다 매우 빠르게 에칭되므로 (100) 또는 (110)의 기판을 이용하여 에칭한다. (100) 기판을 이용하고 v-groove의 방향을 (110)으로 하면 위 두 방향에 대해서는 빠른 속도로 에칭되다가 v-groove의 빗면에 해당되는 (111)면들을 만나면 에칭 속도가 느려져 v-groove를 얻을 수 있다. 비등방성 에칭용액으로 보통 KOH 용액, KOH/IPA(IPA: Iso Propyl Alcohol)용액, 또는 EDP(Ethylene Diamine Pyrocatechol)용액을 이용한다. KOH/IPA용액의 (100)/(111) 에칭 비율은 400:1 정도이고 EDP용액의 에칭 비율은 35:1 정도이다. 이 때 기판 표면과 v-groove 빗면은 54.74°의 각을 이루게 된다.

KOH/IPA 용액이나 EDP 용액을 이용하여 (100) Si 기판에 $\langle 100 \rangle$ 방향으로 마스크를 얼라인하면 (그림 2(c)) 45°의 경사면을 갖는 v-groove를 제작할 수 있는데 이는 매우 까다롭고 특히 under-etching에 의해 packing 밀도가 줄어들어 250 μm 어레이에 대해 효과적인 광신호 커플링을 이루기 어렵다. 이 경우에는 v-groove에 광섬유 embedding이 어려워 단위소자의 패키징에만 효율적이다.^[13,14]

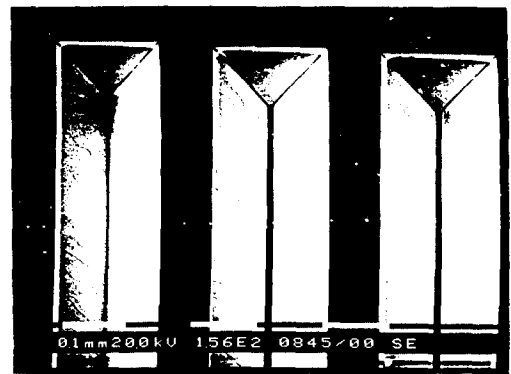


그림 3. Si v-groove 반사면에 대한 SEM 사진
Fig. 3. SEM micrograph of the Si v-groove.

비등방성 용액에 대한 에칭마스크로 SiO₂나 SiN_x막을 이용하는데 본 실험에서는 KOH용액에 대한 보다 마스크 특성이 좋은 SiN_x막을 이용하였다. 특히, 본 실험에서 이용되는 패키징 방법을 이용하기 위해 반사면이 형성될 부분은 매우 깨끗하게 에칭이 되어야 하는데 이는 (그림 3)의 SEM 사진을 통해 확인한 결과 매우 깨끗하게 v-groove가 형성되었음을 알 수 있다.

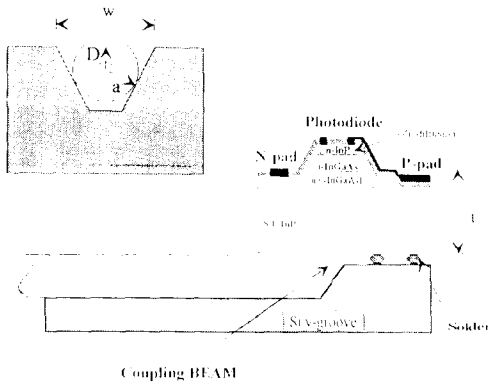


그림 4. 광섬유-PD 어레이간 광신호 커플링 개념도
Fig. 4. Schematic view for optical coupling between optical fiber and PD.

본 연구에서 새롭게 제안한 광섬유-PD 어레이 사이의 광신호 커플링 개념도(그림 4)를 통해서 Si v-groove의 에칭폭을 결정하고 얼라인을 용이하게 하기 위해 계산되어야 할 변수는 다음과 같이 얻을 수 있다.

Si v-groove의 폭을 W, 에칭된 깊이를 h, 광섬유 반지름을 a, InP기판의 두께를 t, 그리고 1.3 - 1.55 μ m 파장 영역에서 InP의 굴절율을 3.2 라고 하면 Si 표면에서 광섬유 중심까지의 거리 D 및 얼라인되어야 하는 PD의 중심위치 X_{PD} 는 다음 식으로 주어진다.

$$D = \frac{W}{2} \tan(54.74^\circ) - \frac{a}{\sin(90^\circ - 54.74^\circ)} \quad (1)$$

$$X_{PD} = \frac{h - D}{\tan(54.74^\circ)} - a \tan(19.48^\circ) - t \tan(5.97^\circ) \quad (2)$$

이 때 W, h, t를 조절하여 X_{PD} 값을 0으로 (즉, v-groove내의 에칭 멈춤선) 하면 PD 어레이 중심을 이 선에 맞추어 쉽게 얼라인하여 패키징할 수 있다. 이러한 방법은 SMF, MMF와 PD 어레이간 광신호 커플링에 대해 매우 경제성이 있는 패키징 방법이라고 생각된다. 제작된 Si v-groove의 폭 W는 210 μ m 이고 깊이 h는 110 μ m였다. 계산된 X_{PD} 는 InP의 두께 t가 170(\pm 30) μ m 일때 값이 공기층일때 9.6 (\pm 3) μ m 이고 값이 굴절율이 1.5 정도인 UV 에폭 시일때 0(\pm 4.7) μ m 이다.

Si v-groove 에칭 후 Au를 E-beam으로 증착하여 1.3-1.55 μ m 파장대역에 효과적인 반사면(mirror 면)을 형성하여 다음 공정으로 들어간다.

3. 광섬유-PD 어레이 사이의 광신호 커플링

Si v-groove에 embedding된 광섬유의 단면을 나타은 광신호가 Au로 코팅된 54.74°의 Si 경사면을 통해 반사되어 PD의 중심부에 입사되는 원리는 (그림 4)에서와 같다. 이 방법은 어레이에 대한 기존의 butt 커플링 방법이나 광섬유를 45° polishing하고 여기에 거울면을 형성하는 방법등에 비해 패키징이 매우 용이하며 안정성이 높고 경제적이며, 특히 전치 증폭기를 포함한 광 수신회로 및 논리회로들을 포함한 전기적 회로들과 평면적 상호연결을 가능하게하여 시스템 설계자에게 많은 잇점을 제공한다. 특히, 광신호의 경로를 반사면을 통해 변환시켜 한 평면 상에 O/E소자 및 전자회로를 상호연결할 수 있어 OEIC를 포함한 광전회로의 집적화를 보다 유리하게 할 수 있을 것으로 기대한다.

광섬유-PD 어레이 광신호 커플링을 위해 이용된 광섬유는 10/125 SMF(singlemode fiber)와 50/125 GI MMF(graded index multimode fiber)이다. SMF와 MMF의 끝단에서 나오는 광신호의 profile은 광원에서 광섬유에 입사되는 빛에 따라 또는 광원의 종류 및 커플링 방법에 따라 차이가 있을 수 있다. 본 실험에서는 커플링 효율을 예측하기 위해 다음과 같은 순서로 광신호 profile 및 커플링 효율을 예상하였다.

먼저, SMF의 단면에서 거리에 따른 빔 profile을 계산하기 위해서는 다음과 같이 하였다. 광섬유 단면에서 계산된 near-field profile로부터 거리에 따른 빔 profile을 계산하였다. 이 때 고려되어야 하는 것은 Si 기판과 빔면의 각도가 54.74°이고 PD의 active 영역 지름이 80 μ m이라는 것이다. Gaussian beam에 대한 해석을 기초로 하여 광섬유 단면에서 전자장(E-field)를 다음과 같다고 가정하자.¹⁵⁾

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{\omega_0}{w(z)} e^{-j(kz - \eta(z))} e^{-\frac{r^2}{2w(z)}} e^{-j\frac{kr^2}{2R(z)}} \quad (3)$$

$$\omega_0 = \frac{MFD}{2} \quad \text{MFD: mode field diameter} \quad (4)$$

$$z_0 = \frac{\pi \omega_0^2 n}{\lambda} \quad (5)$$

$$w^2(z) = \omega_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2}\right) \quad (6)$$

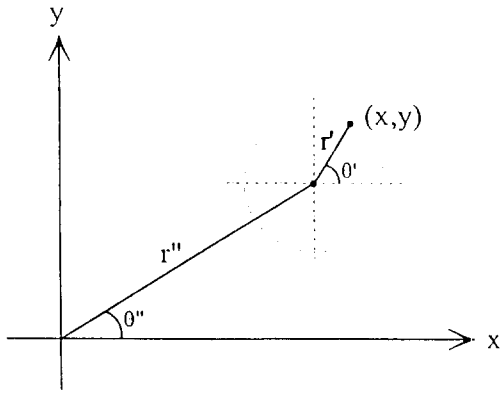
$$R(z) = z \left(1 + \frac{z_0^2}{z^2}\right) \quad (7)$$

$$\eta(z) = \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (8)$$

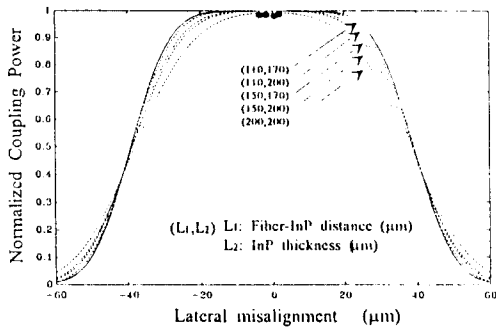
물론 이 빔은 Si 반사면을 지나고 굴절율이 다른 InP 로 입사되어 진행한다. 이러한 인터페이스에 대한 ray matrix를 이용하여 빔의 폭, $w_3(z)$, 을 거리 z 에 대해 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\omega_3(z) = \left[\frac{\lambda}{\pi} \frac{(n_{InP}l_1 + l_2)^2 + (n_{InP}z_0)^2}{n_{InP}^2 z_0} \right]^{1/2} \quad (9)$$

여기에서 n_{InP} 은 InP 의 굴절율(1.3-1.55 μm 에서 3.2) 이고 l_1 은 광섬유에서 InP 기판까지 빔의 진행거리, l_2 는 InP 기판 두께이다.



(a)



(b)

그림 5. SMF-PD간 어레이간 광신호 커플링 개념도 (a) 좌표도 (b) 얼라인 오차에 따른 커플링 효율 변화

Fig. 5. Calculation of coupling efficiency between SMF and PD (a) Geometry (b) Coupling efficiency variations to misalignment.

커플링 효율 및 채널간 광학적 누화를 계산하기 위해 필요한 식은 (그림 5(a))와 같은 좌표하에 대해서 다음 식으로 표현된다.

$$P_d = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^d \frac{1}{\eta} EE^* dr' d\theta' \quad (10)$$

$$= \frac{1}{2\eta} \left(\frac{E_o \omega_o}{\omega_3(z)} \right)^2 e^{-\frac{2r'^2}{\omega_3^2(z)}} \int_0^{2\pi} \int_0^d e^{-\frac{r'^2 + 2r'r'' \cos \theta'' - \theta'}{\omega_3^2(z)}} dr' d\theta' \quad (11)$$

PD의 active 면적에 입사되는 광신호의 크기를 mis-alignment되는 x, y축의 크기에 따라 비교하여 보면 $z=200 \mu\text{m}$ 일 때 (그림 5(b))와 같다. 이때, MFD는 $9.6 \mu\text{m}$, 파장은 $1.3 \mu\text{m}$, 그리고 빔은 자유공간을 통해 InP 로 입사된다. 그러므로 $\pm 20 \mu\text{m}$ 정도의 정렬 오차에 대해서 95 % 정도 이상의 커플링 효율을 보장한다. 물론 이때 Si 반사면과 무반사막 등 다른 부분에서 손실등의 영향이 없을 때를 포함하였다. 계산된 광학적 누화(optical crosstalk)는 무시할 수 있을 정도로 매우 작았다.

다음으로 50/125 GI MMF에 대한 빔 profile과 커플링 효율은 다음과 같이 예측하였다. GI MMF의 빔 profile 및 커플링 효율을 계산하기 위해서는 광섬유의 NA(numerical aperture)와 여기조건 등을 알아야 한다. 보통 50/125 GI MMF의 경우 NA는 0.19 - 0.25 사이이다. 광신호 파워 밀도 분포를 알기 위해서는 near-field 패턴을 알아야 하는데 이는 국부적인 NA값에 따른다고 보통 알려져 있다. [16,17]

이러한 계산에 필요한 가정들은 다음과 같다.

o 광원 : incoherent 광원 (모든 모드가 균일하게 여기됨) 단면의 어느 점에서도 단위 solid angle에 대한 입사 광전력 균일

o 광섬유 굴절율 분포 :

$$n(r) = n_o \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \quad r < a \quad (\text{코어}) \quad (12)$$

$$= n_o \left[1 - 2\Delta \right] \quad r > a \quad (\text{클래딩})$$

(Δ 상대적 굴절율 차이, g 굴절율 파라미터, a : 광섬유 반경)

o 국부적인 NA :

$$A(r) = n(r) \sin \theta_c(r) = \left[n^2(r) - n_c^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

o 모든 진행 모드는 감쇠율이 같고 커플링이 없음
광섬유 끝에서 거리가 z 만큼 떨어진 지점의 좌표평면 (r, ϕ) 에서 광섬유 끝단의 좌표평면 (r', ϕ') 점에 기인한 광전력 밀도는 다음과 같다. (그림 6(a))

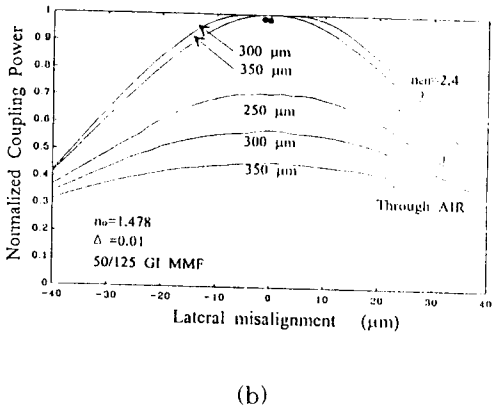
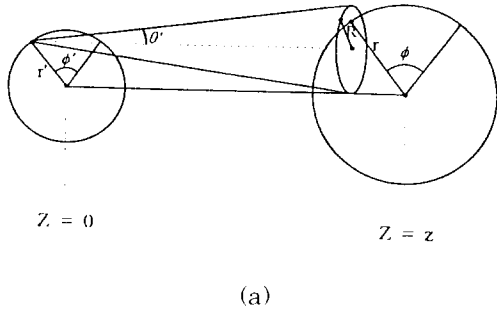


그림 6. GI MMF-PD간 커플링 효율 계산 (a) 좌표도 (b) 얼라인 오차에 따른 커플링 효율 변화

Fig. 6. Calculation of coupling efficiency between GI MMF and PD (a) Geometry (b) Coupling efficiency variations to misalignment.

$$\Delta P(r, \phi) = \frac{P(r')r'd\phi'dr'}{\pi R^2} \tag{14}$$

$$R = r_1 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{15}$$

$$r_1 = 2n_0 \sqrt{2\Delta}$$

이제 해야되는 일은 r' 과 ϕ' 의 범위를 찾아 적분하는 것이다.

$$P(r, \phi) = \int_{r'} \int_{\phi'} \frac{P(r')r'}{\pi R^2} d\phi' dr' \tag{15}$$

$$R(r', z) = z \tan \theta' \approx z \sin \theta' = zA(r') \tag{16}$$

$$= 2n_0(2\Delta)^{1/2} \left[1 - \left(\frac{r'}{a} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$g=2$ 일때, 먼저 ϕ' 의 범위를 찾아 보면 $P(r, \phi)$ 에 영향

을 미치는 범위는 다음과 같다.

$$\phi - \Delta\phi \leq \phi' \leq \phi + \Delta\phi \tag{17}$$

$$\phi - \cos^{-1} \left(\frac{r^2 + r'^2 - R^2}{2rr'} \right) \leq \phi' \leq \phi + \cos^{-1} \left(\frac{r^2 + r'^2 - R^2}{2rr'} \right)$$

(r', ϕ) 의 좌표에서 $\Delta\phi$ 가 π 인 영역은 $\left| \frac{r^2 + r'^2 - R^2}{2rr'} \right| > 1$ 인 조건을 만족하는 다음 r' 에 대해 식 (20)과 같은 범위가 주어진다.

$$r' = \frac{1}{1 + \left(\frac{r_1}{a} \right)^2} \left\{ r \pm \frac{r_1}{a} \sqrt{a^2 + r^2 - r^2} \right\} = \{\alpha_1, \beta_1\} \quad \alpha_1 < \beta_1 \tag{18}$$

$$r' = \frac{1}{1 + \left(\frac{r_1}{a} \right)^2} \left\{ -r \pm \frac{r_1}{a} \sqrt{a^2 + r_1^2 - r^2} \right\} = \{\alpha_2, \beta_2\} \quad \alpha_2 < \beta_2 \tag{19}$$

- ① $0 < r < r_1 \Rightarrow 0 < r' < \beta_2$
 $\beta_1 < r' < a$ (20)
- ② $r_1 < r < r_{\max} \Rightarrow 0 < r' < \alpha_1$
 $\beta_1 < r' < a$

다음으로 r' 의 범위를 찾아보면 ϕ factor 가 아닌 다음과 같은 영역을 구할 수 있다.

$$r' - R < r < r' + R \tag{21}$$

위 식으로부터 r 의 범위에 따른 r' 의 범위는 다음과 같이 주어진다.

- 1. $0 < r < r_1 \Rightarrow 0 < r' < \beta_1$
- 2. $r_1 < r < r_{\max} \Rightarrow \alpha_1 < r' < \beta_1$ (22)

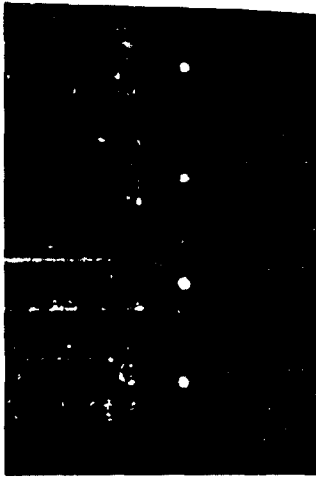
위 식들을 통해 ϕ 에는 무관한 커플링 광전력 밀도 $P(r)$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P(r) = 2\pi \int_0^{\beta_1} \frac{P(r')r'}{\pi R^2} dr' + 2 \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos^{-1} \left(\frac{r^2 + r'^2 - R^2}{2rr'} \right) \frac{P(r')r'}{\pi R^2} dr' \quad 0 < r < r_1 \tag{23}$$

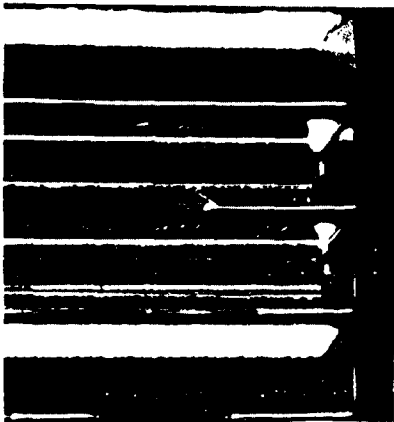
$$= 2 \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \cos^{-1} \left(\frac{r^2 + r'^2 - R^2}{2rr'} \right) \frac{P(r')r'}{\pi R^2} dr' \quad r_1 < r < r_{\max}$$

위 식으로부터 얻은 거리와 얼라인에 따른 커플링 효율은 (그림 6(b))와 같다. 이때 광섬유는 50/125 GI MMF, $\Delta=0.01$, $g=2$, $n_0=1.47$ 이다. 실제로 InP 기판에서의 굴절율을 고려하면 이러한 계산값보다 더욱 향상된 커플링 효율을 얻을 수 있을 것이다. 실제로 $\pm 10 \mu\text{m}$ 의 정렬 오차에 대해서 0.5 dB 이하

의 커플링 손실을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.



(a)



(b)

그림 7. 광섬유를 v-groove에 고정된 후 관찰한 사진 (a) FC 커넥터가 달린 4개의 SMF를 나온 빛이 v-groove의 반사된 모습 (b) 2개 MMF의 코어부분이 v-groove의 반사면에 반사된 모습

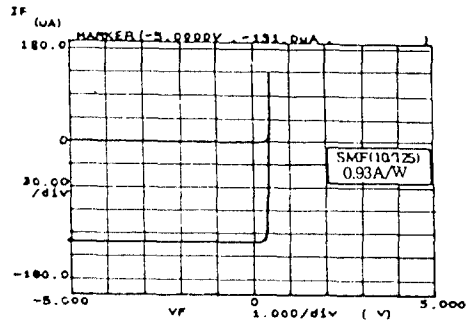
Fig. 7. Photomicrographs about optical fiber embedded on Si v-groove (a) View of the reflected beams from 4 optical fibers(SMF) having FC connectors (b) View of the reflected cores of GI MMF by v-groove reflectors.

4. 광섬유-PD 어레이 패키징 및 특성측정
광섬유와 PD사이에 광신호 커플링을 위해 probe

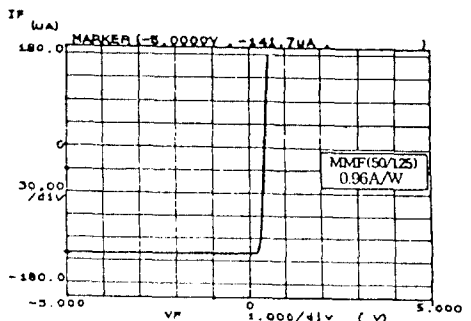
station과 UV 에폭시 UV-300을 이용하였다. 이 UV 에폭시의 점도(viscosity)는 5000 cps이고 비교적 약한 UV 광원에 의해 반응한다. (그림 7)은 광섬유-PD 열라인 후 모습을 보여 주고 있다. 첫 번째 사진은 4개의 SMF를 통한 빛이 Au 코팅된 반사면에서 방향을 바꾸고 있는 사진이며, 두번째 사진은 2개의 MMF 코어 부분이 Si 반사면에 깨끗하게 반사되고 있는 모습을 보여주고 있다.

이렇게 광섬유를 Si v-groove에 고정된 후 PD 어레이를 열라인하여 모듈을 제작하였다.

패키징된 광섬유-PD 어레이 사이의 광신호 커플링 효율을 측정하였다. 안정된 power를 제공하는 1.55 광원과 광 파워미터, probe station, 그리고 HP parameter analyzer를 이용하여 DC에 대한 I-V 특성 곡선을 통해서 커플링 효율을 추정할 수 있다.(그림 8)



(a)



(b)

그림 8. 응답도 측정결과

(a) SMF-FD (b) MMF-PD

Fig. 8. Responsivity measurements

(a) SMF-PD (b) MMF-PD.

PIN-PD 단위소자의 흡수층 i-InGaAs층은 2 μm

두께이다. 특히, 1.55 μm 에서 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 층의 흡수상수 α 는 0.68 / μm 이다. 이 때 계산되는 양자효율은 74 % 정도이고, 응답도(responsivity)는 0.93 A/W이다. 50/125 GI MMF의 경우 측정된 응답도는 -5 V 바이어스 전압에서 0.96 A/W, SMF의 경우 0.93 A/W였다. 결국, 이러한 광신호 커플링 방법은 응답도를 SMF에 대해서는 100 %, MMF에 대해서는 103 % 로 향상시켰다. 이는 흡수되지 않은 빛이 PD의 p-전극 부위에서 반사되어 되돌아가 다시 입사되어 생기거나 흡수층이 2 μm 이상이어서 생길 결과로 해석할 수 있다. SMF와 GI MMF의 외부 커플링 효율에 대해서 고려해야 하는 것은 FC 커넥터의 최고 손실인 0.3 dB 손실, Si 반사면 손실, 무반사막에서의 손실 등이 있다. 이들을 고려하여도 전체 커플링 손실은 SMF에 대해 0.5 dB 이하, 그리고 MMF에 대해서는 그 이하이라 생각한다.

III. 결론

본 연구에서는 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 1×12 PIN-PD 어레이를 이용한 광섬유-PD 어레이의 제작 및 특성 측정에 관해 다루었다. 고속 병렬 광섬유 데이터 링크에 이용할 수 있는 PIN-PD 어레이를 제작하기 위해 PIN-PD의 양자효율, 동작속도, PIN-FET 구조로 부터 수신감도 및 어레이에서 AC crosstalk을 여러가지 변수를 두어 시뮬레이션한 후 설계하였다. PIN-PD 어레이에서 단위소자는 활성층 영역(지름=80 μm)과 패드 부분(지름=90 μm)을 가진 메사형으로 설계하였으며, 단위소자 간격은 250 μm 로 Si v-groove를 이용하여 패키징할 수 있게 하였고 AC crosstalk을 줄이기 위해 p-전극 패드 부분은 zigzag로 설계 하였다. 제작된 소자가 설계 기준에 적합한지 여부를 판단하기 위해 그 특성을 측정하였다. 먼저, I-V 특성 측정 결과 암전류(I_d)는 -5 V 에서 1 nA 정도, C-V 특성 측정 결과 -5 V에서 SI InP 기판을 이용한 메사형의 경우 0.6~0.9 pF 정도로 대개 균일한 특성을 보여주었다. 둘째, 광섬유와 PD 사이에 효율적인 광신호 커플링을 위해 Si v-groove를 이용하였다. 10/125 SMF와 50/125 GI MMF 광섬유에서 나온 빛을 80 μm 지름의 PD에 제안된 방법으로 커플링 할때 커플링 효율을 근사적으로 계산하였고 실험에 의해 그 응답도를 측정하였다. SMF에 대해서는 0.93 A/W, 50/125 GI MMF에

대해서는 0.96 A/W의 응답도를 보였다.

결국, 제작된 1×12 PIN-PD 어레이를 포함한 광섬유-광검출기 어레이는 고속 병렬 광섬유 데이터 링크에 이용할 수 있을 것으로 여겨진다. 그리고 패키징 기술을 보완하면 수 Gbit/s/ch 급 병렬 광섬유 데이터 링크에 이용될 수 있을 것으로 예측한다.

參考文獻

- [1] Y. Ota, R. C. Miller, S. R. Forrest, D. R. Kaplan, C. W. Seabury, R. B. Huntington, J. G. Jhonson, and J. R. Potopowicz, "Twelve-channel individually addressable InGaAs/InP p-i-n photodiode and LED arrays in a compact package," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. LT-5, no. 8, p. 1118, 1987.
- [2] Kazuhisa et al., "12-channel parallel optical fiber transmission using a low drive current 1.3 μm LED array and a p-i-n PD array," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 8, no. 6, p. 883, 1990.
- [3] 정종민, 박찬용, 이창원, 박경현, 지윤규, 이윙탁, "InGaAs/InP 평면형 PIN-PD 1×12 어레이 제작 및 특성 측정", *전자공학회논문지 제29권(A편)*, 제5호, pp. 26-35, 1992.
- [4] P. Selway and J. Mun, "Integration yields optoelectronic components for the 1990s," *Laser Focus World*, p. 169, oct., 1989.
- [5] P. A. Kirkby, "Multichannel wavelength-Switched Transmitters and Receivers- New Component concepts for broad-band networks and distributed switching systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 8, no. 2, P. 202, 1990.
- [6] D. Z. Tsang, "Optical interconnections in digital systems- status and prospects," *Optics & Photonics News*, p. 23, oct., 1990.
- [7] T. Nakagami, "Optical fiber interconnection links for high-speed switching and computer systems", *Photonics in*

- Switching*, pp. 74-76, 1993.
- [8] T. Nagahori, et al., "150Mbits/s/ch 12-channel optical parallel interface using an LED and a PD array", *Optical and Quantum Electronics*, 24, pp. S479-S490, 1992.
- [9] F. Shimitzu, et al., "Optical parallel interconnection characteristics of 4-channel 2-Gbit/s bit synchronous data transmission module", Proc. of 42nd ECTC, pp. 77-82, 1992.
- [10] Y. Arai, et al., "Multigigabit multichannel optical interconnection modules for asynchronous transfer mode switching systems", Proc. of ECTC, pp. 825-830, 1993.
- [11] K. E. Petersen, "Silicon as a mechanical material", *Proc. IEEE*, vol. 70, no. 5, pp. 420-455, 1982.
- [12] K. E. Bean, "An Isotropic etching of Silicon", *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-25, no. 10, pp. 1185-1193, 1978.
- [13] J. H. Kim, et al., "High-performance back-illuminated InGaAs/InAlAs MSM photodetector with a record responsivity of 0.96A/W", *IEEE Photon. Technol. Letters*, vol. 4, no. 11, pp. 1241-1243, 1992.
- [14] Y. Backlund, et al., "Optical planes and reflectors, anisotropically etched in silicon", *The 7th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 1031-1033, 1993.
- [15] A. Yariv, *Quantum Electronics*, 3rd Ed. John Wiley & Sons, 1989.
- [16] D. Gloge, et al., "Multimode theory of graded-core fibers", *B.S.T.J.*, vol. 52, no. 9, pp. 1563-1578, 1973.
- [17] A. A. P. Bochat, et al., "Dependence of output near-field profile on launching conditions in graded-index fibers used in delivery systems for Nd:YAG lasers", *Appl. Optics*, vol. 32, no. 3, pp. 291-297, 1993.

 著者紹介



丁鍾珉(正會員 加入豫定)

1968年 12月 16日生. 1990年 2月 한국과학기술대학 정보통신학과 졸업. 1992년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사학위 취득. 1992년 3월 ~ 現在 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사

과정 재학중. 주관심 분야는 광수신기, WDM 소자 및 광 상호연결 시스템 등임.

池尹圭(正會員) 第 27卷 第 11號 參照

現在 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 부교수

朴贊勇(正會員) 第 27卷 第 5號 參照

現在 한국전자통신연구소 화합물반 도체개발실 선임연구원

劉址範(正會員) 現在 성균관대학교 재료공학과 조교수

朴景鉉(正會員) 第 27卷 第 4號 參照

現在 한국전자통신연구소 화합물반 도체개발실 선임연구원

金弘晚(正會員) 現在 한국전자통신연구소 광전자 연구실 실장