

자유공간 광연결을 위한 송수신 모듈의 제작 및 성능 분석

(Fabrication and Characterization of the Transmitter and Receiver Modules for Free Space Optical Interconnection)

金大根*, 金成俊*

(Dae-Keun Kim and Sung-June Kim)

要約

본 논문에서는 자유공간 광연결에 사용하기 위한 송수신 모듈을 제작하여, 그 특성을 측정하였다. 송신 모듈에는 레이저다이오드의 직접변조를 위한 바이어스회로를 제작하였으며, 수신 모듈에는 p-i-n 다이오드와 증폭단을 집적하였다. 레이저 다이오드의 직접변조 대역폭은 $1.4 I_{th}$ 에서 2 GHz이고, p-i-n 다이오드와 증폭단은 각각 1.3 GHz, 1.5 GHz의 대역폭을 갖는다. 제작한 광연결의 대역폭은 1.3 GHz 이하이고, 변조 전압으로 $1.5 V_{pp}$ 까지 선형적으로 전송할 수 있다. 광연결은 5 dB의 연결 손실을 갖는 데, 이것은 15 dB의 광전변환손실과 6.7 dB의 송신 모듈의 임피던스 부정합에 의한 전력손실에 수신단의 18 dB 전력이득을 더한 값이다. 연결거리는 렌즈를 사용하여 50 cm까지 확장가능하다.

Abstract

In this paper, transmitter and receiver modules for free space optical interconnection are implemented and characterized. In the transmitter module, bias circuitry which inject current into the direct modulated laser diode is fabricated and in the receiver module, p-i-n diode is integrated with an MMIC amplifying stage. Laser diode has a direct-modulated bandwidth of 2 GHz at $1.4 I_{th}$ bias while p-i-n diode and amplifying stage has a bandwidth of 1.3 GHz and 1.5 GHz, respectively. Optical interconnection has a bandwidth of 1.3 GHz and can linearly transmit modulated voltage signal up to $1.5 V_{pp}$. Measured loss of optical interconnection is 5 dB which is composed of optoelectronic conversion loss of 15 dB, electrical impedance mismatch loss of 6.7 dB in transmitter module and gain of 18 dB in receiver module. Separation between transmitter and receiver can be extended up to 50 cm by using a lens.

1. 서론

*正會員, 서울대학교 電子工學科 및 半導體共同
研究所
(Dept. of Elec. Eng., Seoul Nat'l Univ.)
接受日字: 1994年 4月 26日

최근 광소자들이 컴퓨터나 교환기내에서 연결용으로 쓰이기 위해서 컴팩트한 모듈로 제작되고 있다. 그것은 기존의 전기적 연결이 전송 대역폭이 작고,

연결거리가 길어질 수록 동작주파수가 줄어들며, 병렬 전송시에 교화가 발생하는 문제가 있기 때문인데, 광연결은 이러한 한계를 극복하는 새로운 기술로서, 1984년 Goodman 등이 제안한 VLSI 시스템에서의 광연결을 효시로 세계적으로 연구가 진행되고 있다.^[1]
^[2] 광연결은 시스템간, 모듈간, 보드간, 칩간의 연결 성능을 향상시키기 위하여 사용될 수 있다. 대부분의 경우 병렬 전송 및 병렬 처리되는 환경에서 광연결이 접속되기 때문에, 다중 채널의 광연결에 적합한 어레이 광소자와 이들로 구성된 광송신 모듈 및 광수신 모듈이 필요하게 된다. 본 연구는 다중 채널 광연결의 전 단계로 단일 채널 광연결을, 연결거리가 수 m미만인 보드간 자유공간 광연결의 형태로 직접변조(direct modulation)와 직접 검출(direct detection)을 이용하여 제작할 경우 구성이 간단하고 저가이므로, 향후 실제 시스템에 응용될 때에도 매력적인 선택이 될 수 있겠다는 취지에서 수행하였다. 본 논문에서는 단일 채널 자유공간 광연결의 동작 원리 및 제작과정을 소개하고, 제작한 광연결의 DC 전달 특성, 전송 대역폭 및 연결손실에 대한 측정 결과를 제시하겠다. 또한 광연결을 해석하기 위한 간단한 회로 모델을 사용하여 연결 손실을 계산하고, 광연결의 정렬오차에 따른 연결손실의 변화 및 연결거리에 대한 측정결과를 제시하고자 한다.

II. 광연결의 원리 및 제작

1. 직접변조 광연결의 원리

고속으로 변조된 광신호를 얻기 위해서는 레이저 다이오드에 변조 신호를 전류의 형태로 직접 주입하는 직접변조 방식과, 변조 신호가 빛이 조사되는 전기광학 물질에 유도한 전계에 의하여 빛을 투과시키거나 차단시키는 외부변조 방식이 있다. 본 고에서는 레이저 다이오드의 직접변조 방식에 대하여 살펴보고자 한다. 레이저 다이오드의 직접변조 특성을 가장 잘 나타내는 식은 비율 방정식(rate equation)이다. 비율 방정식은 시간에 대한 전자의 농도(n)와 광자의 농도(S)의 변화를, 이들이 비선형적으로 결합된 미분 방정식으로 표현한 것으로 다음과 같이 기술된다.^[3]

$$\frac{dS}{dt} = S(R_{sp} - \frac{1}{\tau_{ph}}) + R_{sp}K_{tot} \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = (I - I_{th})\frac{1}{eV} - \frac{1}{\tau_c}(n - n_{th}) - R_{sp}\frac{S}{V} \quad (2)$$

$$R_{sp} = g v_g \quad (3)$$

$$\frac{1}{\tau_{ph}} = (\alpha_c + \alpha_m)v_g \quad (4)$$

Rst는 유도방출계수, τ_{ph} 는 광자수명, τ_c 는 전자수명, Rsp는 자연방출계수, K_{tot} 는 자연방출항상인자, I_{th} 는 문턱전류, τ_c 는 전자의 전하량, nth는 문턱전류에서의 전자농도, V는 활성영역의 체적, g는 이득계수, v_g 는 광자의 군속도, α_c 는 흡수손실, α_m 은 거울에 의한 반사손실이다.

이러한 비율 방정식은 과도상태에서 레이저 다이오드의 cavity내에서의 전자와 광자의 농도의 동적변화를 예측할 수 있도록 한다. 또한 비율 방정식은 시간에 대한 미분항을 0으로 놓음으로써 정상상태의 전자 및 광자농도를 구하는 데 사용되기도 한다. 식(1)부터 식(4)를 이용하여 과도상태에 대한 다음의 몇 가지 수식을 얻을 수 있다.^[3]

$$t_s = \tau_c \ln \frac{I_m}{I_m + I_b - I_{th}} \sim nsec \quad I_b < I_{th} \quad (5)$$

$$t_{on} = \frac{\sqrt{2}}{\omega_r} \left(\ln \frac{P_{on}}{P_{off}} \right)^{\frac{1}{2}} < 100psec \quad I_b > I_{th} \quad (6)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\tau_{ph}} \sqrt{\left(\frac{dG}{dn} \right) \frac{S_m}{V}} \quad (7)$$

t_s 는 바이어스 전류가 문턱전류보다 작을 때의 turn on delay이고, t_{on} 은 바이어스 전류가 문턱전류보다 클 때의 turn on delay이다. ω_r 은 레이저 다이오드의 relaxation oscillation 주파수이고, dG/dn 은 미분 이득(differential gain)이고, P_{on} 은 변조신호가 더해졌을 때 광출력이고, P_{off} 는 변조신호가 없는 동안, 즉 바이어스 전류에 의해서 발생하는 광출력이다. 레이저 다이오드에 가해지는 바이어스 전류가 문턱전류 이하일 때는 식(5)으로부터 turn on delay가 1 nsec에 이르지만, 문턱전류이상일 때는 식(6)으로부터 100 psec미만이다. 이것은 문턱전류이상의 바이어스가 인가되어 있을 때, cavity에 존재하는 광자 및 전자농도가 비율방정식의 초기조건으로 작용하여, 현상적으로 relaxation oscillation이 급속하게 감쇠되는 효과를 가져오기 때문이다. 그러므로 바이어스 전류를 문턱전류이상으로 인가해 주는 것은 레이저 다이오드를 직접변조하는 데에 필수적이라고 할 수 있다. 그러나 바이어스 전류가 커지면 레이저 다이오드 자체의 신뢰도가 떨어지고 전력소비가 증가한다는 단점이 있다. 한편 레이저 다이오드의 직접변조대역폭은 공진이 일어나는 주파수까지로 생각되는데, 이것은 보통 relaxation oscillation 주파수와 유사한 값을 갖는다.^[4]

위와 같이 송신 모듈에서 직접변조된 광신호가 자유공간을 통해서 수신모듈의 p-i-n 다이오드에 입사되어 광신호와 비례하는 전류신호를 발생하게 되고,

이것이 증폭단에 의하여 원래의 신호로 재생되면 단일 채널의 자유공간 광연결이 구현되는 것이다.^[5]

2. 광연결의 제작

광연결에 사용한 레이저다이오드는 Sony사에서 제작한 780 nm 파장의 pickup용 고출력 레이저 다이오드이며, p-i-n 다이오드는 UDT사에서 제작한 실리콘계를 사용하였다. 증폭단으로 사용하기 위한 MMIC는 HP사에서 제작한 것으로, 실리콘 Bipolar 계열의 저잡음 광대역 증폭단을 사용하였다. 위와 같은 소자들을 회로로 구성하기 위하여, 글라스-에폭시 기판(비유전율 = 4.3, 절연층 두께 = 1.6 mm)을 사진식각공정을 사용하여 패터닝 후 하이브리드 집적 회로형태로 제작하였다. 그림 1은 제작된 송신 및 수신 모듈의 하이브리드 회로를 위한 평면도 및 실제 사진이다. 송신 모듈에는 레이저 다이오드를 고속변조하기 위해 바이어스 전류를 공급하기 위한 RF choke와 직접 변조되는 고속 신호를 위한 50Ω 마이크로 스트립라인을 형성하였다. RF choke는 meander line 인덕터와 TDK사의 50 nH 칩 인덕터 및 30μH의 토로이달 코일로 구성하였다. 토로이달 코일은 MHz이상에서부터 choke로 동작하고, 칩 인덕터는 GHz 대역까지 choke로 동작하지만, 주파수가 더욱 높아지면 meander line이 choke로 동작하므로 제작한 바이어스회로는 MHz부터 수GHz까지 RF choke로 동작하게 된다. 제작된 meander line은 이웃하는 line과의 coupling을 무시할 수 있으므로, straight line의 Inductance로 생각되며, 식 (8)에 의하여 인덕턴스는 50nH가 된다.^[6]

$$L = 2l \left[\ln \left(\frac{l}{w+t} \right) + 0.22 \frac{w+t}{l} + 1.19 \right] \quad [nH] \quad (8)$$

l은 cm로 표시한 line의 길이, w는 line의 폭, t는 금속의 두께를 뜻한다. 50 microstripline의 경우는 그 폭을 식 (9)에 의하여 결정하였다.^[6]

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) : \frac{w}{h} < 10 \quad (9)$$

광수신모듈에는 MMIC 증폭단에 사용하기 위한 접지 패턴^[7]과 이와 p-i-n 다이오드의 연결패턴을 형성하였다. 제작된 하이브리드 집적회로는 접지용 블럭에 장착되는 데, 회로의 접지면을 블럭에 고정하고 RF 신호용(SMA)및 DC 컨넥터가 연결되면 송신및 수신용 모듈이 된다. 송신 및 수신용 모듈은 각각 미세정렬을 위한 Stage에 장착된다. 송신 모듈과 수신 모듈간의 거리가 광연결의 길이가 된다. 이 때 광연

결의 길이는 송신 모듈과 수신모듈사이 렌즈를 둠으로써 자유롭게 변화가능하다.

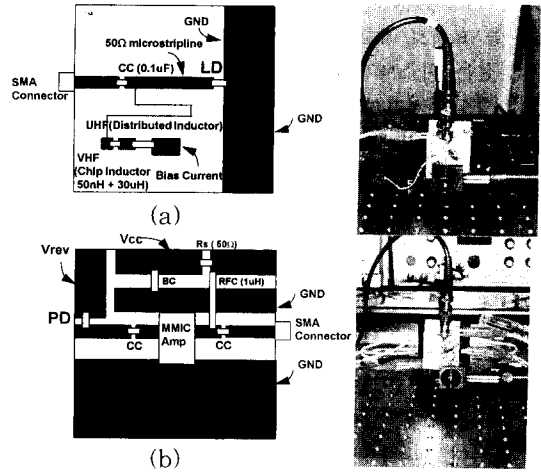


그림 1. 광송신및 수신모듈에 사용된 하이브리드 집적회로의 평면도및 실제 사진.

(a)송신모듈 (b) 수신모듈

Fig. 1. Layout and Photograph of Hybrid Integrated Circuit which are used in optical trasnmitter and receiver module. (a) transmitter module (b) receiver module.

Ⅲ. 광연결의 특성 측정및 전력 손실분석

1. DC 전달 특성

광연결의 DC전달특성은 Transistor의 DC I-V특성으로부터 최대로 인가할 수 있는 소신호의 크기를 예측할 수 있는 것과 마찬가지로, 송신모듈에 입력신호로 DC 전압을 변화시키면서 인가할 때, 수신모듈의 p-i-n다이오드에서 발생하는 DC 전류및 Load저항에 유기되는 DC 전압을 HP parameter analyzer를 이용하여 측정한 것이다. 이로부터 광연결이 소신호변조를 할 때 선형적으로 왜곡없이 응답할 수 있는 입력신호의 크기나 offset의 규격을 예측할 수 있다. 이것은 광연결이 칩이나 보드등에 접속될 때 요구되는 신호의 전기적 규격을 만족할 수 있는 지를 판단하는 기준이 된다. 그림 2는 이러한 광연결의 DC 전달특성을 측정된 것으로 송신 모듈의 레이저다이오드에 바이어스 전류가 공급되고 있을 때, 광연결이 offset없는 변조신호를 1.5 V_{r-p}까지 선

형적으로 전송할 수 있음을 보여주고 있다. 이 값은 사용된 레이저다이오드의 L-I곡선의 고주입전류에서의 기울기의 감소가 그대로 반영된 것으로, 보다 우수한 선형성을 가진 레이저다이오드가 광연결의 선형 응답성을 향상시킬 것으로 생각된다.

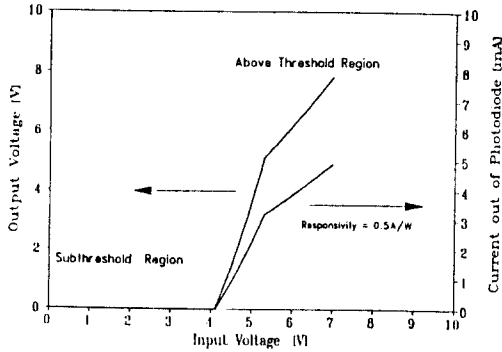
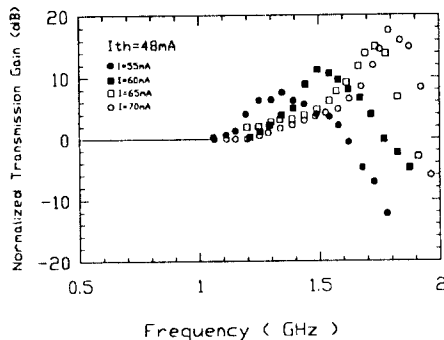
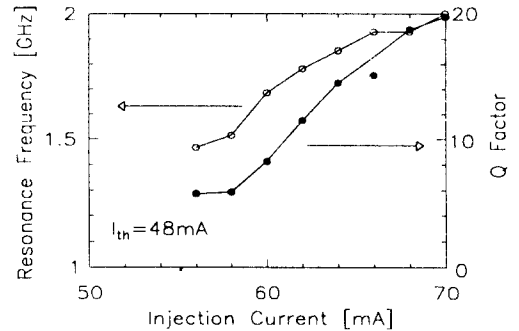


그림 2. 광연결의 DC 전달 특성. (x축: 광송신모듈에 인가되는 DC 전압, 좌측 y축: 광수신모듈의 Load저항에 걸리는 DC전압, 우측 y축: 광수신모듈의 광다이오드에 흐르는 DC전류)

Fig. 2. DC transfer characteristics of optical interconnection. (x axis: DC voltage applied to transmitter module, Left y axis: DC voltage developed at the load resistance of receiver module, Right y axis : DC current flowing out of the photodiode)



(a)



(b)

그림 3. (a) 바이어스 전류변화에 따른 광송신모듈의 주파수특성

(b) 바이어스 전류변화에 따른 공진주파수 변화

Fig. 3. (a)Frequency response of optical transmitter module vs bias conditions
(b) Trend of resonant frequency while increasing bias current.

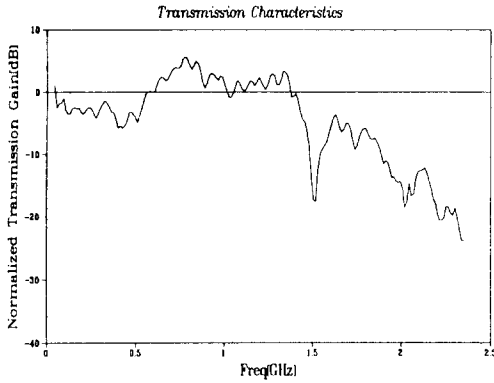
2. 대역폭 측정

광연결의 대역폭을 결정하는 요인은 레이저다이오드의 직접변조대역폭과 RC 시정수에 의하여 결정되는 p-i-n 다이오드의 대역폭 및 증폭단의 대역폭이다.

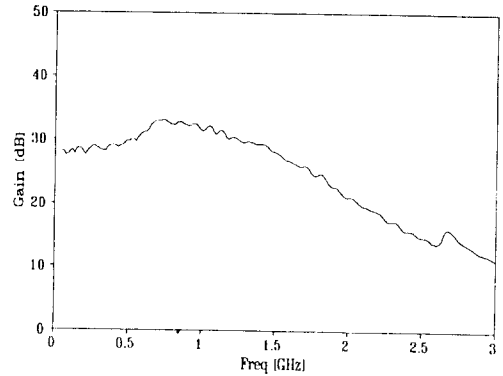
먼저 레이저다이오드의 직접변조대역폭을 측정하기 위하여 광송신모듈의 SMA입력단을 HP8510 Network분석기의 Port 1에 연결하고, Port 1의 Sweep주파수 신호에 대한 레이저다이오드의 응답이 7 GHz의 대역폭을 갖는 상용화된 단파장 광수신모듈을 통하여 전기신호로 변환되어 Network 분석기의 Port 2에 연결된다. 광수신모듈의 대역폭이 레이저다이오드의 예상 대역폭에 비하여 충분히 크므로, 상기한 측정의 2단차 회로망 순방향전송이득 S21으로부터 레이저다이오드의 소신호 직접변조 대역폭이 얻어진다.

(7)식으로 부터 예측할 수 있듯이 바이어스전류가 증가함에 따라, 그림 3에서와 같이 공진주파수와 공진폭이 증가하였으며, 공진곡선의 첨예도를 나타내는 Q도 증가하였다. 1.4 I_{th} 의 바이어스전류가 주입될 때 송신모듈은 2 GHz의 변조대역폭을 갖는다.

p-i-n 다이오드의 대역폭은 RC 시정수에 의하여 제한된다. 대역폭의 측정방법은 상기한 바와 같으며, 측정되는 수광다이오드의 대역폭보다 넓은 변조대역폭을 갖는 광송신모듈이 사용되어야 한다. 여기서는 본 실험에서 제작한 2 GHz대역폭의 광송신모듈을 사용하였다. p-i-n 다이오드의 접합용량 C는 활성영역의 직경이 증가함에 따라 증가하므로, 활성영역의 면적이 넓을수록 대역폭이 감소하게 된다. p-i-n다이오드에 -10 V의 역방향 전압을 가해주고, Load저항



(a)



(b)

그림 4. (a) p-i-n다이오드의 주파수 응답특성.
(b) MMIC 증폭소자에 대한 이득의 주파수 응답특성.

Fig. 4. (a) Frequency response of p-i-n photo-diodes
(b) Frequency response of gain for MMIC amplifying devices.

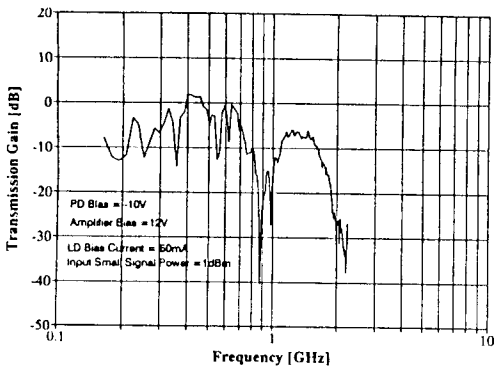


그림 5. 1.3 GHz 대역폭을 가진 광연결의 주파수 응답특성

Fig. 5. Frequency response of 1.3 GHz bandwidth Optical Interconnection.

으로 50Ω 을 사용하였을 때의 p-i-n다이오드의 주파수특성이 그림 4(a) 이다. p-i-n 다이오드의 활성영역의 직경이 0.2 mm (C=1 pF)이며, 대역폭은 1.3 GHz 이하이다.

증폭단의 대역폭을 알기 위하여 증폭단만을 따로 제작하여 이득의 주파수특성을 측정한 것이 그림 4(b) 이다. MMIC 증폭소자를 사용하였는데, 33dB 이하의 이득을 갖고 대역폭은 1.5GHz 이다.

상기한 2 GHz 대역폭을 갖는 광송신모듈과 상기한 p-i-n다이오드와 MMIC 증폭소자를 사용하여 제작한 광수신 모듈로 구성된 광연결의 주파수특성이 그림 5와 같다. 광연결의 대역폭은 1.3GHz 이하이며, 이는 p-i-n다이오드와 MMIC 증폭소자로 구성된 수신모듈의 증폭단에 의해 제한된 값이다. 한편 변조대역내의 전송이득을 보다 평탄하게 하고, 기생 효과에 의한 공진을 제거하여 데이터전송시의 동작의 안정성을 얻어야 할 것이다.

3. 광연결의 전력손실분석

광연결은 그림 6와 같은 간단한 회로 모형으로 나타낼 수 있다. 레이저 다이오드는 그림 6 a)와 같이 확산용량과 직렬저항으로 근사되고 p-i-n 다이오드는 그림 6 b)와 같이 집합용량과 직렬저항 및 전류원으로 근사될 수 있겠다. 그림 6 c)는 광연결을 2 단자 회로망으로 표현한 것으로, 이로부터 광연결을 통하여 발생하는 임피던스부정합에 의한 손실(1-|Γ|²)을 계산할 수 있겠다.¹⁶⁾ 그외에도 광연결로 인한 전력손실은 광전변환효율(η)로 인한 손실과, 기계적인 정렬오차로 인한 손실(K²)을 포함한다. 이들을 식(10)로 나타낼 수 있다.

$$P_o = P_i(1-|\Gamma_{L1}|^2)\eta_{LD}^2 K^2 \eta_{PD}^2 \frac{|S_{21}|^2}{|1-S_{11}\Gamma_{G2}|^2} (1-|\Gamma_{G2}|^2) \quad (10)$$

L² = 0 으로 가정하며, [S]는 증폭소자의 산란 파라미터이다.

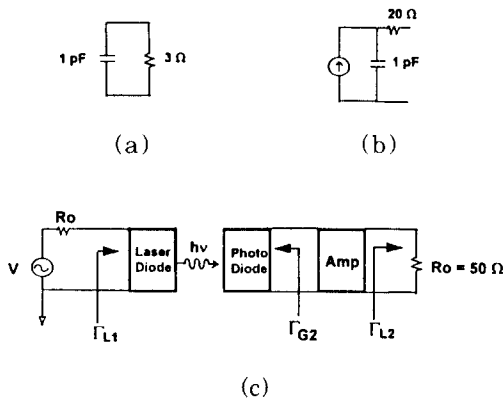


그림 6. 광연결의 간단한 회로 모형 (a) 레이저 다이오드의 등가회로 (b) 수광다이오드의 등가회로 (c) 2단자망으로 표현한 광연결

Fig. 6. Simplified circuit model of optical interconnection (a) Equivalent circuit of laser diode (b) Equivalent circuit of photodiode (c) 2 port network representation of optical interconnection.

임피던스 부정합에 의한 손실은 송신모듈의 경우 $(1-|\Gamma_{L1}|^2)$ 이고, 레이저다이오드를 1 pF의 확산용량과 3Ω의 직렬저항으로 근사할 때, 0.5 GHz에서 손실은 6.7 dB이다. 수신모듈의 경우 $\frac{1-S_{21}^2}{1-|\Gamma_{G2}|^2} (1-|\Gamma_{G2}|^2)$ 가 수신 모듈에서의 임피던스 부정합에 의한 손실을 포함한 전력이득이 되며[6], p-i-n 다이오드를 1 pF의 접합용량과 20Ω의 직렬저항으로 근사할 때, 전력이득은 0.5 GHz에서 18 dB가 된다. 레이저 다이오드의 η_{LD} 는 0.4 W/A이며, 수광다이오드의 η_{PD} 는 0.5 A/W로 측정되었다. 이로부터 계산된 광전변환 효율로 인한 손실은 15 dB이다. 그림 5에서 보는 바와 같이 광연결은 5 dB의 연결 손실을 갖는데, 이것은 상기한 손실 15 + 6.7 dB와 기계적인 정렬오차에 의한 손실에, 수신단의 18 dB 전력이득을 더한 값이다.

기계적인 정렬오차로 인한 손실(K^2)은 광연결이 실제 시스템에 접속되기 위해서 해결해야 할 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 정렬오차의 허용도는 수광다이오드의 활성영역의 크기가 증가하고, 연결거리가 짧아질수록 증가하게 된다. 그림 7은 활성영역의 지름이 1mm이고, 연결거리가 30cm인 광연결의 경우 기계적인 정렬오차로 하여 발생하는 전송이득의 변화를 측정한 것이다. 정렬 허용도의 측정은

Network 분석기를 사용한 대역폭 측정과 동일하다. 광송수신모듈이 최대로 정렬된 지점에서 송신모듈 혹은 수신모듈이 장착되어 있는 XYZ Stage를 미세정렬기로 조금씩 이동시켜 대역폭내에서의 순방향 전송이득 S_{21} 의 크기변화를 관측하였다. 광송신 모듈의 정렬허용도는 30μm, 각도 정렬허용도는 1° 미만이고, 광수신 모듈의 정렬허용도는 40μm이다. 자유공간 광연결의 연결거리는 전송손실의 증가없이 50 cm까지 확장가능하다.

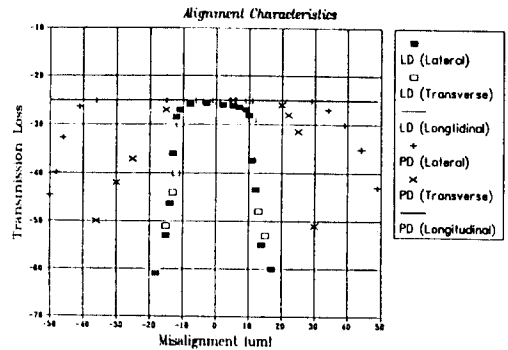


그림 7. 수광다이오드의 활성영역의 크기가 1mm 이고 연결거리가 30cm인 광연결의 기계적인 정렬 오차에 대한 연결손실(K^2)

Fig. 7. Interconnection loss vs mechanical misalignment where diameter of active region in photodiode is 1 mm and separation of interconnection is 30cm.

IV. 결론

레이저 다이오드를 직접 변조(Direct Modulation)하는 광송신용 모듈과 변조된 광신호를 직접검출(Direct Detection)하는 광수신용 모듈을 제작하였다. 광송신단과 광수신단을 자유공간 광연결하였을 때, 1.3GHz의 대역폭을 갖었으며, 1.5V_{rpp}까지의 변조 신호를 선형적으로 전송할 수 있었다. 광연결을 간단한 회로 모델로 표현하여 전기적인 부정합에 의한 전력손실을 계산하였다. 광연결의 전력손실은 5 dB인데, 이는 송신모듈에서 전기적인 부정합에 의한 손실 6.7dB와, 광전변환으로 인한 손실 15dB, 수신 모듈에서 전기적인 부정합에 의한 손실을 고려한 이득 18dB를 합한 결과이다. 연결거리는 렌즈를 사용하여 50cm까지 확장될 수 있다. 광연결이 전송할 수

있는 변조신호의 크기는 사용되는 광소자 및 전자소자의 선형성에 따라 향상될 수 있으며, 정렬특성 또한 광섬유를 이용하여 개선할 수 있다. 본 연구를 통하여 광연결의 연구에 대한 기초가 마련되었다고 생각하며, 추후로 간단하고 저가인 장점을 최대한 이용하여 실제 시스템에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

參 考 文 獻

- [1] J.W.Goodman, F.J.Leonberger, S. Y.Kung, and R.A.Athale. "Optical interconnections for VLSI systems." *Proc. IEEE*, vol. 72, pp.850-866, 1984.
- [2] D.Z.Tsang, "Optical interconneciotion in digital systems : Status and prospects." *Optics and Photonics News*, Oct., pp.23-29, 1990.
- [3] G.Destefanis and M.Meliga, *Device Testing : Euroform european school on : Advanced materials and devices for photonics*, 1992, Torino.
- [4] G.Arnold et al, *Modulation of Laser diodes : semiconductor devices for optical communication* 2nd Ed., Springer-Verlag, 1982.
- [5] D.Z.Tsang, "One giga bit per second free space optical interconnection." *Applied Optics*, vol. 29, No. 14, pp.2034-2037, 1990.
- [6] David M. Pozar, *Microwave engineering*, Addison Wesley, 1990.
- [7] Avantek application note AN-S001, "Basic MODAMP™ MMIC Circuit Technique".

감사의 글

본 논문에서 사용한 송신 모듈의 바이어스회로 제작에 도움을 주신 삼성전자의 김철동 이사님과, 광연결의 주파수 응답 특성을 측정하는 데 도움을 주신 전자파연구실 이문규씨와 과학원의 나기운, 유종원 씨에게 감사드립니다.

著 者 紹 介



金大根(正會員)

1971年 8月 30日生. 1992年 한국과학기술원 전기및 전기및 전자공학과 학사. 1994年 서울대학교 전자공학과 석사. 현재 동대학원 박사과정 재학중



金成俊(正會員)

1954年 10月 24日生. 1978年 서울대학교 전자공학과 학사. 1981年 미국 Cornell대학교 전기전자공학과 석사. 1983年 Cornell대학교 전기전자공학과 박사. 1983年 ~ 1989年 미국 AT&T Bell Labs MTS(연구관). 1989年 ~ 1993年 서울대학교 전자공학과 조교수. 1993年 ~ 현재 서울대학교 전자공학과 부교수. 주관심 분야는 광전자집적회로(OEIC), 광집적회로(PIC), 반도체레이저, 수광다이오드, 광연결 및 광계산시스템, 신경생체센서 등임.