

양방향 송수신모듈 제작을 위한 광결합계수의 계산 및 측정

김종덕 · 최재식 · 이상환 · 조호성 · 김정수 · 강승구 · 이희태 · 황 남 · 주관종 · 송민규

한국전자통신연구원 회로소자기술연구소 화합물반도체부

(1999년 10월 4일 받음, 1999년 11월 12일 수정본 받음)

레이저 다이오드와 수신광검출기가 집적된 소자를 V-홈을 가진 실리콘 광학벤치에 flip-chip 본딩하고, 경사면을 가진 하나의 단일모드 광섬유와 수동정렬하는 방법을 사용하여 가입자망을 위한 저가의 양방향 송수신모듈을 설계, 제작하였다. 광섬유의 단면 경사각에 따른 송신광결합 효율과 수신광결합 효율사이의 병목점을 찾기 위해 Gaussian빔 모델을 사용하여 수평정렬거리, 광섬유 단면 경사각, 수직정렬오차등의 변수에 따른 광결합계수를 계산함으로써, 최적의 광정렬조건을 예측하였다. 또한 실리콘 광학벤치에서 광결합효율을 측정하여 광섬유의 수직정렬오차에 따른 광결합계수의 감소가 광섬유의 경사각에 의해 보상 될 수 있다는 계산결과와 타당함을 확인하였다. 실제의 sub-module 제작 및 광결합 실험에서 송신빔이 광섬유 단면에 반사되어 PD로 입사하는 것을 최소화하기 위하여 광섬유 단면을 경사절두원추형으로 제작함으로써 PD의 수신 잡음을 30 μm 이상의 정렬거리에서 -35 dB이하로 유지할 수 있었다. 같은 조건에서 단면 경사각이 12° 인 광섬유에 의해 -12.1 dBm의 송신출력과 0.2 A/W의 responsivity를 얻을 수 있었다.

I. 서 론

현재 파장분할다중(WDM:Wavelength Division Multiplexing) 기술에 의한 대용량의 고속 광통신망을 구현하기 위한 다각적인 노력이 진행되고 있다. 그러나, 향후 초고속 정보통신망의 효율적인 이용과 FTTH(Fiber-To-The-Home)의 실현을 위해서는 저가의 광가입자망을 구현해야 하며, 이러한 필요성은 인터넷, 주문형 비디오, 화상통신, 멀티미디어 등 새로운 초고속, 고화질 정보망의 수요에 의해 더욱 증대되고 있다. 이러한 광가입자망을 위해서는 저가이면서 고성능, 초소형 송수신모듈의 개발이 핵심 과제이며, 광섬유 포설비용면에서 하나의 단일 광섬유를 이용한 양방향 송수신방식이 유리하다.

지금까지 발표된 일반적인 단일 광섬유에 의한 양방향 송수신 모듈은 1.3 μm /1.55 μm 의 서로 다른 파장영역을 이용한 WDM방식이며, 일부 1.3 μm 단일 파장을 이용하고 시간을 분할하여 각각 송신 및 수신하는 TCM(Time Compression Multiplexing) 방식이 사용된다.

광모듈을 저가적으로 대량 생산하려면 정렬을 필요로 하는 부품의 수를 줄이고, 광정렬 시간을 단축해야 한다. 이를 위한 효과적인 방법들로서 flip-chip 본딩 기술과 PLC(Planar Lightwave Circuit)플랫폼이나^[1,2] V-홈을 가진 실리콘 기판을 사용하여 수동정렬하는 기술들이 있다.^[3,4] 그러나 실리콘 기판에 Mach-Zehnder, Y-branch등의 광도파로를 형성하여 PLC 플랫폼을 제작하고, LD(Laser Diode), 수신 PD(Photodiode), 모니터 PD등을 flip-chip 본딩하여 광정렬하는 기술은 플랫폼의 제작이 어렵고, 아직 정렬에 필요한 부품의 수가 많은 단점이 있다. 또한 이에 대한 대안으로 송수신 및 모니터 칩들

을 하나의 InP기판 위에 광도파로를 이용하여 집적하는 방법이^[5] 연구되고 있으나 각기 다른 제작공정을 필요로 하는 소자들의 집적으로 인해 칩의 성능 및 효과적인 구현기술이 아직 저조한 편이다.

우리는 이러한 기존 기술들과 구별되는 방법으로 LD 및 수신PD를 집적한 칩을 V-홈 실리콘광학벤치에 flip-chip 본딩한 다음 경사면을 가진 광섬유를 수동정렬하고, 굴절률 조절물질을 사용하여 광결합특성을 향상시켜 송수신하는 방식의 모듈을 보고한 바 있다.^[6] 굴절률 조절물질을 사용하여 수신잡음을 줄이고, 광결합 특성을 높이는 방법은 효과적이기는 하지만, 모듈의 지속적인 신뢰성을 보장하기 위하여 굴절률 조절물질의 특성에 대한 추가적인 연구를 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 이와는 별도로 단순히 공기중에서 광정렬하는 방식만으로 적절한 성능을 가지는 송수신모듈을 제작하기 위한 연구 결과를 보고하였다.

먼저 제2장에서는 그림 1과 같이 송수신집적칩과 경사단면을 가지는 광섬유와의 광정렬 구조에서 송신신호와 수신신호를 동시에 광결합하기 위한 최적의 조건을 수식적 계산에 의해 예측할 수 있는 방법을 제공하고자 한다. 이를 위하여 레이저와 경사면을 갖는 광섬유사이의 타원형 대 타원형 Gaussian빔사이의 광결합계수를 수식적으로 유도하고, 제3장에서 광섬유로부터의 수신빔이 수신광검출기로 입사하는 광섬유 수신임계경사각에 따른 광결합효율을 계산함으로써 최적의 광결합 거리와 광섬유 단면 경사각을 예측하였다. 또한 같은 방법으로 수동정렬방식에서 발생하는 레이저빔과 광섬유축 사이의 수직정렬오차에 따른 광결합 조건의 변화에서 수직정렬오차가 광섬유의 단면 경사각에 의해 보상될 수 있음을 설명하였다.

제4장에서는 모듈의 제작과정을 설명하고, 공기중에서 집적칩과 광섬유를 수동정렬할 때 광섬유 단면에서 반사되는 레이

*본 논문은 정보통신부 B-ISDN연구지원사업에 의해 연구되었음.

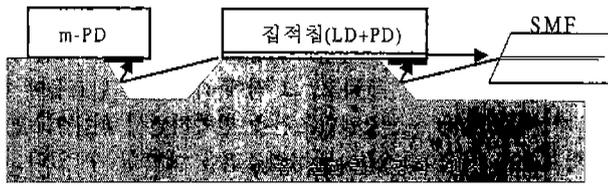


그림 1. 양방향 송수신모듈의 구조.

저빔이 수신광검출기로 입사되는 것을 최대한 억제하기 위하여 광섬유 단면을 경사절두원추형으로 제작하고, 단순 경사면을 가진 광섬유의 경우와 실제 반사율의 차이를 비교하였다. 또한 광결합 효율을 측정하여 계산 결과들이 타당함을 보이고, 제작 모듈의 특성을 평가하였다.

II. 수식유도

레이저와 광섬유사이의 광결합 계수는 다양한 형태의 광섬유 단면구조에 대하여 논의되어 왔으며, 지금까지 거의 모든 경우에서 광결합효율을 높이기 위한 방법에 관심이 집중되었다.^[6] 그러나 본 논문에서는 저가의 송수신모듈 제작을 위하여 그림 1에서와 같이 경사단면을 가지는 하나의 광섬유에 의해 송신 및 수신 광결합을 동시에 유도하는 방법을 사용하므로, 지금까지 논의된 그 어떤 구조에 비해 광결합의 최적조건을 고려하여야 한다. 따라서 수신부에 입사조건을 만족하는 최소한의 경사각에서 최대의 광결합효율을 얻기 위하여 광결합 특성에 관한 보다 세부적인 분석이 요구된다. 이를 위하여 본 장에서는 그림 2와 같은 광결합구조에서 광결합계수식을 유도하고, 광섬유의 최소 임계경사각을 정의하였다.

일반적으로 임의의 좌표계에서 $z'=0$ 인 거울면에서 모드반경이 w_x, w_y 인 타원형 Gaussian빔의 장분포는 $\exp\left[-\frac{x'^2}{W_x'^2} - \frac{y'^2}{W_y'^2}\right]$ 로 표현되며, $z'=z$ 인 거리만큼 진행한 경우의 장분포는 Kirchhoff-Huygens회절적분에 의해 구해진다.

그림 2는 송수신 집적칩과 경사단면을 가지는 광섬유 사이의 광결합모양을 설명하는 단면그림이다. $x-y$ 면은 레이저의 거울면에 해당하고, 이에 수직인 z 축방향은 레이저 Gaussian빔의 광축과 일치하는 방향이다. 광섬유 도파로를 지나는

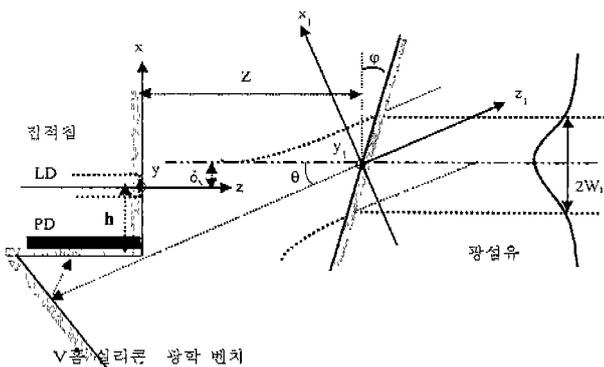


그림 2. LD, PD 집적칩과 경사단면을 가지는 광섬유와의 송수신 광결합 설명도.

Gaussian빔은 광섬유의 경사단면에서의 경계조건을 만족하면서 수평축에 각 θ 만큼 굴절된 방향으로 진행하게 된다. 굴절된 광섬유 Gaussian빔의 축을 z_1 으로 하고 수직 면을 x_1-y_1 면으로 할 때, $z_1=0$ 인 면에서 굴절된 광섬유빔의 모드반경 $W_{f\perp}$ 은 근사적으로

$$W_{f\perp} = W_f \frac{\cos(\varphi + \theta)}{\cos(\varphi)} \quad (1)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{n_1}{n_0} \sin(\varphi) \right] - \varphi \quad (2)$$

로 표현된다. 여기서 W_f 는 광섬유 도파로에서의 모드반경이고, φ 는 수직축에 대한 광섬유 경사면의 기울기각으로 스넬의 법칙에 따라 θ 와 φ 는 (2)의 관계식을 갖는다. n_0 는 광섬유와 레이저 다이오드 사이의 굴절률로 공기중에서 1이고, n_1 은 광섬유 core의 굴절률이다.

따라서 광섬유 경사면으로부터의 빔은 광섬유축에 대하여 θ 만큼 꺾이고 W_f 와 $W_{f\perp}$ 의 모드 반경을 갖는 타원형 Gaussian빔으로 근사될 수 있다. 그림 2에서 두 좌표계 사이에 $x_1 = \cos\theta(x - \delta_x) - \sin\theta(z - Z)$, $y_1 = y$, $z_1 = \sin\theta(x - \delta_x) + \cos\theta(z - Z)$ 의 관계식을 고려하면, $z = Z$ 에서 광섬유 Gaussian빔의 장분포는 다음과 같이 표현된다.

$$\Psi_f(x, y, z=Z) = A_o \exp \left[-\frac{(x - \delta_x)^2 \cos^2 \theta}{W_{f\perp}^2} - \frac{y^2}{W_f^2} \right] \exp(-ik(x - \delta) \sin \theta) \quad (3)$$

또한 레이저 거울면에서 $z = Z$ 만큼 진행한 레이저빔은 Kirchhoff-Huygens 회절적분에 의해

$$\Psi_{ld}(x, y, z=Z) = B_o \sqrt{\frac{W_{x0} W_{y0}}{W_x(Z) W_y(Z)}} \exp \left[\frac{x^2}{W_x^2(Z)} - \frac{y^2}{W_y^2(Z)} \right] \times \exp \left[-ikZ - ik \left(\frac{x^2}{2R_x(Z)} + \frac{y^2}{2R_y(Z)} \right) + i\xi(Z) \right] \quad (4)$$

로 표현되며, W_{x0}, W_{y0} 는 $z=0$ 인 거울면에서 레이저빔의 모드 반경이고, 다른 변수들은 아레식으로 주어진다.

$$W_i(Z) = W_{i0} [1 + (2Z/kW_{i0}^2)]^{1/2}$$

$$R_i(Z) = Z [1 + (kW_{i0}^2/2Z)^2]$$

$$\xi(Z) = [\xi_y(Z) + \xi_x(Z)]/2, \quad \xi_i(Z) = \tan^{-1} (2Z/kW_{i0})$$

$$k = 2\pi n_o / \lambda_o, \quad i = x, y \quad (5)$$

n_o 는 광섬유와 레이저다이오드 사이의 굴절률로써 일반적으로 공기이므로 1이며, λ_o 는 공기중에서 레이저의 파장이다.

$z = Z$ 인 $x-y$ 면에서 레이저와 경사면을 가진 광섬유사이의 광결합계수는 다음 중첩적분식으로 표현된다.

$$\eta = \frac{\left| \int \Psi_{ld}^* \Psi_f^* dx dy \right|^2}{\int \Psi_{ld} \Psi_{ld}^* dx dy \cdot \int \Psi_f \Psi_f^* dx dy} \quad (6)$$

광섬유와 레이저의 수직정렬오차가 δ_x 이고, 광섬유 경사단면의 각이 φ 인 경우에서 광결합계수는 위의 식에 레이저와 광섬유 Gaussian 빔의 장분포식 (3), (5)을 대입하고, 적분하면 최종적으로 다음과 같이 정리된다.

$$\eta = \frac{4 \cos(\theta)}{W_x(Z)W_y(Z)W_{fL}W_{f\sqrt{\kappa_x\kappa_y}}}$$

$$\times \text{Exp}\left\{-\frac{1}{2\kappa_x}k^2 \sin^2(\theta)\left(\frac{1}{W_x^2(Z)} + \frac{\cos^2(\theta)}{W_{fL}^2}\right)\right\}$$

$$\times \text{Exp}\left\{-\frac{2\delta_x^2 \cos^2(\theta)}{\kappa_x W_{fL}^2}\left[\kappa_x - \frac{\cos^2(\theta)}{W_{fL}^2}\left(\frac{1}{W_x^2(Z)} + \frac{\cos^2(\theta)}{W_{fL}^2}\right)\right]\right\}$$

$$\times \text{Exp}\left\{\frac{k^2 \delta_x \sin^2(\theta) \cos^2(\theta)}{\kappa_x W_{fL}^2 R_x(Z)}\right\} \quad (7)$$

$$\kappa_x = \left[\left(\frac{1}{W_x^2(Z)} + \frac{\cos^2(\theta)}{W_{fL}^2} \right) + \left(\frac{k}{2R_x(Z)} \right) \right]$$

$$\kappa_y = \left[\left(\frac{1}{W_y^2(Z)} + \frac{1}{W_f^2} \right) + \left(\frac{k}{2R_y(Z)} \right)^2 \right] \quad (8)$$

식 (7)은 기존의 flat end fiber와 레이저사이의 광결합 계수를 포함하는 일반적인 식이다. 즉, flat end 광섬유의 경우에 $W_{fL} = W_f$ 이고, θ 가 단순히 레이저빔 축에 대한 광섬유축의 기울기각을 의미하게 되며, 작은 각도에서 $\sin(\theta) \approx \theta$, $\cos(\theta) \approx 1$ 로 근사되므로 원형 Gaussian빔을 가진 flat end fiber와 LD 사이의 광결합계수에 관한 식이 된다.^{17, 8)}

그림 1의 구조에서 광결합계수와 함께 고려되어야 할 중요한 변수는 광섬유로부터의 수신빔이 굴절되고 실리콘 광학벤치에 반사되어 집적칩의 수신광검출기로 입사하는데 필요한 광섬유의 경사각이다. 그림 2에서와 같이 광섬유 Gaussian빔의 중심이 flip-chip 본딩된 상태인 집적칩의 밑쪽 표면을 지나도록 하는 광섬유 단면경사각 φ 을 임계경사각 φ_c 로 정의하면, 이 각도에서 수신빔의 50%는 실리콘벤치의 반사거울면을 향하게 되고, 나머지 절반중의 일부는 집적칩의 거울면에서 수신PD의 단면으로 입사하므로 필요로 하는 충분한 크기의 수신출력을 얻을 수 있는 최소각으로 볼 수 있다.

그림 2로부터 임계경사각은 집적칩에서 수신소자표면과 레이저 활성층의 간격인 h 와 수직정렬오차 δ_x , 광정렬 거리 Z 에 의존하므로, 삼각함수 연산에 의해 정리하면 다음식으로 표현된다.

$$\varphi_c = \sin^{-1} \left(\frac{\sin^2(\theta_c)}{\sqrt{[(n_1/n_o) - \cos(\theta_c)]^2 + \sin^2(\theta_c)}} \right)$$

$$\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{h + \delta_x}{Z} \right) \quad (9)$$

같은 정렬거리 Z 에서 광섬유의 경사각이 이각보다 클 때,

수신광검출기로 입사하는 수신빔은 최대에 근접하지만, 레이저 빔의 광결합 손실은 그만큼 커지게 된다. 따라서 정렬거리 Z 에 따른 수신임계각을 구하고, 그 각에 대한 광결합효율에 대하여 계산함으로써 수신광결합조건을 만족하면서 최대의 송신광결합효율을 얻을 수 있는 광정렬조건을 예측할 수 있다.

III. 계산 및 논의

정렬 거리와 광섬유 경사각에 따른 송수신 동시 광결합에서 가장 중요한 변수는 집적칩에서 LD의 활성층에서 표면 사이의 높이(h) 및 수직 정렬오차(δ_x)이다. 본 장에서는 실험을 토대로 예상되는 변수들의 몇 가지 값에 대한 광섬유 임계경사각과 광결합 계수값을 계산하였다.

표 1은 계산에 사용된 기본 변수로서, step index 단일모드 광섬유의 굴절률과 광섬유 core 반경 및 측정에 사용된 일반적인 구조의 1.31 μm FP LD에서 측정된 far field angle로부터 계산된 LD의 모드크기를 나타내었다.

그림 3은 광섬유 경사각에 따른 기본적인 광결합특성을 보여준다. 식 (7)에서 표 1의 값들을 사용하고, $Z = 50 \mu\text{m}$ 정렬거리에서 광섬유의 단면 경사각과 수직 정렬 오차에 따른 광결합계수의 계산결과이다. 수직정렬오차(δ_x)는 그림 2에서와 같이 레이저빔 진행 방향인 z 축을 기준으로 광섬유 core축이 x 축 방향으로 벗어난 거리이다. 경사각이 클수록 최대 광결합효율은 작아지고, 그 최대값을 얻는데 필요한 수직정렬오차는 x 축의 양의 방향으로 커진다. 이것은 그림 2의 광정렬 구조에서 step index 광섬유의 acceptance angle이 광섬유 단면 경사각에 의해 수직 방향의 아래쪽을 향하기 때문에 생겨나는 결과로써 다음장의 측정결과에서 확인된다.

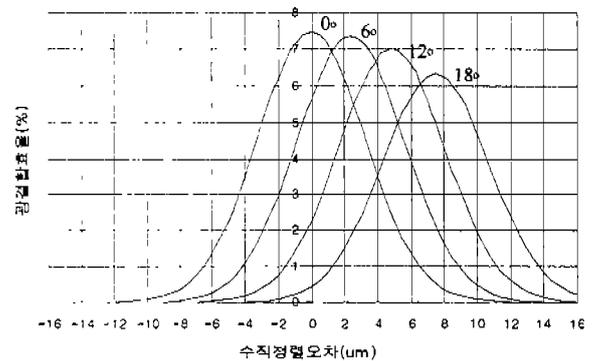


그림 3. $Z = 50 \mu\text{m}$ 정렬거리에서 광섬유의 단면 경사각과 수직정렬 오차에 따른 광결합효율의 변화

표 1. 계산에 사용된 1.31 μm FP LD와 SMF의 변수값

| Parameter | Value |
|---------------------------------------|----------------------|
| W_{x0} (레이저 거울면에서 수평방향 Beam Waist) | 1.0147 μm |
| W_{y0} (레이저 거울면에서 수직방향 Beam Waist) | 0.8079 μm |
| W_f (광섬유의 Beam Waist) | 4.8886 μm |
| 광섬유 Core 굴절률 | 1.4629 |
| 광섬유 Clad 굴절률 | 1.4585 |
| 광섬유 Core 반경 | 4.5 μm |

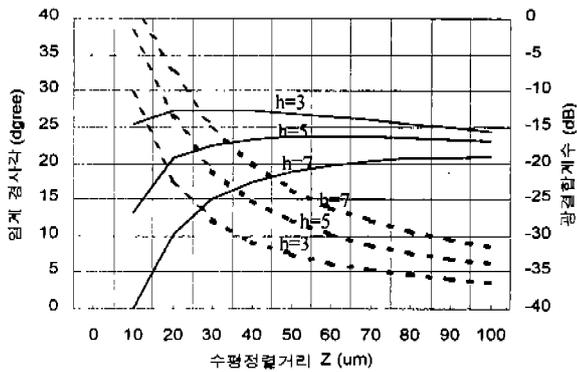


그림 4. 집적칩에서 레이저로부터 표면까지의 거리(h)에 따른 광섬유 임계경사각(---)과 송신광결합효율(—)의 수평정렬거리(Z) 의존성 ($\delta_x=0$ 일 때).

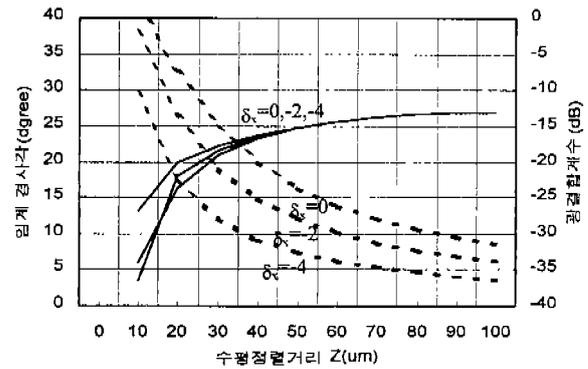


그림 5. 수직정렬오차가 $\delta_x=0, -2, -4$ um인 경우에 광섬유 임계경사각(---)과 송신광결합효율(—)의 수평정렬거리 의존성 ($h=7$ um일 때).

본 논문의 송수신 모듈을 위한 광정렬방법에서는 항상 송신과 수신에 동시에 고려되어야 한다. 그림 2에서 알 수 있듯이 식 (8)로 표현되는 광섬유의 수신임계경사각은 flip-chip 본딩 후 광정렬시에 수신광의 진행경로를 결정하는 집적칩의 h값과 정렬거리에 의해 결정된다. 고정된 h값과 수평정렬거리 Z에 대하여 광섬유 단면 경사각에 따른 송신광결합효율과 수신광결합효율은 반비례관계에 있으므로, 송수신조건을 동시에 만족하는 병목점에서의 경사각에 대한 정보가 요구된다. 이런 관점에서 수평정렬거리에 따른 광섬유 수신임계경사각에서의 광결합효율에 대한 고찰이 필요하다.

그림 2와 같은 구조에서 송수신 광결합 조건에 대한 이해를 위하여 수직, 수평정렬오차가 $\delta_x=0, \delta_y=0$ 인 이상적인 경우에 수평정렬 거리에 따른 수신 임계경사각과 광결합계수의 특성을 그림 4에 보였다. 집적칩의 레이저활성층에서 PD표면까지의 간격 h가 각각 3, 5, 7 um인 경우에 대하여 수신빔이 PD로 입사하기 위한 광섬유의 임계경사각을 수평정렬거리(Z)에 따라 먼저 계산하고, 그 임계경사각을 만족하는 경우에 송신광결합효율의 정렬거리에 대한 특성을 보였다. 결과적으로 h가 작을수록 거리 Z에 따라 필요로 하는 광섬유의 임계경사각이 작으므로 비교적 광결합계수가 크며 h가 클수록 반대의 결과를 준다. 수직, 수평정렬오차가 $\delta_x=0, \delta_y=0$ 인 경우에서 $h=3$ um인 집적칩에 대하여 수신광결합 조건을 만족하면서 가장 큰 송신광결합효율을 얻기 위한 조건은 $Z=30$ um에서 단면 경사각이 12°인 광섬유를 사용하였을 때이고, $h=7$ um인 경우는 $Z=100$ um에서 단면 경사각이 약 9°인 광섬유를 사용하였을 때이다.

일반적으로 수동정렬 방식에서 수직 및 수평정렬오차는 거의 항상 존재하며, 본 연구의 플립칩본딩에서 평균 수평정렬오차는 ± 1.5 um이었고, 수직정렬오차는 실리콘 광학벤치의 슬더뎀퍼의 높이오차 및 집적칩의 제작시 에피층의 두께 변경등에 의해 발생하며 플립칩본딩 후 측정에 의해 확인된다.

송수신 광결합이 그림 2의 x-z면에서 이루어짐으로 수직정렬오차에 의한 영향이 상대적으로 클 것은 분명하므로, 이에 따른 광결합특성을 분석할 필요가 있다. 따라서 계산의 단순화를 위하여 y축방향 수평정렬거리를 $\delta_y=0$ 로 하고, 실험 결

과를 반영하여 레이저와 광섬유축사이의 수직정렬오차(δ_z)가 각각 0, -2, -4 um인 경우에 대하여 수평정렬거리 Z에 따라 요구되는 임계경사각을 계산하고, 역시 그 값에 대한 광결합계수를 계산한 결과를 그림 5에 나타내었다. 일반적으로 특정 경사각을 가진 광섬유의 경우에는 수직정렬오차가 클수록 광결합계수는 작아진다. 그러나 그림 5에 보인 것과 같이 송수신을 동시에 고려한 경우에는 각기 다른 수직정렬오차에 대하여 요구되는 광섬유의 임계경사각이 변하므로, 이 값을 고려한 경우에 광결합계수는 변함이 없음을 알 수 있다. 즉 수동정렬방식에 의한 송수신 동시 광결합에서 수직정렬오차는 광섬유 경사각에 의해 보정 될 수 있음을 나타낸다. 그러나 한가지 주의해야 할 점은 수직정렬오차가 음의 방향으로 증가하여, 요구되는 광섬유 임계경사각이 지나치게 작은 경우에는 수신빔이 실리콘 광학벤치에 반사되어 PD의 수광부로 입사하기 위한 경로를 벗어나는 경우가 발생하며, 뒤의 측정결과에서 보여진다.

IV. 송수신 모듈의 제작 및 측정 결과

그림 6은 제작된 송수신 집적칩의 표면 및 단면 사진과 집적칩이 실리콘 광학벤치^[9]에 플립칩 본딩된 상태의 모양을 보인다. 그림 6(a)는 집적칩의 발진거울면의 단면으로 1.3 um F-P LD와 그 위에 집적된 pin-PD의 사진이고, (b)는 60 um x 60 um의 수광부를 가지는 수신 PD가 집적칩의 앞쪽 표면에 위치함을 보이는 사진이다. (a)에서 레이저 활성층으로부터 표면까지의 거리 h는 앞에서 논의 되었듯이 송수신 광결합 특성을 결정하는 중요한 변수로써 본 실험에 사용된 집적칩의 경우는 LD, PD 소자사이의 광학적 상호작용을 방지하기 위하여 $h=7$ um로 비교적 큰값을 가진다. 집적칩에서 10% current duty에서 LD의 발진 임계전류는 10 mA이며 출력의 미분 효율(slope efficiency)은 0.22 mW/mA이었고, PD의 responsivity는 1.5 V 역방향 전압 조건에서 0.8 A/W이었다.

그림 7은 광섬유의 단면 경사각에 따라 최대 광결합계수에서의 수직정렬오차값에 대한 측정결과로서, 경사각이 커질수록 최대 광결합계수를 얻기 위하여 필요한 수직정렬오차값이

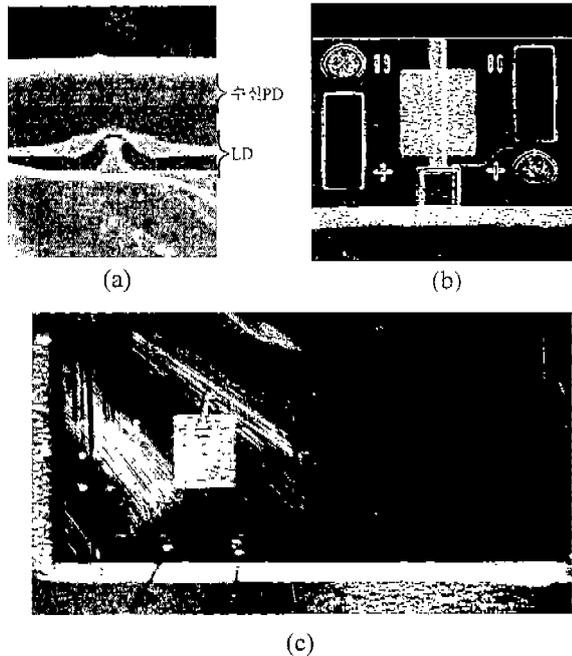


그림 6. 양방향 송수신모듈을 위해 제작된 (a)집적칩의 앞쪽 단면 구조와 (b) 표면 모양, (c) 수동정렬을 위한 V-홈 실리콘 광학 벤치에 집적칩이 풀립칩 본딩된 사진.

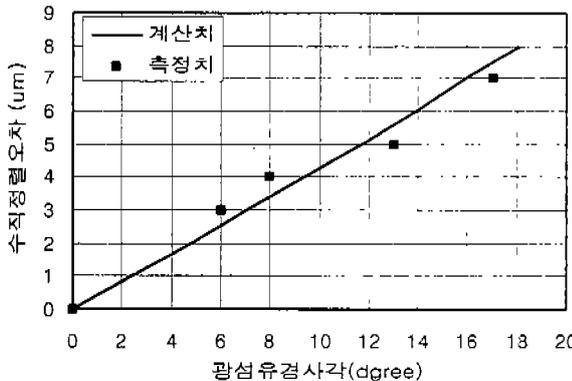


그림 7. 경사단면을 가진 광섬유와 레이저의 가우시안 광결합에서 광섬유 경사각의 크기에 따라 최대광결합을 얻기위해 요구되는 수직정렬오차.

커짐을 보인다.

본 송수신모듈의 광결합조건에서 송수신 광결합조건 외에 고려되어야 할 또 하나의 중요한 변수는 레이저빔의 광섬유 단면의 반사에 의한 수신잡음이다. 그림 8에서 (a)는 단순 경사면을 가지도록 제작된 광섬유의 단면이고, (b)는 반사에 의한 수신 잡음을 최소화 하기 위하여 먼저 원뿔모양으로 가공한 다음 core부분만 경사각을 가지도록 제작된 경사절두원추형의 광섬유 단면 사진이다.

두 가지 형태의 광섬유에 의한 송신빔의 수신반사잡음을 측정하기 위하여 그림 6의 (c)와 같은 상태에서 LD에 30mA의 CW 전류를 인가하고(3.5 mW), V-홈을 따라 광섬유의 수평정렬거리를 변화시키면서 광섬유에 의해 반사되어 집적칩의 PD



그림 8. (a) 단순 경사단면 (b) 경사절두원추형 단면 구조로 연마된 광섬유 모양.

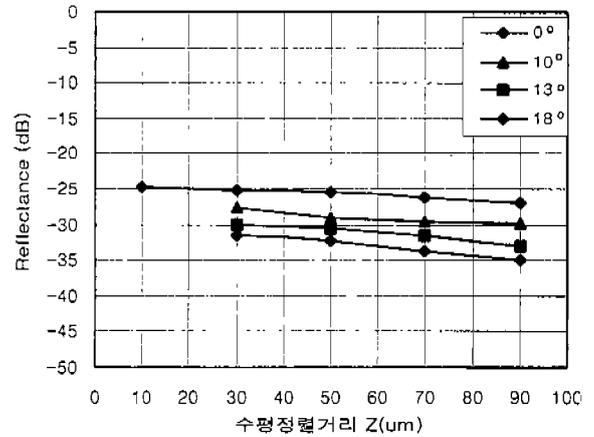


그림 9. 단순 경사단면 광섬유에 의해 반사되어 PD로 입사하는 송신빔의 세기.

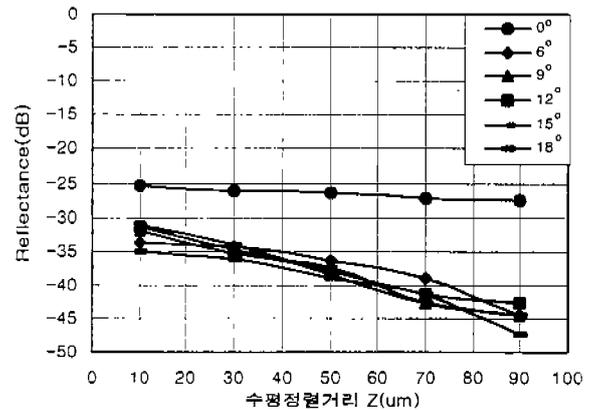


그림 10. 경사절두원추형 단면의 광섬유에 의해 반사되어 PD로 입사하는 송신빔의 세기.

로 입사하는 송신빔의 세기를 측정하였다. 측정된 광전류를 0.8 A/W의 PD responsivity와 3.5 mW의 LD출력에 대하여 dB으로 환산하여 그림 9 및 그림 10에 나타내었다. 그림 9에서와 같이 단순 경사면을 가지는 경우에는 반사율이 경사각에 크게 의존하며, 18° 경사면과 90 μm 정렬거리에서조차 -35 dB (-30 dBm) 이상의 큰 반사율을 가짐을 알 수 있다. 이 것은 일반적으로 가입자망에서 -30 dBm 이하의 crosstalk을 요구함을 고려할 때 부적합하다. 반면에 그림 10과 같이 경사절두원추형의 경우는 30 μm 이상의 수평정렬거리에서 약 -35 dB 이하의 비교적 낮은 반사잡음 특성을 보이며, core 경사면의 각도와 함께 core 부분 경사면의 면적에 의존한다.

수동정렬 방식에서 레이저빔축에 대한 광섬유의 수직 및 수

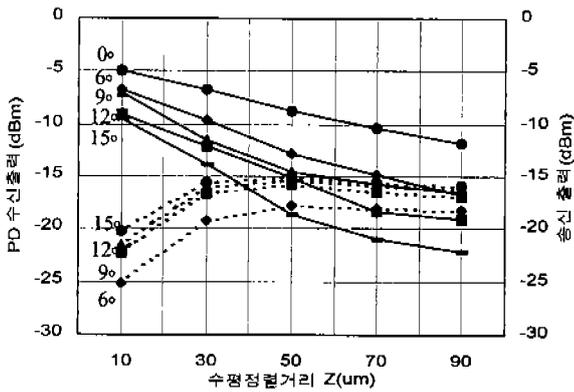


그림 11. $\delta_x = -2 \mu\text{m}$ 인 경우에 광섬유 단면경사각에 따른 송수신 sub-module의 광결합 특성. 실선은 광섬유 pigtail에서의 송신 광결합 출력이고 점선은 PD의 수신 광결합 출력.

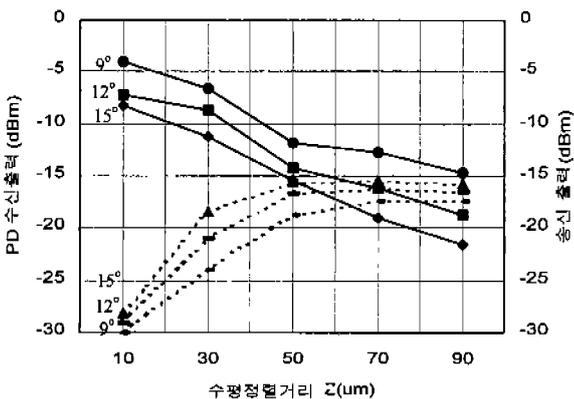


그림 12. $\delta_x = 0 \mu\text{m}$ 인 경우에 광섬유 단면경사각에 따른 송수신 광결합 특성.

평정렬오차(δ_x, δ_y)는 모듈제작의 수율을 결정하는 중요한 변수이다. 본 실험에서 플립칩 본딩에 의한 정렬 오차는 평균 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 이었고, 이는 V-홈에 정렬된 광섬유와 LD 사이의 수평정렬오차를 결정한다. 수직방향 정렬오차는 V-홈에 flat end 광섬유를 정렬하여 측정하였고, 그림 11과 그림 12는 수직정렬오차가 각각 $\delta_x = -2 \mu\text{m}$, $\delta_x = 0 \mu\text{m}$ 인 경우에 측정된 송수신 모듈의 송신광결합출력 및 수신출력특성이다. 점선은 광섬유 Pigtail로부터 -10 dBm 의 입력광에 대한 PD의 수신출력이고, 실선은 레이저와 경사절두원추형의 광섬유에 의한 광결합출력으로 레이저의 전류인가 조건은 앞에서와 같다. 광섬유의 경사각이 클수록 레이저와의 광결합출력은 작아지고, PD의 수신출력은 커진다.

그림 12는 $h=7 \mu\text{m}$, 수직정렬오차가 $\delta_x=0 \mu\text{m}$ 인 경우에 송수신 광결합출력의 측정결과로써, 9° 광섬유 경사각에 의한 PD 수신출력을 보면 $90 \mu\text{m}$ 에서 최대치에 근접하고, 송신출력은 -15dB 이상이다. 또한 12° 와 15° 의 경우는 PD 수신출력이 $70 \mu\text{m}$ 이전에서 최대점에 도달하고, 이때의 송신출력은 모두 -15 dB 이하이다. 이것은 앞장의 그림 4에서 $h = 7 \mu\text{m}$ 에 대한 계산결과로부터 수평정렬거리에 따른 송신광결합계수가 $90 \mu\text{m}$ 근처에서 최대이고, 이때 요구되는 광섬유 입계경사각이 9° 로써 이 경우를 송수신 조건을 동시에 만족하는 병목점으로 정

의하면, 그림 12의 측정 결과는 계산 결과에서 예측한대로 9° 경사각에 의해 $90 \mu\text{m}$ 에서 최대 수신출력, 즉 그 수평정렬 거리에서 입계경사각의 조건을 만족하면서 -15 dB 이상으로 다른 광섬유 경사각의 경우보다 큰 송신광결합출력을 보인다. 측정 결과에서 9° 경사각의 수신출력의 최대값이 $12^\circ, 15^\circ$ 에 비하여 낮은 것은 최대값을 위하여 요구되는 수평정렬거리가 상대적으로 커서 수신빔 반경이 커지는 것에 비해 PD의 수평반경은 일정하기 때문이다.

수직정렬오차에 따른 광결합계수의 계산결과(그림 5)는 -10 dBm 의 입력에 대하여 30% (-15 dBm)의 수신 결합효율을 기준으로 할 때, 그림 11과 그림 12의 측정결과에 의해 확인된다. 즉, 그림 11에서 $\delta_x = -2 \mu\text{m}$ 인 경우에 30% (-15dBm)의 수신 결합효율을 만족하면서 가능한 최대 광결합출력은 $50 \mu\text{m}$ 정렬거리에서 12° 광섬유에 의한 -15 dBm 이고, 그림 12의 $\delta_x = 0 \mu\text{m}$ 인 경우에는 같은 조건이 $50 \mu\text{m}$ 거리에서 15° 경사각의 광섬유에 의해 만족된다. 따라서 송수신 광정렬에서 수직방향 정렬오차는 광섬유 경사각에 의해 보정될 수 있음을 보인다. 즉 수직정렬오차가 음($\delta_x < 0 \mu\text{m}$)의 방향으로 커질 때는 보다 적은 각도의 경사각을 사용하고, 반대의 경우에는 큰 경사각을 사용함으로써 수직정렬오차가 보정될 수 있다. 그러나 그림 11의 6° 경사각에 의한 측정결과에서 보듯이 적은 굴절각으로 인해 수신빔이 PD 수평부로 충분히 입사할 수 없을 경우에는 최대 수신광결합에서조차 20% 를 넘지 못하게 된다. 따라서 음의 방향의 수직정렬오차에 대한 보정범위는 광섬유 경사각이 6° 보다 큰범위에서 이루어져야 함을 나타낸다.

Sub-module의 측정결과들에서 수신결합효율과 송신결합효율은 반비례 관계에 있으므로 최대 수신출력을 보장하면서 송신출력이 가장 큰 수평정렬거리, 즉 병목점에서의 결과가 최적의 송수신 광결합효율임을 의미한다. 이러한 병목점이 상대적으로 먼거리에서 형성되는 그림 12의 경우에는 Gaussian빔의 퍼짐으로 인해 수신광결합효율이 저하되므로 불리하다. 결과적으로 보다 유리한 송수신 광결합 조건은 병목점이 보다 짧은 거리에서 형성되는 경우이며, 그림 11의 측정결과에서 얻어진 최적의 값은 12° 경사각의 광섬유에 의해 $30 \mu\text{m}$ 정렬거리에서 최대 -12.1 dBm 의 송신광결합 출력과 25% (-16 dBm)의 수신 광결합효율이다. 이 수신결합효율은 0.2 A/W 의 responsivity에 해당한다.

V. 결 론

본 연구에서는 실리콘광학벤치에 경사면을 가지는 단일 광섬유와 송수신집적칩을 수동정렬하는 방식으로 가입자망을 위한 저가의 양방향 송수신 모듈을 설계하고 제작하였다. 경사 단면을 가지는 광섬유와 레이저 및 PD간의 광결합계수를 수식적으로 유도함으로써, 기본적으로 경사각을 가지는 광섬유와 레이저간의 광결합 계수를 계산하였다. 특히 수동정렬에 의한 수직정렬오차를 가질 때의 송수신 광결합계수에 대한 계산 결과로부터 수직정렬오차가 광섬유 경사각에 의해 보정될 수 있음을 예측하였고, 이는 측정결과 잘 일치하였다.

실제 양방향 송수신 모듈의 제작을 위하여 LD, PD의 집적

칩을 V-홈을 가진 실리콘 광학벤치에 flip-chip 본딩하고 경사 단면을 가지는 광섬유를 수동정렬하였다. 경사면을 가진 광섬유를 V-홈에 수동정렬하였을 때 발생하는, 레이저 송신빔의 반사에 의한 PD의 수신 잡음을 최소화 하기 위하여 광섬유의 단면을 경사절두원추형으로 제작하여 PD의 수신잡음을 30 μm 보다 큰 정렬거리에서 -35 dB이하로 낮출 수 있었다.

집적칩에서 레이저 활성층으로부터 PD 표면까지의 거리(h)가 7 μm 이고, 레이저와 광섬유축사이의 수직정렬오차(δ_z)가 각각 0 μm , -2 μm 인 경우에 수평정렬거리에 대한 레이저의 광결합출력과 PD의 수신출력을 다양한 경사각의 광섬유에 대하여 측정하였다. 결과적으로 sub-module의 제작에서 12도 경사각의 광섬유를 이용하여 30 μm 의 정렬 거리에서 -35 dB이하의 수신반사 잡음을 유지하면서 0.2 A/W이상의 responsivity와 -12.1 dBm의 송신출력을 얻었다.

추가적으로 집적칩의 구조를 개선하여 레이저 활성층에서 표면까지의 거리를 줄이고, tapering stripe 활성층에 의해 레이저의 모드 크기를 증가하여 광결합효율을 보다 향상시킬 경우 단거리 가입자망에서 매우 경제적인 양방향 송수신 모듈의 제작이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] J. Yoshida, OFC'97 Technical Digest 275 (1997).
- [2] N. Uchida, Y. Hibino, Y. Suzuki, T. Kurosaki, N. Ishihara, M. Nakamura, T. Hashimoto, Y. Akahori, Y. Inoue, K. Moriwaki, Y. Yamada, K. Kato, Y. Tohmori, M. Wada and T. Sugie, Electron. Lett. **32**, 1664 (1996).
- [3] G. C. Joo, S. H. Lee, K. S. Park, N. Hwang, J. S. Choi and M. K. Song, Electron. Lett. **34**, 2350 (1998).
- [4] T. Uno, T. Nishikawa, G. Tohmon, T. Yoshida, Y. Matsui, OFC'97 Technical Digest, 277 (1997).
- [5] G. M. Foster, J. R. Rawsthorne, J. P. Hall, M. Q. Kearley and P. J. Williams, Electron. Lett. **31**, 132 (1995).
- [6] K. Shiraishi, N. Oyama, K. Matsumura, I. Ohishi, and S. Suga, J. Lightwave Technol. **13**, 1736 (1995).
- [7] Masatoshi Saruwatari and Kiyoshi Nawata, Applied Optics **18**, 1847 (1979).
- [8] Jun-Ichi Sakai and Tatsuya Kimura, IEEE J. Quantum Electron. **QE-16**, 1059 (1980).
- [9] 이상환, 주관중, 황남, 문종태, 송민규, 편광의, 한국광학회지 **8**, 510 (1997).

Calculation and measurement of optical coupling coefficient for bi-directional transceiver module

J. D. Kim, J. S. Choi, S. H. Lee, H. S. Cho, J. S. Kim, S. G. Kang,
H. T. Lee, N. Hwang, G. C. Joo and M. K. Song

Compound Semiconductor Department, Microelectronics Technology Lab., ETRI, Taejeon 305-350, Korea

(Received October 4, 1999, Revised manuscript received November 12, 1999)

We designed and fabricated a bidirectional optical transceiver module for low cost access network. An integrated chip forming a pin-PD on an 1.3 μm FP-LD was assembled by flip-chip bonding on a Si optical bench, a single mode fiber with an angled end facet was aligned passively with the integrated chip on V-groove of Si-optical bench. Gaussian beam theory was applied to evaluate the coupling coefficients as a function of some parameters such as alignment distance, angle of fiber end facet, vertical alignment error. The theory is also used to search the bottle-neck between transmittance and receiving coupling efficiency in the bi-directional optical system. In this paper, we confirmed that reduction of coupling efficiency by the vertical alignment error between laser beam and fiber core axis can be compensated by controlling the fiber facet angle. In the fabrication of sub-module, as we made such that the fiber facet have a corn shape with an angled facet only core part, the reflection of transmitted laser beam from the fiber facet could be minimized below -35 dB in alignment distance of $\geq 30 \mu\text{m}$. In the same condition, transmitted output power of -12.1 dBm and responsivity of 0.2 A/W were obtained.