

Si V-groove를 이용한 광섬유와 Photodiode결합에서의 Beam Profile과 결합효율에 대한 이론적 연구

금동인[°], 민성욱, 이병호
서울대학교 전기공학과

Theoretical Study of the Beam Profile and Coupling Efficiency
for Fiber-Photodiode Coupling using Si V-grooves

Department of Electrical Engineering, Seoul National University
Dongin Keum, Sung-wook Min, and Byoungho Lee

Abstract

In the fiber-photodiode(PD) coupling module using v-groove, the paraxial approximation is no longer valid because the beam enters obliquely the PD substrate with the angle of 20° after being reflected from the 55° mirror formed by anisotropically etching of the (100) silicon wafer. In this paper, we study the beam profile incident on the PD active area and fiber-PD coupling efficiency for this case.

I. 서론

광통신 시스템 또는 병렬 광데이터링크 등을 구현하는 데 있어 광섬유-photodiode(PD)의 결합방법으로 많이 사용되는 방법 중 하나가 Si V-groove와 여기에 형성된 반사면을 이용하며 그 위에 PD를 고정시키는 것이다. 보통 (100) Si wafer가 사용되며 (111)면이 V-groove면과 거울면으로 사용되는데 이는 (100)면과 약 55°의 각도를 이룬다. 본 논문에서는 장파장 반도체 레이저용으로 사용되는 InP-based PD를 Si V-groove위에 고정시킬 때의 최적위치와 정렬오차(misalignment)에 따른 결합효율에 대한 이론적 고찰을 하고자 한다. 굴절율이 다른 물질에 종축근사를 적용시킬 수 없는 경사각도로 입사하는 optical beam에 대하여는 본 논문에서와 같이 beam profile을 계산하는 것이 가장 정확한 방법일 것이다. 이렇게 경사입사하는 Gaussian beam에 대한 연구는 본 저자들이 아닌 한 주목을 받지 못하다가 작년에 와서 ray matrix를 수정시키는 방법이 제안된 바 있다.[1] 본 논문에서는 이를 이용하는 방법과 문제점도 지적하고자 한다.

II. Beam Profile과 결합효율 모델링

광섬유와 photodiode(PD) array를 결합(coupling)시키는 방법으로 일반적으로 사용되는 것은 [그림1]과 같은 것이다.[2] V-groove들이 Si에 등간격으로 비등방성 식각에 의해 식각된다. V-groove들의 한쪽 끝들은 역시 비등방성 식각에 의해 경사면을 형성한다. 이러한 V-groove array에 광섬유들이 고정되고, 그 위에 PD array를 고정시킨다. [그림1]과 같이 Si V-groove에 embedded된 광섬유의 끝에서 나온 광신호가 Au로 코팅된 Si 반사면을 통해 반사되어 PD에 입사된다. (100) Si wafer를 사용할 때 (100)면과 (111)면은 약 55°의 각도를 이루므로 [그림1]에서와 같이 V-groove 끝의 거울은 45°경사가 아닌 55°경사를 갖는다. 따라서, 광섬유에서 나온 beam의 중심선은 [그림2]에서와 같이 대략 20°의 각도로 InP기판에 입사된다. 본 고에서는 이 점을 고려하여 InP기판에 입사되는 beam의 profile을 살펴보고자 한다.

광섬유와 PD 어레이 광신호 결합을 위해 multi-mode fiber보다 skew가 작은 single-mode fiber를 이용한다고 하자.

Single-mode fiber의 단면에서 거리에 따른 beam profile을 계산하기 위해 광섬유 단면에서 계산된 near-field profile로부터 거리에 따른 beam profile을 이하에서와 같이 계산하였다. 이때 Si기판과 빔면의 각도가 대략 55°임이 고려되었다.

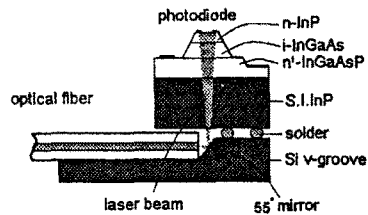
Gaussian beam에 대한 해석을 기초로 하여 광섬유 단면에서의 E-field를 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) \times \exp\left(-jkz + j\eta(z) - j\frac{kr^2}{2R(z)}\right) \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} w(z) &= w_0 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2}\right)^{1/2}, \\ R(z) &= z \left(1 + \frac{z_0^2}{z^2}\right), \\ w_0 &= \frac{MFD}{2}, \\ z_0 &= \frac{\pi w_0^2 n}{\lambda} \end{aligned} \quad (2)$$

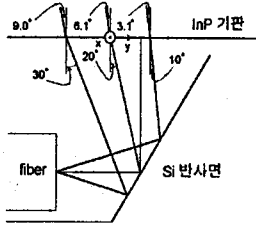
이다. (여기서, MFD: mode field diameter)



[그림 1] 광섬유-PD 결합방법

이러한 빔이 Si 반사면을 지나 굴절율이 다른 InP로 입사되어 진행된다. Beam의 중심선 ray가 55°의 반사면에서 반사되어 InP 기판면의 법선에 대하여 약 20°의 각도로 입사한다. 그러므로, InP 기판 면에서 종축근사에 적용되는 보통 사용되는 ray matrix를 그대로 사용하기는 곤란하다. InP 기판 속을 진행한 후 Gaussian beam profile의 모양이 변하는 것을 살펴볼 때 있어 waist를 나타내는 ray가 어떻게 지나가는 가는 [그림2]에 나타나 있다. 여기에서 Gaussian beam의 divergence angle을 10°라고 가정하였다. Multi-mode fiber의 경우 acceptance angle은 10° 이상이고, single-mode fiber의 6°경우는 정도이기 때문에[4] 위의 가정은 대략적으로 타당하다고 볼 수 있다. InP 기판 면에서 waist ray가 [그림2]에서와 같이 각각 6.14°, 8.99°, 3.11°로서 중심선 ray에 대하여 약간 비대칭임을 알 수 있다. InP 기판 면에서 2차원으로 보았을 때 waist ray가 기판 면과 만나는 점을

연결할 때의 모양은 원이 되지 않는다. 이러한 모양은 [그림4]에 나타나 있다. [그림4]은 [그림2]에서의 좌표에서 중심선이 InP기판과 만나는 지점을 기준으로 하였을 때 그려진 그림이다. 중심선 ray가 진행방향에 transverse한 면에서 최대의 optical field의 크기를 가지면서 진행하게 된다. 그리고, 진행방향으로 beam이 진행할수록 크기가 줄어든다. Gaussian beam의 식(1)을 보면 중



[그림 2] Si 반사면에서 반사되어 InP기판에 입사하는 beam의 모습

심선 ray는 $r=0$ 일 때에 해당하므로 이에 대한 optical field의 크기가 $\frac{w_0}{w(z)}$ 의 factor로 감소한다. 그러므로, InP 기판면에서

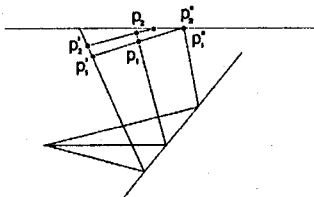
waist ray가 만나는 점들은, 중심선 ray가 만나는 점의 optical field값에서 이의 크기가 1/e의 factor로 감소하는 값이 아니다. 종축근사에 사용되는 ray matrix를 이용하리면 waist ray가 기판 면과 만나는 점들은 중심선 ray와 동일 거리상에 위치하고 동일한 최대 크기 값에서 optical field의 크기가 1/e의 factor로 감소하는 점들이어야 한다는 가정이 필요하므로 이는 타당성을 잃는다.

[그림3]에서와 같이 P_1 지점의 optical field의 크기에 대해 P_1' 과 P_1'' 의 지점에서의 optical field의 크기가 1/e의 factor로 감소하고, 지점 P_2 에서의 optical field의 크기에 대해 P_2' 와 P_2'' 지점에서의 optical field의 크기가 1/e의 factor로 감소한다. P_1 에서의 optical field의 크기에 대해, P_2 에서의 optical field의 크기는 식(1)에서

볼 수 있듯이 $\frac{w_0}{w(z)}$ 비와 관계하여 감소하고 P_2' 에서의 optical field의 크기는 P_2 에서의 값에서 transverse 방향으로의 거리 r 에 따라 $\exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right)$ 만큼 감소하므로 이러한 점들을 고려하여

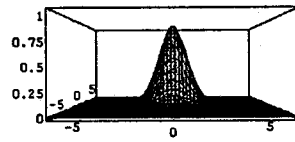
기판면에서의 optical field를 계산할 수 있다. 이렇게 하여 얻어진 beam profile이 [그림4]에 나타나 있다. [그림4]의 (a)와 (b)에서 보는 바와 같이 x축과 y축에 대하여 그런 beam profile이 서로 다르다. Y축에 대하여는 최대값에서 optical field의 크기가 감소하는 비율이 서로 다른 반면, x축에 대하여는 감소하는 비율이 같다. 이러한 모양은 (c)에서도 잘 나타나 있다.

InP 기판 속으로 진행할 때는 중심선 ray는 기판의 법선에 대하여 대략 6° , waist ray는 중심선 ray에 대하여 대략 3° 의 각도 쪽으로 진행한다고 근사한다. 광섬유에서 나온 Gaussian beam의 waist ray가 중심선 ray에 대하여 10° 보다 더욱 큰 각

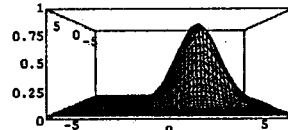


[그림 3] InP 기판에서 지점에 따른 optical field 크기 감소 표시

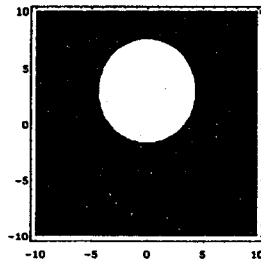
도의 폭을 가지게 될 때에는 기판 속으로 굴절된 빔은 waist ray와 중심선 ray사이의 폭이 무시할 수 없는 차이를 보일 것이다. InP기판의 굴절율이 3.2로서 공기에 대하여 상당히 크기 때문에 여기에서 가정된 10° 의 divergence angle을 갖는 beam에 대하여는 그 폭이 중심선에 대하여 거의 같다. 그리고, InP기판 면에서 beam profile을 구할 때 한 가정을 그대로 사용하였다. PD 표면의 법선에 대하여 중심선 ray는 6° 의 각도로 입사하며, 기판 면에서의 비대칭성에 비해 InP안에서는 대칭이 그리 깨지지 않는다. [그림5]에 InP안에서의 beam profile이 나타나 있다. 그리고, 빔이 더 퍼진 모양으로 나타난다. [그림5]는 중심선이 InP기판의 두께를 진행하고 나서 PD의 active 영역 표면에서 만난 점을 기준으로 하였을 때 [그림2]에서와 같이 주어진 좌표에 따라 그려진 beam profile이다. [그림5]의 (a)와 (b)에서는 x축과 y축에서의 감소하는 비율이 거의 비슷하다는 것을 볼 수 있다. (c)를 보면 같은 크기의 optical field를 가지는 x와 y의 점들을 연결한 모양이 원에 거의 가까운 타원임을 알 수 있다.



(a)



(b)



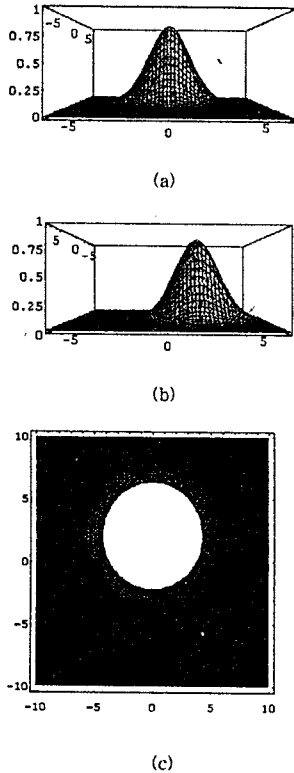
(c)

[그림 4] InP 기판면에서의 beam profile

(a) x축에 따른 beam의 세기

(b) y축에 따른 beam의 세기

(c) x, y좌표 상에서의 beam의 세기 패턴



[그림 5] PD active영역에서의 beam profile
 (a) x축에 따른 beam의 세기
 (b) y축에 따른 beam의 세기
 (c) x, y좌표 상에서의 beam의 세기 패턴

정렬오차에 따른 결합효율을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_d = \frac{A}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} EE^* r dr d\theta \quad (3)$$

여기서 r 과 θ 는 PD의 active영역의 중심을 기준으로 한 수평면에서의 극좌표이며 E 는 r 과 θ 의 함수로 표시된 optical field이며 A 는 intrinsic impedance와 quantum efficiency 등을 고려한 적절한 비례계수이다. 이의 계산 결과를 [그림6]에 나타내었다. Mesa의 지름은 $80\mu\text{m}$, 광섬유 끝에서 InP기판까지의 거리는 $120\mu\text{m}$, InP 내에서 active 영역까지의 거리를 $200\mu\text{m}$ 로 가정하였다.

경사지게 입사되는 빛에 대해서 적용될 수 있는 ray matrix[1]는 식(4)과 같이 표현할 수 있다.

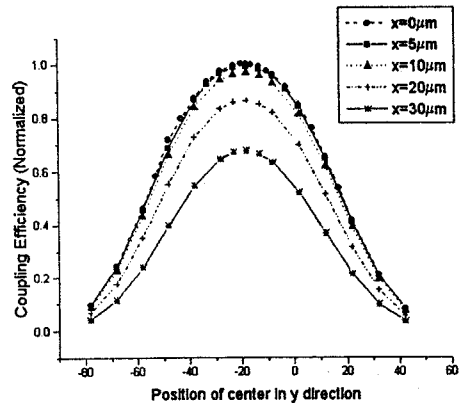
$$\begin{bmatrix} r_{out} \\ \theta_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} & 0 \\ 0 & \frac{n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{in} \\ \theta_{in} \end{bmatrix} \quad (4)$$

이것은 경사지게 입사되는 빛의 각도를 θ_1 이라고 하고 굴절되어 진행하는 각도를 θ_2 라고 본 후 그 빛을 축으로 paraxial approximation을 적용시킨 것으로, r_{in} , r_{out} 은 진행축을 기준으로 수직으로 떨어진 거리를 의미하는 것이다. 이 matrix를 적용하면 InP기판 안에서의 beam waist등을 계산할 수 있게 된다. 그러나, 이 matrix는 기판계면에서 r_{in} 이 표면에서의 정확한 beam의 도달 위치가 아니라 중심축이 계면에 도착했을 때의 값이기 때문에 계면에서의 값이 오차를 가지게 되는 문제가 있다. 물질 안에서의 r_{out} 도 역시 그렇다. 이러한 matrix를 이용하여 Gaussian beam을 계산할 때는 물질 안에서 어느 정도 진행한 다음의 beam을 알 수 있고, 그러한 beam은 약간의 오차를 가지고 있다.

III. 결론

[그림6]에서 보는 바와 같이 Gaussian beam이 각도가 크게 입사할 때 입사평면에서는 약간 비대칭으로 나타나는 반면에, 입사평면에 수직인 평면에서는 beam이 Gaussian모양을 유지하고 있음을 알 수 있다.

Mesa PD의 중심이 beam power의 최대값을 갖는 점과 일치할 때를 기준으로 하여 정렬오차에 따른 결합효율을 계산한 결과가 [그림6]에 나타나 있다. 결합효율의 값은 최대결합효율에 대하여 규격화한 것이다. 각각 $x=0\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 일 때의 그림을 나타내었다. [그림6]에서의 좌표는 Si반사면이 45° 라고 가정하였을 때 beam의 중심선이 InP기판과 만나는 점을 기준으로 하여 [그림2]에서의와 같은 방향으로 x-y좌표를 잡은 것이다. Mesa PD의 중심이 x-y좌표에서의 원점에서 벗어난 좌표값에서의 결합되는 power를 계산하였을 때, y축으로 음의 방향으로



[그림 6] active area의 중심위치에 따른 결합효율

대략 $18\sim 20\mu\text{m}$ 떨어진 좌표에서 효율이 최대가 된다. Si 반사면이 45° 라고 가정하였을 때 beam의 중심선이 수직으로 PD면에 입사하는 지점인 원점에 active영역의 중심이 놓여져 있을 때의 효율은 대략 최대효율의 85%가 된다. 최대의 효율을 가진 값에서 대략 $12\mu\text{m}$ 폭 내에서 95%의 상대효율이 되고, 대략 $15\mu\text{m}$ 폭 내에서 90%의 상대효율이 된다. 또한, 이와같이 일반적인 중축근사를 적용시킬 수 없는 경우에 대해 ray matrix를 확장시키는 방법이 최근 제안되었는데, 이는 앞에서 지적한 바와 같은 문제점이 있어 이의 유효조건과 개선방안에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

* 본 논문은 한국과학재단의 지원을 받은 '광 연결기술을 이용한 모드간 광데이터 링크의 구현' 연구의 일부임.

Reference

- [1] Jean-Pierre Weber, "Device Design Using Gaussian Beams and Ray Matrices in Planar Optics", IEEE J.Quantum Elec., vol. 30, no. 10, 1994.
- [2] 정종민 *et al.*, "실리콘 V-groove를 이용한 광섬유-광검출기 어레이 모듈 제작", 전자공학회 논문지 제31권 A편 제6호, pp 88, 1994.
- [3] A. Yariv, Optical Electronics, 4th ed, Saunders HBJ, 1991.
- [4] The 1994 NEWPORT CATALOG.