

論文97-34D-1-8

하나의 GRIN Rod Lens를 이용한 효율적 병렬 광연결

(An Effective Parallel Optical Interconnection using Single GRIN Rod Lens)

金聖哲*, 李旭*, 李竝浩*, 鄭智采**

(Sung-Chul Kim, Wook Lee, Byoungho Lee, and Ji Chai Jeong)

요 약

병렬 광연결 구조에서 하나의 GRIN(graded-index) rod lens를 사용하여 working distance의 증대와 병렬 연결의 용이성을 기하는 방법의 가능성을 연구하였다. 본 논문에서 제시하는 하나의 GRIN rod lens를 사용하는 병렬 광연결 방법은 상대적으로 정렬오차에 덜 민감하다. 본 논문에서는 실험의 편의상 이방법을 이용해 4-채널(channel) 광섬유 어레이간의 병렬 광연결을 테스트 하였고, 이를 직접결합(butt-coupling) 및 ball 렌즈를 사용한 방법과 비교함으로써 레이저 다이오드 어레이와 광섬유간의 병렬 연결에 효과적으로 사용될 수 있는 가능성을 보여주었다.

Abstract

We proved the feasibility of a parallel optical interconnection technique using single GRIN (graded-index) rod lens as an intermediate coupling device, which increases the working distance and makes packaging easy. The proposed technique shows relatively less dependency on misalignments. In this paper, for convenience of experiments, we applied this method to 4-channel coupling between two fiber arrays, and compared it with butt-coupling and the method of using ball lens. The comparison shows the feasibility of adopting the proposed method to the parallel interconnection between a laser diode array and an optical fiber array.

I. 서론

일반적으로 레이저 다이오드(laser diode:LD)와 광섬유간의 연결에서, 일대일 연결일 때는 다양한 방법으로 광연결 효율을 높일 수 있다^[1,2]. 그러나 어레이(array)로 된 LD와 광섬유간의 병렬 연결에서는 어떠한 쌍의 LD-광섬유 결합 효율만을 최대로 하는 것이

아니라 모든 쌍들간에 결합 효율이 높으면서도 고른 값을 갖도록 시스템을 구성하여야 한다. 일반적으로 LD와 광섬유 연결방법은 다음의 두가지 분류법으로 구분할 수 있다^[3]. 첫번째로 개개(piece by piece)결합 방법과 이에 대응하는 batch 방법이 있는데, 개개 결합 방법은 각각의 광섬유를 독립적으로 LD에 결합시킨 다음 어레이 모듈로 패키징을 하는 방법이다. 이 방법은 결합 효율은 극대화 할 수 있으나 시간과 비용이 많이 들어 대량생산에는 적합하지 않다. 이에 비해 batch 방법은 LD 어레이를 사용하고 또한 광섬유를 실리콘 V 홈에^[4] 동일한 간격과 높이로 정렬, 고정시켜 이를 LD 어레이와 직접 연결하는 것이다. 둘째 분류법으로 능동(active) 방법과 수동(passive) 방법이 있다. 능동 방법은 LD를 구동시켜 광섬유에 빛을 넣어

* 正會員, 서울대학교 電氣工學部
(School of Electrical Eng., Seoul National Univ.)

** 正會員, 高麗대학교 電波工學科
(Dept. of Radio Eng., Korea Univ.)

※ 본 연구는 서울대 반도체 공동연구소를 통해 학술진흥 재단으로부터 지원받은 것임(ISRC 95-E-3208).
接受日字:1996年7月26日, 수정완료일:1997年1月14日

광검출기로 빛의 세기를 측정하면서 가장 많은 빛이 결합되는 위치를 찾아서 연결하는 방법이고, 수동 방법은 LD를 구동하지 않고 고정 구조물(fixture)과 현미경을 사용하여 LD 어레이와 광섬유 어레이를 정렬하여 연결하는 방법이다.

본 논문에서는 batch 및 능동방법의 하나를 다루고자 한다. 광부품의 수를 줄일 수 있는 가장 좋은 방법은 직접결합(butt coupling)이지만, 이는 working distance가 작고 정렬오차(misalignment)에 민감하다. Working distance를 늘리고 정렬오차에 대한 tolerance를 높으려면 LD와 광섬유 사이의 거리를 띄워야 하지만, 이는 결합효율을 떨어뜨린다^[5,6]. Ball 렌즈를 사용하는 방법은 각각의 ball 렌즈를 따로 정렬시켜야 하므로 LD-광섬유 어레이의 결합방법으로는 적합하지 않다. 최근에 하나의 광섬유를 식각하여 이를 병렬 광연결을 위한 렌즈로 사용하는 아이디어가 제안되었다^[7]. 본 논문에서는 쉽게 구할 수 있는 GRIN rod 한 개를 렌즈로 사용하여 4-채널(channel) 병렬 광연결을 구현하기 위한 실험적 연구를 다루고자 한다. 큰 출력을 갖는 패키지(package)되지 않은 LD 어레이를 구할 수 없어 광섬유 어레이와 광섬유 어레이간의 연결에 대해 실험을 하여 그 가능성을 확인하였다. 250 μm 의 간격을 갖는 실리콘 V 홈을 제작하여 여기에 단일 모드 광섬유를 에폭시로 고정을 시켜 광섬유 어레이를 만들었고 LD를 대신할 송신단으로는 같은 간격의 실리콘 V 홈 위에 고정된 다중 모드 광섬유를 사용하였다. 이렇게 한 이유는 송신단의 다중 모드광섬유에서 나오는 빛의 기본 모드를 LD의 출력 모드처럼 Gaussian^[8]으로 볼 수 있고 또한 빛의 확산 각도가 단일 모드 광섬유에서 나오는 빛보다 LD와 비슷하기 때문이다.

II. 실험

광섬유 어레이간의 병렬 연결 실험은 직접결합, ball 렌즈를 사용한 결합, GRIN rod 렌즈를 사용한 결합의 세가지 방법으로 행해졌다. 그림 1은 이중 셋째 방법에 대한 실험 장치를 보여 준다. 첫째와 둘째 방법에 대한 실험도 비슷한 방법으로 수행되었다. 각 경우에 대해 결합효율을 측정하였고, 또한 그림 1에 표시된 각 방향의 정렬 오차에 대한 결합 효율을 측정하였다. 여기에 사용된 광섬유는 코어의 직경이 50 μm , N.A.(numerical

aperture)가 0.2, 굴절률의 분포가 포물선 프로파일(profile)을 갖는 다중모드 광섬유와 코어의 직경이 9.3 μm , N.A.가 0.11, 굴절률이 계단형인 단일모드 광섬유이다. 실험 방법은 다음과 같다. 그림 2와 같이 250 μm 간격의 실리콘 V 홈을 제작하여 그위에 4개의 광섬유를 에폭시로 고정을 시켜 4 채널 광섬유 어레이를 만들었고 이 어레이를 xyz-스테이지(stage)에 고정을 시켜서 그림 1과 같이 LD를 대신한 빛을 내는 스테이지와 빛을 접속하는 스테이지를 만들었다^[3,9]. 광원으로는 실험의 편의상 He-Ne 레이저에서 나오는 적색광(633nm)을 사용하였다. 수신단에서는 광검출기를 사용하여 출력파워를 측정하였다. 결합효율은 송신단에서 나오는 빛의 파워에 대한 수신단에서 나오는 빛의 파워의 비율로 계산을 하였다.

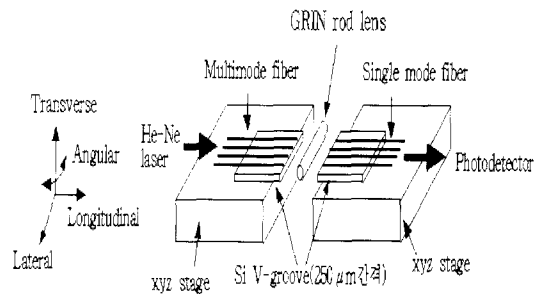


그림 1. GRIN rod 렌즈를 사용한 광섬유 병렬 연결의 시스템 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of coupling between fiber arrays using a GRIN rod lens.



그림 2. 실리콘 V 홈에 고정된 광섬유
Fig. 2. Optical fibers fixed on Si V-grooves.

실험의 세가지 방법 중 첫 번째는 직접결합으로 광섬유 어레이와 어레이를 단순히 붙여서 실험을 한 것이다. 이 방법은 간편하나 정렬 오차에 매우 민감하다는 단점이 있다. 특히 정렬 축에 수직인 방향의 정렬오차에 매우 민감하고 또한 working distance가 작기

때문에 매우 정밀한 정렬 장치가 필요하다. 다음의 식은 정렬 오차가 없다고 가정했을 때, 광섬유 코어의 직경 및 N.A.가 서로 다를 경우에 대한 결합 손실에 관해 대략적으로 계산하는 식이다^[10].

$$Loss = -10 \log \frac{(a_2 NA_2)^2 (a_1 + 2) a_2}{(a_1 NA_1)^2 (a_2 + 2) a_1} \text{ dB}, \quad (1)$$

$$a_2 < a_1, NA_2 < NA_1$$

여기에서 a_1, a_2 는 각각 송신단과 수신단 광섬유의 코어의 지름이며, a_1, a_2 는 각각의 굴절률 프로파일로, 그 값은 계단형 굴절률에 대해서는 무한대이고 포물선형 굴절률에 대하여는 2이다. 식 (1)로 계산한 결과 손실은 16.8dB이었다. 그러나, 실제 실험에서는 약 13dB였다. 이렇게 차이가 나는 이유는 식 (1)이 광섬유 안에 존재하는 모드를 고려하지 않고 단순히 기하광학적인 방법을 사용하여 유도한 식이기 때문이다. 보다 정확한 계산은 두 개의 광섬유의 모드간의 상관관계를 고려한 계산법으로 얻을 수 있을 것이다^[16].

두번째 방법은 광섬유 어레이와 어레이 사이에 ball 렌즈를 사용한 것이다. 이 방법은 첫번째에 비해 빛을 모으기 때문에 결합 효율의 향상을 기할 수 있다. 그러나 ball 렌즈를 어레이로 제작하는 것이 어렵고 각각의 ball 렌즈가 제대로 정렬이 되지 않으면 이 방법은 의미가 없게 된다. Ball 렌즈를 사용했을 때의 또 다른 문제는 반사, 또는 산란되는 빛의 양이다^[11]. Ball 렌즈가 이상적인 구의 형태이며 내부에서의 산란이 없다고 가정 했을 때의 반사율이 계산 결과 약 2.5% 이었다. 이 계산은 Gaussian 빔 프로파일에 따라 ray의 밀도 분포를 가정하고 각각의 ray에 대해 Fresnel 반사율을 고려하여 수행한 것이다. 그러나 실제 실험에서는 약 25%정도가 반사되거나 산란되었다. 이러한 이유는 여기에 사용된 렌즈의 내부가 균일하지 않아 렌즈 내부에서 산란이 되는 양이 많기 때문이다. 사용된 ball 렌즈의 재질은 폴리스티렌이고 굴절률은 1.59, 직경은 200 μm 이다. 그림 3은 ball 렌즈의 초점거리 및 초점의 폭(depth of focus)에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과에 의하면 초점의 폭이 약 50 μm 정도이다.

세번째 방법은 GRIN rod 렌즈를 사용하는 것이다. 이는 앞의 그림 1에서처럼 광섬유 어레이와 어레이 사이에 렌즈를 위치시켜 한꺼번에 4개의 병렬연결을 가능케 하는 것이다. 이 방법의 장점은 앞의 두가지 방

법에 비해서 정렬이 간편하고 working distance가 커서 'batch 및 능동' 방법에 적합하다는 것이다. 또한 실험을 통해서 이 방법은 정렬 오차에 다소 덜 민감하다는 것을 확인할 수 있었다.

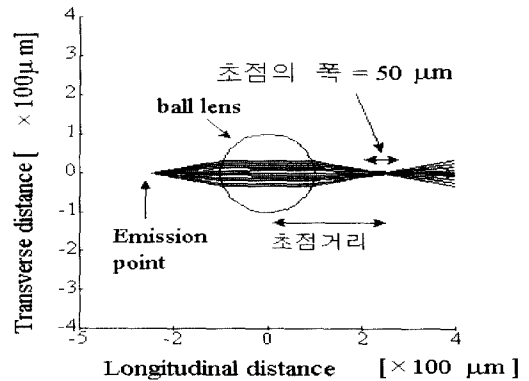


그림 3. Ball 렌즈의 초점거리 및 초점의 폭에 대한 시뮬레이션
Fig. 3. Simulation of focal length and depth for a ball lens.

그러나 이 방법은 crosstalk가 존재한다는 단점을 갖고 있다. GRIN rod 렌즈의 특성상 수직(transverse) 방향(그림 1 참고)에 대해서는 빛을 모으지만, 수평(lateral) 방향에 대해서는 렌즈의 역할을 하지 못하기 때문에 빛이 퍼지게 된다. 이로 인해 옆에 있는 광섬유에 빛이 들어가는 crosstalk가 생기게 된다. 실험으로 측정된 crosstalk는 약 9.2 dB 였다. 이 방법이 레이저 다이오드 어레이에 적용이 된다면 이렇게 큰 crosstalk가 생기지는 않을 것이다. 그림 4에서 보듯이 레이저 다이오드에서 나오는 빔의 모양이 광섬유의 것과 다르고 또한 수평 방향으로로는 빛의 퍼짐 각도가 약 1° 정도로 매우 작으므로 crosstalk가 무시할만할 것이라고 예상할 수 있다. 실험에 사용된 GRIN rod 렌즈는 Newport 제품이고 직경은 2000 μm 이며, 굴절률은 다음과 같다.

$$n = n_0 \left(1 - \frac{A r^2}{2} \right) \quad (2)$$

여기에서 r 은 GRIN rod 렌즈의 축으로부터의 거리이며, $n_0=1.6038, A=0.0094$ 이다.

그림 5는 GRIN rod 렌즈의 초점거리 및 초점의 폭에 대한 시뮬레이션을 보여준다.

그림 6, 7, 8은 그림 1의 세 방향(transverse, lon

gitudinal, angular)의 정렬오차에 대한 결합효율을 측정
 한 결과이다. 세가지 방법에 대한 실험 결과를 보여
 주고 있다. 그림 6(a)에서 직접결합의 경우가 최대 결
 합효율을 나타냄을 볼 수 있다. 그러나, 같은 정도의
 수직 방향으로의 정렬 오차에 대해, 그 경우의 결합효
 유의 최대 결합효율에 대한 비율은GRIN rod 렌즈의
 경우가 직접의 경우보다 떨어지지 않는다(그림 6(b)).

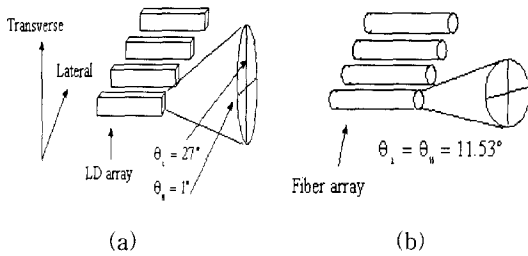


그림 4. 전형적인 LD와 실험에 사용된 광섬유에서 나
 오는 빔의 형태

Fig. 4. Beam shapes from (a) a typical LD and
 (b) the optical fiber used in the exper-
 iment.

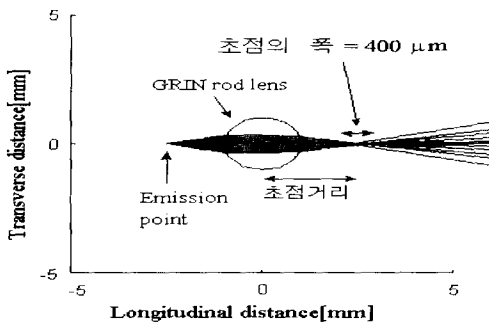


그림 5. GRIN rod 렌즈의 초점 거리 및 초점의 폭
 에 대한 시뮬레이션

Fig. 5. Simulation of focal length and depth for
 a GRIN rod lens.

그림 7은 송신단의 광섬유와 수신단의 광섬유의 거리
 에 따른 결합효율의 변화를 보여준다. 직접은 두 광섬
 유간의 간격이 0일 때 결합효율이 최대이며 간격이 증
 가함에 따라 결합효율은 감소한다. Ball 렌즈를 사용하
 였을 경우는 간격이 400 μm의 위치에서 결합효율이
 최대가 된다. 이는 초점의 위치를 나타낸다. GRIN rod
 를 이용하였을 경우는 그 간격이 약 5mm까지 증가함
 을 볼 수 있다. 이는 상대적으로 수월한 정렬을 가능하
 게 한다. 그림 7에서 GRIN rod 렌즈의 경우에 최대치

가 두 군데인 이유는 그림 5에서 초점 거리의 폭이 매
 우 넓기 때문이다. 그림 8은 그림 1에 표시한 각도의
 정렬오차에 대한 결합 효율의 변화를 보여준다. 그림
 8(b)에서 GRIN rod 렌즈를 사용한 방법은 각도의 오
 차에 대해 다른 방법들에 비해 상대적으로 민감하지
 않음을 볼 수 있다. GRIN rod 렌즈와 ball 렌즈를 사
 용했을 때 결합효율이 높지 않은 이유는 사용한 렌즈
 가 광결합용으로 제작된 것이 아니어서 내부산란이 나
 타나기 때문이다.

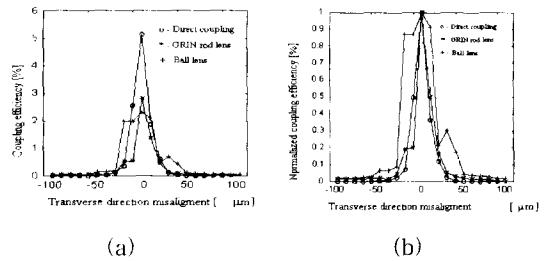


그림 6. Transverse 방향의 정렬 오차에 대한 결합효
 유 (a) 결합효율 (b) 각 경우의 최대 결합효율
 에 대해 규격화한 그래프

Fig. 6. Coupling efficiency versus transverse
 direction misalignment.
 (a) Coupling efficiency (b) Coupling effi-
 ciency normalized to the maximum
 value in each case.

III. 결 론

이상에서 직접결합, ball 렌즈를 이용한 결합, 하나의
 GRIN rod 렌즈를 이용한 결합 방법에 의해 병렬 광결
 합을 하기위한 기본적 실험에 대해 기술하였다. 직접결
 합은 결합효율은 최대로 만들 수 있으나 정렬이 어렵
 고 상대적인 결합효율이 정렬오차에 민감하다. Ball 렌
 즈를 이용한 결합은 직접결합보다 working distance
 가 크지만, 각각의 ball 렌즈를 따로 정렬시켜야 하는
 어려움이 있다. 본 논문에서 살펴본 하나의 GRIN rod
 렌즈를 이용하는 방법은 working distance가 크며 각
 도의 정렬오차에 대한 결합효율의 상대적 변화가 직접
 결합에 비해 작다는 장점이 있다. 한 개의 GRIN rod
 렌즈를 사용하므로 ball 렌즈를 사용한 병렬 광연결보
 다 packaging이 훨씬 수월하다. 실제로 LD를 사용한
 다면, crosstalk은 본 논문의 경우보다 크게 감소할 것
 이다. 이는 일반적으로 제작되는 LD의 경우 출력 빔
 (beam)의 형태가 본문의 그림 4처럼 수평 방향으로는

퍼지는 각도가 작기 때문이다.

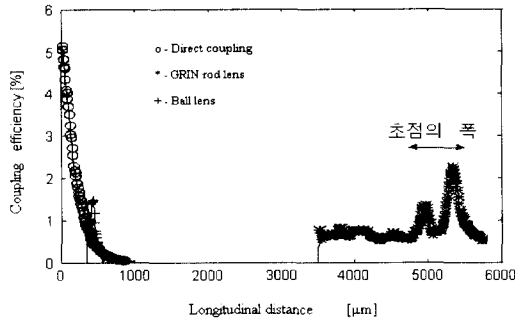


그림 7. Longitudinal 방향의 정렬 오차에 대한 결합효율
Fig. 7. Coupling efficiency versus longitudinal direction misalignment.

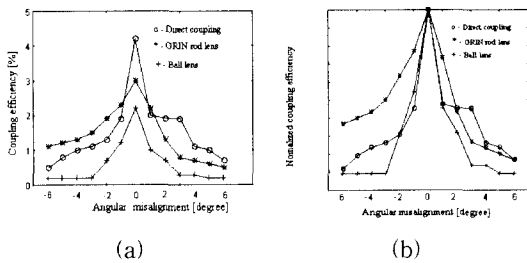


그림 8. Angular 방향의 정렬 오차에 대한 결합효율
(a) 결합효율 (b) 각 경우의 최대 결합효율에 대해 규격화한 그래프
Fig. 8. Coupling efficiency versus angular misalignment.
(a) Coupling efficiency (b) Coupling efficiency normalized to themaximum value in each case

참 고 문 헌

[1] K. Shiraishi, I. Ohishi and S. Suga, "A fiber lens with a long working distance for integrated coupling between laser diodes and single-mode fibers," J. of Lightwave Technology, vol. 13, no. 8., pp. 1736-1744, Aug. 1995.
[2] 강승규, 송민규, 장동훈, 편광의, "레이저 웰딩 기술을 이용한 고속 광통신용 송신 모듈 제작 및

특성 연구," 대한 전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 552-554, 1995
[3] S. A. Hall, R. Lane, H.-C. Wang, and A. Gareri, "Assembly of laser-fiber arrays," vol. 12, no. 10, pp. 1820-1824, Oct. 1994.
[4] See, for example, C. Strandman, L. Rosengren, H. G. A. Elderstig, and Y. Backlund, "Fabrication of 45° mirrors together with well-defined v-grooves using wet anisotropic etching of silicon," J. of Microelectromechanical Systems, vol. 4, no. 4, pp. 213-219, December 1995.
[5] R. J. Hoss and E. A. Lacy, *Fiber Optics*(2nd edn), Prentice Hall, pp. 111-116, 1993.
[6] 이욱, 금동인, 민성욱, 이병호, "레이저-광섬유 어레이간의 수신전력 근사 및 효율적 배치에 관한 연구," 제 2회 광전자 공학 학술회의 논문집, pp. 149-150, 1995
[7] L. A. Wang, J. Y. Hwang, M. S. Lin and C. D. Su, "Electrical crosstalk and optical coupling for packaging a high-speed integrated DFB laser array," Optical Fiber Communication '95 Technical Digest, San Jose, U.S.A., pp. 101-104, Feb. 1995.
[8] D. Marcuse, "Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers," J. Opt. Soc. Am., vol. 68, no. 1, pp. 103-110, Jan. 1978.
[9] S. I. Najafi, "Attachment of optical fiber to integrated optical devices," Integrated Optics and Optoelectronics, SPIE Critical Reviews, vol. CR45, pp. 358-368.
[10] J. M. Senior, *Optical Fiber Communication*(2nd edn), Prentice Hall, pp. 212-226, 1992.
[11] R. P. Ratowsky, L. Yang, R. J. Deri, J. S. Kallman, and G. Trott, "Ball lens reflections by direct solution of Maxwell's equations," Optics Letters, vol. 20, no. 20, pp. 2048-2050, Oct. 1995.

저 자 소 개

金 聖 哲(正會員)

1970년 5월 15일생. 1994년 2월 서울대학교 전기공학과 공학석사. 현재 서울대학교 전기공학부 박사과정. 주관심 분야는 광결합, 광섬유 지연선로 등임.

李 旭(正會員) 第 33卷 A編 第 7號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 석사과정

李 竝 浩(正會員) 第 33卷 A編 第 7號 參照.

현재 서울대학교 전기공학부 조교수

鄭 智 采(正會員)

1980년 2월 고려대학교 전자공학 공학사. 1982년 2월 한국과학기술원 공학석사. 1988년 5월 Canegie Mellon 전자공학 박사. 1988년 6월 ~ 1993년 8월 AT&T Bell Labs. 연구원. 1993년 9월 ~ 1995년 2월 포항공대 전자전기공학과 조교수. 현재 고려대학교 전 파공학과 부교수.

Δ 가 증가(parasitic coupling이 증가)함에 따라서 \otimes 상태와 \ominus 상태의 만나는 점의 (x, y) 가 원점방향으로 선형적으로 작아지고 있음을 알 수 있다.

Δ 가 작은 값을 갖는 경우 식 (35), (36)은 다음의 간결한 식으로 대체될 수 있다.

$$\otimes: x = 0, y = 1 - \Delta \quad (37)$$

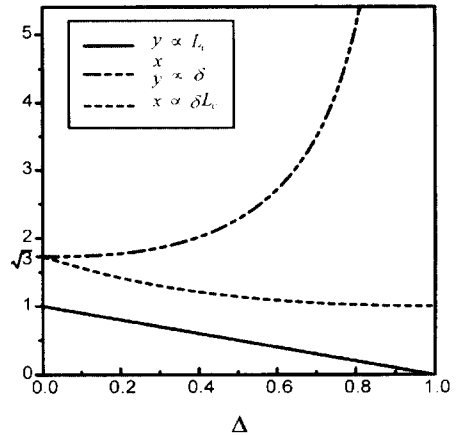
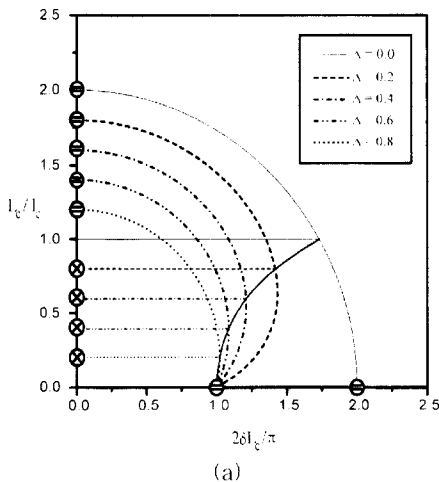
$$\ominus: x = \sqrt{3}(1-\Delta), y = (1-\Delta) \quad (38)$$

$y = 1 - \Delta, y = x/\sqrt{3}$ 을 식 (36)에 대입하고 Taylor 급수를 전개하면 좌변=우변이 성립함을 알 수 있다. Δ 가 작은 값을 가질 경우 \otimes 상태와 \ominus 상태의 해는 식 (37), (38)로부터 가능하다.

요약하면 bending 각도가 작아질수록 parasitic coupling의 양이 많아지며 따라서 보정치 Δ 는 커진다. 식 (37), (38)로부터 Δ 가 커지면 주결합부의 길이 L_c 는 작아지나, 인가전압 δ 는 보정치와 거의 동일한 값을 갖게 된다. 그 이유는 그림 7에서 보는 바와 같이 L_c/l_c 와 $2\delta L_c/\pi$ 이 $y = x/\sqrt{3} (\delta = \sqrt{3}\kappa_0)$ 의 slope로 동시에 줄어들고 있기 때문이며, 따라서 인가전압과 관련된 parameter δ 는 Δ 에 관계없이 거의 상수를 유지하게 된다.

2. Strong Parasitic Coupling

그림 8(a)에는 몇 개의 strong parasitic coupling에 대한 switching curve가 그려져 있다. Weak parasitic coupling의 경우와 달리 \otimes 상태와 \ominus 상태의 만나는 점 즉, switching state는 $(1, 0)$ 를 향하여 curve를 그리고 있다.



(b)

그림 8. Strong Parasitic Coupling 경우 스위칭 다이어그램(n=0) (a) 정규화 보정치 Δ 의 변화에 따른 \otimes 및 \ominus 상태의 변화 (b) Δ 에 따른 x, y 및 (x/y) 의 변화

Fig. 8. Switching diagram for strong parasitic coupling (a) The \otimes and \ominus states with a parameter of Δ (b) x, y and (x/y) as a function of Δ .

그림 8(b)에는 Δ 에 따른 x, y 및 (x/y) 의 변화가 그려져 있다. 정의에 의하여 L_c 와 δ 가 각각 y 와 (x/y) 에 비례하므로, 정규화 보정치 Δ 에 따라 주결합길이 L_c 와 정규화 전압 δ 가 어떻게 변화하는가를 관찰할 수 있다.

IV. 결론

방향성 결합기 광 스위치의 입/출력부에서 존재하는 parasitic coupling의 영향을 고려한 스위칭 조건을 해석하였다. Coupled mode 방정식을 기초로 하여 입/출력 관계를 전달행렬을 통하여 표현하였다. 해석은 입/출력부의 bent point에서 radiation loss가 없다는 가정 하에 수행되었다. 입/출력부의 parasitic coupling의 영향을 무시한 종전의 광 결합길이 l_c 는 bending 각도, 또는 기생 coupling의 양에 따라 보정되어야 함을 밝혔다. 광 결합길이의 정규화 보정치 Δ 를 정의한 후, Δ 의 변화에 따른 스위칭 조건을 유도하였다.

Bending 각도 $\theta/2$ 가 작아질수록 parasitic coupling의 양은 많아지며 보정치 Δ 는 커진다. Δ 를 parameter로 하여 \otimes 상태와 \ominus 상태의 변화하는 모

습을 추적하였다. i) Weak parasitic coupling의 경우 Δ 가 커짐에 따라 결합부의 길이 L_c 는 l_c 로부터 비례적으로 작아져야 하나, 인가전압 관련 parameter δ 는 Δ 에 관계없이 보정전과 거의 동일한 값을 유지해야 함을 알 수 있었다. ii) Strong parasitic coupling의 경우에는 Δ 가 커짐에 따라 L_c 는 비례적으로 작아지며, δ 는 예상대로 증가함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] H. Kogelnik and R. V. Schmidt, "Switched directional couplers with alternating $\Delta\beta$," *IEEE J. Quantum Electron.* vol. QE-12, pp. 396-401, 1976.
 [2] W. K. Burns, A. F. Milton, A. B. Lee, and E. J. West, "Optical modal evolution 3-dB coupler," *Applied Opt.*, vol 15, pp. 1053-1065, 1976.
 [3] Talal Findakly and Chin-Lin Chen, "Optical directional couplers with variable spacing,"

Applied Opt., vol. 17, no. 5, pp. 769-773, March, 1978.

[4] R. C. Alferness and P. S. Cross, "Filter Characteristics of Codirectionally Coupled Waveguides with Weighted Coupling," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-14, pp. 843-847, 1978.
 [5] Paul Pedersen and J. L. Nightingale, "Simplified Method of Calculating Power Transfer between Nonparallel Dielectric Waveguides," *Applied Opt.*, vol. 28, pp. 984-986, 1 March 1989.
 [6] A. Hardy, M. Osinski, and W. Streifer, "Application of coupled-mode theory to nearly parallel waveguide systems," *Electron. Lett.*, vol. 22, 1249-1250, 1986.
 [7] H. Nishihara et al, *Optical Integrated Circuits*, Ch. 3, McGraw-Hill, 1989.
 [8] Amnon Yarive, *Optical Electronics*, Ch. 13, Saunders College Publishing, 1991.

저 자 소 개



金東珏(正會員)

1972년 9월 20일생. 1995년 서울시립대학교 전자공학과 졸업. 1995년 3월 ~ 현재 동 대학원 전자공학과 석사과정 재학중. 주관심분야는 도파/집적광학, 광섬유, FDM, FEM, BPM 등 수치해석 등임

金昌敏(正會員)

1950년 4월 10일생. 1975년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사. 1982년 2월 동 대학원 전자공학과 공학석사. 1989년 8월 U. of Florida Dept. of EE 공학박사. 1983년 5월 ~ 현재 서울시립대학교 전자전기공학부 부교수. 주관심분야는 도파/집적광학, 진행파전극/고속 광변조기, 저분산 광섬유, 광통신 시스템, FDM, FEM, BPM, SOR 등 수치해석 등임

論文 97-34D-1-8

하나의 GRIN Rod Lens를 이용한 효율적 병렬 광연결

(An Effective Parallel Optical Interconnection using Single GRIN Rod Lens)

金聖哲*, 李旭*, 李竝浩*, 鄭智采**

(Sung-Chul Kim, Wook Lee, Byoungho Lee, and Ji Chai Jeong)

요 약

병렬 광연결 구조에서 하나의 GRIN(graded-index) rod lens를 사용하여 working distance의 증대와 병렬 연결의 용이성을 기하는 방법의 가능성을 연구하였다. 본 논문에서 제시하는 하나의 GRIN rod lens를 사용하는 병렬 광연결 방법은 상대적으로 정렬오차에 덜 민감하다. 본 논문에서는 실험의 편의상 이방법을 이용해 4-채널(channel) 광섬유 어레이간의 병렬 광연결을 테스트 하였고, 이를 직접결합(butt-coupling) 및 ball 렌즈를 사용한 방법과 비교함으로써 레이저 다이오드 어레이와 광섬유간의 병렬 연결에 효과적으로 사용될 수 있는 가능성을 보여주었다.

Abstract

We proved the feasibility of a parallel optical interconnection technique using single GRIN (graded-index) rod lens as an intermediate coupling device, which increases the working distance and makes packaging easy. The proposed technique shows relatively less dependency on misalignments. In this paper, for convenience of experiments, we applied this method to 4-channel coupling between two fiber arrays, and compared it with butt-coupling and the method of using ball lens. The comparison shows the feasibility of adopting the proposed method to the parallel interconnection between a laser diode array and an optical fiber array.

I. 서 론

일반적으로 레이저 다이오드(laser diode:LD)와 광섬유간의 연결에서, 일대일 연결일 때는 다양한 방법으로 광연결 효율을 높일 수 있다^[1,2]. 그러나 어레이(array)로 된 LD와 광섬유간의 병렬 연결에서는 어떠한 쌍의 LD-광섬유 결합 효율만을 최대로 하는 것이

아니라 모든 쌍들간에 결합 효율이 높으면서도 고른 값을 갖도록 시스템을 구성하여야 한다. 일반적으로 LD와 광섬유 연결방법은 다음의 두가지 분류법으로 구분할 수 있다^[3]. 첫번째로 개개(piece by piece)결합 방법과 이에 대응하는 batch 방법이 있는데, 개개 결합 방법은 각각의 광섬유를 독립적으로 LD에 결합시킨 다음 어레이 모듈로 패키징을 하는 방법이다. 이 방법은 결합 효율은 극대화 할 수 있으나 시간과 비용이 많이 들어 대량생산에는 적합하지 않다. 이에 비해 batch 방법은 LD 어레이를 사용하고 또한 광섬유를 실리콘 V 홈에^[4] 동일한 간격과 높이로 정렬, 고정시켜 이를 LD 어레이와 직접 연결하는 것이다. 둘째 분류법으로 능동(active) 방법과 수동(passive) 방법이 있다. 능동 방법은 LD를 구동시켜 광섬유에 빛을 넣어

* 正會員, 서울대학교 電氣工學部
(School of Electrical Eng., Seoul National Univ.)

** 正會員, 高麗대학교 電波工學科
(Dept. of Radio Eng., Korea Univ.)

※ 본 연구는 서울대 반도체 공동연구소를 통해 학술진흥 재단으로부터 지원받은 것임(ISRC 95-E-3208).
接受日字:1996年7月26日, 수정완료일:1997年1月14日

광검출기로 빛의 세기를 측정하면서 가장 많은 빛이 결합되는 위치를 찾아서 연결하는 방법이고, 수동 방법은 LD를 구동하지 않고 고정 구조물(fixture)과 현미경을 사용하여 LD 어레이와 광섬유 어레이를 정렬하여 연결하는 방법이다.

본 논문에서는 batch 및 능동방법의 하나를 다루고자 한다. 광부품의 수를 줄일 수 있는 가장 좋은 방법은 직접결합(butt coupling)이지만, 이는 working distance가 작고 정렬오차(misalignment)에 민감하다. Working distance를 늘리고 정렬오차에 대한 tolerance를 높으려면 LD와 광섬유 사이의 거리를 띄워야 하지만, 이는 결합효율을 떨어뜨린다^[5,6]. Ball 렌즈를 사용하는 방법은 각각의 ball 렌즈를 따로 정렬시켜야 하므로 LD-광섬유 어레이의 결합방법으로는 적합하지 않다. 최근에 하나의 광섬유를 식각하여 이를 병렬 광연결을 위한 렌즈로 사용하는 아이디어가 제안되었다^[7]. 본 논문에서는 쉽게 구할 수 있는 GRIN rod 한 개를 렌즈로 사용하여 4-채널(channel) 병렬 광연결을 구현하기 위한 실험적 연구를 다루고자 한다. 큰 출력을 갖는 패키지(package)되지 않은 LD 어레이를 구할 수 없어 광섬유 어레이와 광섬유 어레이간의 연결에 대해 실험을 하여 그 가능성을 확인하였다. 250 μm 의 간격을 갖는 실리콘 V 홈을 제작하여 여기에 단일 모드 광섬유를 에폭시로 고정을 시켜 광섬유 어레이를 만들었고 LD를 대신할 송신단으로는 같은 간격의 실리콘 V 홈 위에 고정된 다중 모드 광섬유를 사용하였다. 이렇게 한 이유는 송신단의 다중 모드광섬유에서 나오는 빛의 기본 모드를 LD의 출력 모드처럼 Gaussian^[8]으로 볼 수 있고 또한 빛의 확산 각도가 단일 모드 광섬유에서 나오는 빛보다 LD와 비슷하기 때문이다.

II. 실험

광섬유 어레이간의 병렬 연결 실험은 직접결합, ball 렌즈를 사용한 결합, GRIN rod 렌즈를 사용한 결합의 세가지 방법으로 행해졌다. 그림 1은 이중 셋째 방법에 대한 실험 장치를 보여 준다. 첫째와 둘째 방법에 대한 실험도 비슷한 방법으로 수행되었다. 각 경우에 대해 결합효율을 측정하였고, 또한 그림 1에 표시된 각 방향의 정렬 오차에 대한 결합 효율을 측정하였다. 여기에 사용된 광섬유는 코어의 직경이 50 μm , N.A.(numerical

aperture)가 0.2, 굴절률의 분포가 포물선 프로파일(profile)을 갖는 다중모드 광섬유와 코어의 직경이 9.3 μm , N.A.가 0.11, 굴절률이 계단형인 단일모드 광섬유이다. 실험 방법은 다음과 같다. 그림 2와 같이 250 μm 간격의 실리콘 V 홈을 제작하여 그위에 4개의 광섬유를 에폭시로 고정을 시켜 4 채널 광섬유 어레이를 만들었고 이 어레이를 xyz-스테이지(stage)에 고정을 시켜서 그림 1과 같이 LD를 대신한 빛을 내는 스테이지와 빛을 접속하는 스테이지를 만들었다^[3,9]. 광원으로는 실험의 편의상 He-Ne 레이저에서 나오는 적색광(633nm)을 사용하였다. 수신단에서는 광검출기를 사용하여 출력파워를 측정하였다. 결합효율은 송신단에서 나오는 빛의 파워에 대한 수신단에서 나오는 빛의 파워의 비율로 계산을 하였다.

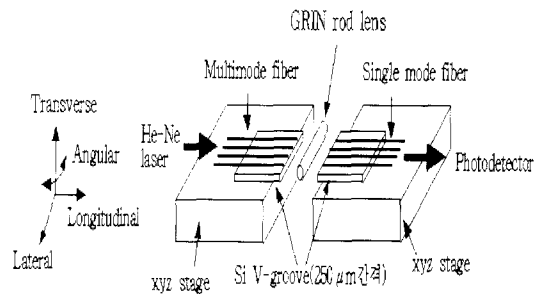


그림 1. GRIN rod 렌즈를 사용한 광섬유 병렬 연결의 시스템 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of coupling between fiber arrays using a GRIN rod lens.



그림 2. 실리콘 V 홈에 고정된 광섬유
Fig. 2. Optical fibers fixed on Si V-grooves.

실험의 세가지 방법 중 첫 번째는 직접결합으로 광섬유 어레이와 어레이를 단순히 붙여서 실험을 한 것이다. 이 방법은 간편하나 정렬 오차에 매우 민감하다는 단점이 있다. 특히 정렬 축에 수직인 방향의 정렬오차에 매우 민감하고 또한 working distance가 작기

때문에 매우 정밀한 정렬 장치가 필요하다. 다음의 식은 정렬 오차가 없다고 가정했을 때, 광섬유 코어의 직경 및 N.A.가 서로 다를 경우에 대한 결합 손실에 관해 대략적으로 계산하는 식이다^[10].

$$Loss = -10 \log \frac{(a_2 NA_2)^2 (a_1 + 2) a_2}{(a_1 NA_1)^2 (a_2 + 2) a_1} \text{ dB}, \quad (1)$$

$$a_2 < a_1, NA_2 < NA_1$$

여기에서 a_1, a_2 는 각각 송신단과 수신단 광섬유의 코어의 지름이며, a_1, a_2 는 각각의 굴절률 프로파일로, 그 값은 계단형 굴절률에 대해서는 무한대이고 포물선형 굴절률에 대하여는 2이다. 식 (1)로 계산한 결과 손실은 16.8dB이었다. 그러나, 실제 실험에서는 약 13dB였다. 이렇게 차이가 나는 이유는 식 (1)이 광섬유 안에 존재하는 모드를 고려하지 않고 단순히 기하광학적인 방법을 사용하여 유도한 식이기 때문이다. 보다 정확한 계산은 두 개의 광섬유의 모드간의 상관관계를 고려한 계산법으로 얻을 수 있을 것이다^[16].

두번째 방법은 광섬유 어레이와 어레이 사이에 ball 렌즈를 사용한 것이다. 이 방법은 첫번째에 비해 빛을 모으기 때문에 결합 효율의 향상을 기할 수 있다. 그러나 ball 렌즈를 어레이로 제작하는 것이 어렵고 각각의 ball 렌즈가 제대로 정렬이 되지 않으면 이 방법은 의미가 없게 된다. Ball 렌즈를 사용했을 때의 또 다른 문제는 반사, 또는 산란되는 빛의 양이다^[11]. Ball 렌즈가 이상적인 구의 형태이며 내부에서의 산란이 없다고 가정 했을 때의 반사율이 계산 결과 약 2.5% 이었다. 이 계산은 Gaussian 빔 프로파일에 따라 ray의 밀도 분포를 가정하고 각각의 ray에 대해 Fresnel 반사율을 고려하여 수행한 것이다. 그러나 실제 실험에서는 약 25%정도가 반사되거나 산란되었다. 이러한 이유는 여기에 사용된 렌즈의 내부가 균일하지 않아 렌즈 내부에서 산란이 되는 양이 많기 때문이다. 사용된 ball 렌즈의 재질은 폴리스티렌이고 굴절률은 1.59, 직경은 200 μm 이다. 그림 3은 ball 렌즈의 초점거리 및 초점의 폭(depth of focus)에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과에 의하면 초점의 폭이 약 50 μm 정도이다.

세번째 방법은 GRIN rod 렌즈를 사용하는 것이다. 이는 앞의 그림 1에서처럼 광섬유 어레이와 어레이 사이에 렌즈를 위치시켜 한꺼번에 4개의 병렬연결을 가능케 하는 것이다. 이 방법의 장점은 앞의 두가지 방

법에 비해서 정렬이 간편하고 working distance가 커서 'batch 및 능동' 방법에 적합하다는 것이다. 또한 실험을 통해서 이 방법은 정렬 오차에 다소 덜 민감하다는 것을 확인할 수 있었다.

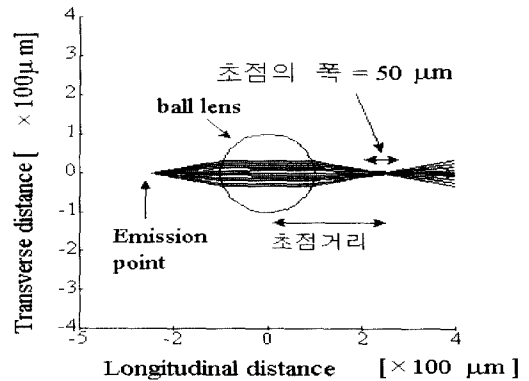


그림 3. Ball 렌즈의 초점거리 및 초점의 폭에 대한 시뮬레이션
Fig. 3. Simulation of focal length and depth for a ball lens.

그러나 이 방법은 crosstalk가 존재한다는 단점을 갖고 있다. GRIN rod 렌즈의 특성상 수직(transverse) 방향(그림 1 참고)에 대해서는 빛을 모으지만, 수평(lateral) 방향에 대해서는 렌즈의 역할을 하지 못하기 때문에 빛이 퍼지게 된다. 이로 인해 옆에 있는 광섬유에 빛이 들어가는 crosstalk가 생기게 된다. 실험으로 측정된 crosstalk는 약 9.2 dB 였다. 이 방법이 레이저 다이오드 어레이에 적용이 된다면 이렇게 큰 crosstalk가 생기지는 않을 것이다. 그림 4에서 보듯이 레이저 다이오드에서 나오는 빔의 모양이 광섬유의 것과 다르고 또한 수평 방향으로는 빛의 퍼짐 각도가 약 1° 정도로 매우 작으므로 crosstalk가 무시할만할 것이라고 예상할 수 있다. 실험에 사용된 GRIN rod 렌즈는 Newport 제품이고 직경은 2000 μm 이며, 굴절률은 다음과 같다.

$$n = n_0 \left(1 - \frac{A r^2}{2} \right) \quad (2)$$

여기에서 r 은 GRIN rod 렌즈의 축으로부터의 거리이며, $n_0=1.6038, A=0.0094$ 이다.

그림 5는 GRIN rod 렌즈의 초점거리 및 초점의 폭에 대한 시뮬레이션을 보여준다.

그림 6, 7, 8은 그림 1의 세 방향(transverse, lon

gitudinal, angular)의 정렬오차에 대한 결합효율을 측정
 한 결과이다. 세가지 방법에 대한 실험 결과를 보여
 주고 있다. 그림 6(a)에서 직접결합의 경우가 최대 결
 합효율을 나타냄을 볼 수 있다. 그러나, 같은 정도의
 수직 방향으로의 정렬 오차에 대해, 그 경우의 결합효
 율의 최대 결합효율에 대한 비율은GRIN rod 렌즈의
 경우가 직접의 경우보다 떨어지지 않는다(그림 6(b)).

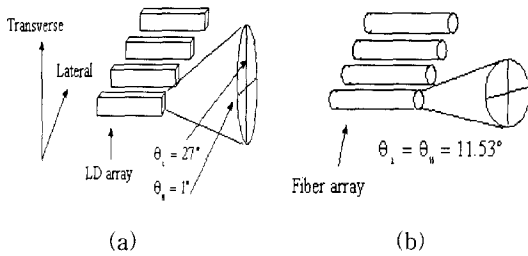


그림 4. 전형적인 LD와 실험에 사용된 광섬유에서 나
 오는 빔의 형태

Fig. 4. Beam shapes from (a) a typical LD and
 (b) the optical fiber used in the exper-
 iment.

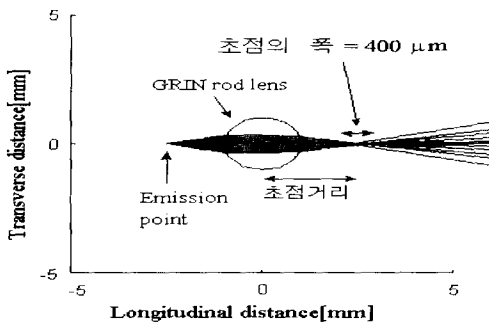


그림 5. GRIN rod 렌즈의 초점 거리 및 초점의 폭
 에 대한 시뮬레이션

Fig. 5. Simulation of focal length and depth for
 a GRIN rod lens.

그림 7은 송신단의 광섬유와 수신단의 광섬유의 거리
 에 따른 결합효율의 변화를 보여준다. 직접은 두 광섬
 유간의 간격이 0일 때 결합효율이 최대이며 간격이 증
 가함에 따라 결합효율은 감소한다. Ball 렌즈를 사용하
 였을 경우는 간격이 400 μm의 위치에서 결합효율이
 최대가 된다. 이는 초점의 위치를 나타낸다. GRIN rod
 를 이용하였을 경우는 그 간격이 약 5mm까지 증가함
 을 볼 수 있다. 이는 상대적으로 수월한 정렬을 가능하
 게 한다. 그림 7에서 GRIN rod 렌즈의 경우에 최대치

가 두 군데인 이유는 그림 5에서 초점 거리의 폭이 매
 우 넓기 때문이다. 그림 8은 그림 1에 표시한 각도의
 정렬오차에 대한 결합 효율의 변화를 보여준다. 그림
 8(b)에서 GRIN rod 렌즈를 사용한 방법은 각도의 오
 차에 대해 다른 방법들에 비해 상대적으로 민감하지
 않음을 볼 수 있다. GRIN rod 렌즈와 ball 렌즈를 사
 용했을 때 결합효율이 높지 않은 이유는 사용한 렌즈
 가 광결합용으로 제작된 것이 아니어서 내부산란이 나
 타나기 때문이다.

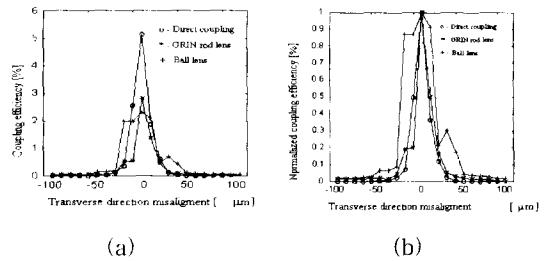


그림 6. Transverse 방향의 정렬 오차에 대한 결합효
 율 (a) 결합효율 (b) 각 경우의 최대 결합효율
 에 대해 규격화한 그래프

Fig. 6. Coupling efficiency versus transverse
 direction misalignment.
 (a) Coupling efficiency (b) Coupling effi-
 ciency normalized to the maximum
 value in each case.

III. 결 론

이상에서 직접결합, ball 렌즈를 이용한 결합, 하나의
 GRIN rod 렌즈를 이용한 결합 방법에 의해 병렬 광결
 합을 하기위한 기본적 실험에 대해 기술하였다. 직접결
 합은 결합효율은 최대로 만들 수 있으나 정렬이 어렵
 고 상대적인 결합효율이 정렬오차에 민감하다. Ball 렌
 즈를 이용한 결합은 직접결합보다 working distance
 가 크지만, 각각의 ball 렌즈를 따로 정렬시켜야 하는
 어려움이 있다. 본 논문에서 살펴본 하나의 GRIN rod
 렌즈를 이용하는 방법은 working distance가 크며 각
 도의 정렬오차에 대한 결합효율의 상대적 변화가 직접
 결합에 비해 작다는 장점이 있다. 한 개의 GRIN rod
 렌즈를 사용하므로 ball 렌즈를 사용한 병렬 광연결보
 다 packaging이 훨씬 수월하다. 실제로 LD를 사용한
 다면, crosstalk는 본 논문의 경우보다 크게 감소할 것
 이다. 이는 일반적으로 제작되는 LD의 경우 출력 빔
 (beam)의 형태가 본문의 그림 4처럼 수평 방향으로는

퍼지는 각도가 작기 때문이다.

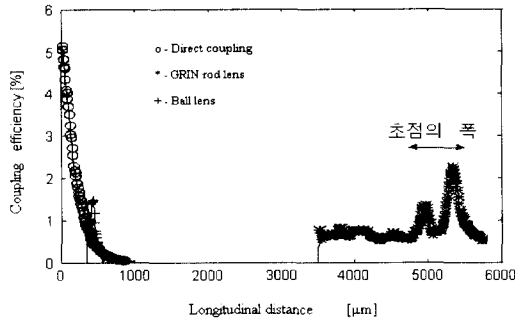


그림 7. Longitudinal 방향의 정렬 오차에 대한 결합효율
Fig. 7. Coupling efficiency versus longitudinal direction misalignment.

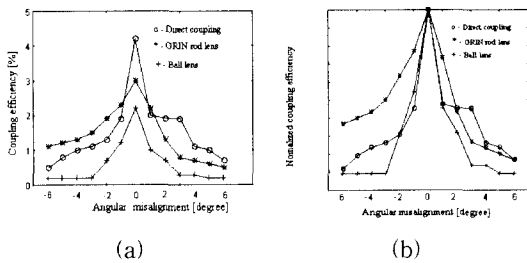


그림 8. Angular 방향의 정렬 오차에 대한 결합효율
(a) 결합효율 (b) 각 경우의 최대 결합효율에 대해 규격화한 그래프
Fig. 8. Coupling efficiency versus angular misalignment.
(a) Coupling efficiency (b) Coupling efficiency normalized to themaximum value in each case

참 고 문 헌

[1] K. Shiraishi, I. Ohishi and S. Suga, "A fiber lens with a long working distance for integrated coupling between laser diodes and single-mode fibers," J. of Lightwave Technology, vol. 13, no. 8., pp. 1736-1744, Aug. 1995.
[2] 강승규, 송민규, 장동훈, 편광의, "레이저 웰딩 기술을 이용한 고속 광통신용 송신 모듈 제작 및

특성 연구," 대한 전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 552-554, 1995
[3] S. A. Hall, R. Lane, H.-C. Wang, and A. Gareri, "Assembly of laser-fiber arrays," vol. 12, no. 10, pp. 1820-1894, Oct. 1994.
[4] See, for example, C. Strandman, L. Rosengren, H. G. A. Elderstig, and Y. Backlund, "Fabrication of 45° mirrors together with well-defined v-grooves using wet anisotropic etching of silicon," J. of Microelectromechanical Systems, vol. 4, no. 4, pp. 213-219, December 1995.
[5] R. J. Hoss and E. A. Lacy, *Fiber Optics*(2nd edn), Prentice Hall, pp. 111-116, 1993.
[6] 이옥, 금동인, 민성욱, 이병호, "레이저-광섬유 어레이간의 수신전력 근사 및 효율적 배치에 관한 연구," 제 2회 광전자 공학 학술회의 논문집, pp. 149-150, 1995
[7] L. A. Wang, J. Y. Hwang, M. S. Lin and C. D. Su, "Electrical crosstalk and optical coupling for packaging a high-speed integrated DFB laser array," Optical Fiber Communication '95 Technical Digest, San Jose, U.S.A., pp. 101-104, Feb. 1995.
[8] D. Marcuse, "Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers," J. Opt. Soc. Am., vol. 68, no. 1, pp. 103-110, Jan. 1978.
[9] S. I. Najafi, "Attachment of optical fiber to integrated optical devices," Integrated Optics and Optoelectronics, SPIE Critical Reviews, vol. CR45, pp. 358-368.
[10] J. M. Senior, *Optical Fiber Communication*(2nd edn), Prentice Hall, pp. 212-226, 1992.
[11] R. P. Ratowsky, L. Yang, R. J. Deri, J. S. Kallman, and G. Trott, "Ball lens reflections by direct solution of Maxwell's equations," Optics Letters, vol. 20, no. 20, pp. 2048-2050, Oct. 1995.

저 자 소 개

金 聖 哲(正會員)

1970년 5월 15일생. 1994년 2월 서울대학교 전기공학과 공학석사. 현재 서울대학교 전기공학부 박사과정. 주관심 분야는 광결합, 광섬유 지연선로 등임.

李 旭(正會員) 第 33卷 A編 第 7號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 석사과정

李 竝 浩(正會員) 第 33卷 A編 第 7號 參照.

현재 서울대학교 전기공학부 조교수

鄭 智 采(正會員)

1980년 2월 고려대학교 전자공학 공학사. 1982년 2월 한국과학기술원 공학석사. 1988년 5월 Canegie Mellon 전자공학 박사. 1988년 6월 ~ 1993년 8월 AT&T Bell Labs. 연구원. 1993년 9월 ~ 1995년 2월 포항공대 전자전기공학과 조교수. 현재 고려대학교 전 파공학과 부교수.