

Beam-Combining Technology와 그 응용

Beam-Combining Technology and Its Applications

권진혁

영남대학교 물리학과

여러 개의 레이저빔을 결합하는 대표적인 방법의 장단점을 비교 분석하였다. incoherent 방법으로는 wavelength multiplexing, spatial multiplexing, polarization multiplexing을 분석하였고 coherent 방법으로는 binary phase grating과 traveling-wave amplification을 고려했다. 특히 고출력 laser diode array를 이용한 대출력 증폭기 시스템을 분석하였다.

1. 서론

레이저의 사용이 산업화되고 또 우주에서의 대출력 레이저빔이 필요해짐에 따라 단일의 레이저로서는 그 출력을 감당하지 못하여 여러개의 레이저를 결합하여 대출력을 얻을 필요가 증가하고 있다. 특히, 최근의 고출력 반도체 레이저의 발전은 많은 새로운 응용분야를 개척하였다(1,2). 지금까지 반도체 레이저의 빔결합은 주로 space communication에 필요한 출력을 얻기 위해서 수행되었으나, 최근 연속 5W이상의 반도체 레이저 어레이(laser diode array: LDA)가 개발되어 space communication에서는 하나의 레이저로 가능하게 되었다. 그리고 반도체 레이저의 특성-소형, 경량, 높은 효율, 간단한 전기적 발진 등-에 의해서 특별히 space power transmission에 매우 적합하다. KrF, 구리 증기, laser diode array, CO₂ 레이저를 모두 연속 1MW수준에서 평가한 결과, 효율과 무게 면에서 laser diode array 시스템이 가장 우수한 것으로 나타났다

(3). 그러나 여러개의 요소 레이저를 상호 결합할 때 가장 문제 되는 것이 위상 일치(phase matching)와 결합된 빔의 품질이다.

이 연구에서는 몇가지 대표적인 빔결합 기술을 비교하여 그 장단점과 한계를 밝히고 고출력 반도체 레이저를 이용한 빔결합의 가능성을 조사하였다.

기본적으로 빔결합 기술은 크게 두가지 그룹으로 나눌 수가 있다. 하나는 비간섭적(incoherent)이고 다른 것은 간섭적(coherent)이다. 비간섭적 방법은 위상 일치(phase matching)가 필요 없기 때문에 수행하기가 직접적이고 쉬운 반면 결합된 빔의 발산각이 크고 규모를 크게하는데 제한이 따른다. 간섭적 방법은 위상 일치를 시키기가 어려운 반면에 결합된 빔의 품질이 뛰어나고 대규모로 확장할 수 있다는 장점이 있다. space power transmission의 경우 1000km이상의 거리에서 연속 1MW 이상의 출력을 전송해야 하므로 간섭적

빔결합이 가장 가능한 방법이다.

2. 대표적인 빔결합 방법

지금까지 여러가지의 빔결합 방법이 제시되었다(4-7). 여기서 대표적인 몇가지를 비교 검토해 본다.

Incoherent Beam-Combining Methods

비간섭적 방법은 파장분할을 이용하는 wavelength multiplexing 법, 공간 분할을 이용하는 spatial multiplexing 방법, 편극을 이용하는 polarization multiplexing 방법, 그리고 시간을 분할하는 방법으로 나눌수가 있다. 여기서 연속 레이저의 경우 시간 분할은 불가능하므로 파장 분할과 공간분할 그리고 편극분할의 3가지만 유효하다.

A. Wavelength Multiplexing

Fig.1 은 파장 분할을 이용한 빔결합 방법의 개념도이다(4). 반도체레이저의 경우 발진 파장을 이득 대역폭 내에서(100nm정도) 다르게 제작이 가능하기 때문에 이것이 가능하다. 발진 대역폭이 좁은 Nd:YAG와 같은 레이저의 경우 이 방법은 불가능하다. Fig. 1(a)에서 n번째의 band pass filter는 n번째의 레이저빔만 투과하고 나머지는 반사한다. Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 서로 2nm 간격의 다른 주파수 투과대역을 갖는 band pass filter를 사용하여 최대한 50개 가량의 레이저를 결합하는 것이 가능하다.

이 시스템은 간단하며 bandpass filter의 성능에 시스템의 효율이 달려있다. 결합되는 레이저의 수가 증가할수록 정렬이 어려워진다. 이 방법은 나중에 간섭적 방법을 이용한 빔결합시스템과 혼합되어 혼합형 빔결합에 사용될 수가 있다.

B. Spatial Multiplexing

Fig. 2는 far field에서 회절효과로 인한 빔의 퍼짐을 이용하여 결합하는 것을 보여주고 있다(8). 개개의 레이저 빔이 망원경의 주 렌즈의 각각 다른 부분을 이용하여 평행광이 되고 나란히 진행한다. 수 km이상의 충분히 먼 거리에서 각 빔은 직경 수10m이상으로

회절되어 퍼지며 그곳에서 공간적으로 하나의 빔으로 모아지는 효과가 나타난다. 이 방법도 기술적으로 어려움이 없으며 space communication에 있어서는 적합한 방법이라 볼 수 있다. 다만 개개의 레이저를 동시에 modulation하여 동일한 신호를 발생시키는데 어려움이 따를 가능성이 있다. 결합할 수 있는 빔의 수는 망원경의 거울의 면적을 개개의 레이저 빔의 면적으로 나눈 값이 된다.

C. Polarization Multiplexing

Polarizing beam splitter(PBS)를 이용하여 두개의 수직으로 편광된 빔을 매우 효율적으로 결합할 수가 있다. 이 방법은 매우 단순하고 효율적이지만 단지 2개의 빔만을 결합할 수가 있다는 단점이 있다.

Coherent Beam-Combining Methods

A. Common External Cavity

Fig. 3는 공통의 외부 공명기를 사용한 빔결합의 개요이다(9). 출력경은 모든 레이저가 공유하고 후방 거울은 각각의 레이저가 따로 소유한다. 공명기 내의 공간 필터에 의해서 개개의 공명기가 서로 결합되어 위상이 일치하게 발진하도록 한다.

이 시스템은 코헤런트하게 빔을 결합하여 하나의 단일 레이저 빔으로서 내어보낸다. 공명기 내의 광학 부품의 크기 제한에 의해서 약 10개 이하의 레이저를 결합할때 유용하다.

B. Binary Phase Grating

Fig.4는 binary phase grating을 사용하여 빔결합하는 것을 보여 준다. 이 binary grating은 일반적인 sin형태의 holographic grating이나 sawtooth형태의 회절 격자와는 다르게 회절된 각각의 order들이 같은 크기를 갖도록 on/off 형태로 binary phase shift를 갖는다. Fig. 5는 7개의 같은 크기의 diffraction order가 나타나도록 설계된 binary grating이다. 빔결합을 위해서는 거꾸로 사용된다. 결합된 빔들은 일정한 위상관계 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N$ 의 관계를 갖도록 주어져야 한다. 이것은 각각의 빔의 위상을 조절하여 얻어질 수 있다. Veldkamp 등에 의하면 이 binary grating은 2

차원적으로 10x10의 빔을 70%이상의 결합효율을 가지고 결합될 수 있음이 실험적으로 증명되었다(10-12).

Binary phase grating은 유리판 위에 lithography 기술을 이용하여 제작될 수가 있다. 높은 효율, 단순성, 그리고 높은 에너지에 대한 내구성(damage threshold) 등에 의하여 고출력 빔 결합에 적당하다. injection-locking에 의하여 개개의 레이저를 코헤런트하게 발전시키고 출력 쪽에 위상 조절기를 부착하여 효과적으로 고출력의 빔을 결합할 수가 있다.

C. Phase Conjugation

Degenerate four-wave mixing(DFWM)에 있어서 입사 파들 사이의 상호 결합에 의해서 빔결합을 수행할 수가 있다. BaTiO₃ 결정 내에서 반도체 레이저나 색소 레이저의 coherent coupling이 실험적으로 발표되었다(Fig. 6)(13,14). 여러개의 빔이 결정 속으로 입사하면 photorefractive grating에 의해서 서로 결합된다. 그러나 결정의 damage threshold가 낮고 파장의 폭이 가시광선에 제한되어 있어서 대출력용 빔결합기로서는 제약이 따른다.

D. Traveling-Wave Amplification(TWA)

Fig. 7은 여러개의 slave laser diode를 통하여 동시에 증폭하는 개념을 보여준다. 출력 빔은 서로 코히런트하므로 binary grating과 같은 것을 사용하여 서로 결합할 수가 있다. traveling-wave amplification은 높은 출력의 diffraction-limited beam을 발생할 수 있음이 실험적으로 제시되었다(15-18). 구조에 있어서 간단한 편이며 여러단계의 증폭기들을 사용하여 scale-up하는데 편리하다.

laser diode array의 경우 TWA를 만들려면 slave laser diode내에서의 발진을 억제하여야 하므로 양면의 반사율을 거의 0.3%이하로 낮추어야 하며, 길이 200-300um의 증폭기들을 폭이 TWA와 같은 mount위에 설치하여야 하는데 여기에 많은 기술적 어려움이 따른다. TWA속으로의 coupling은 microlens array나 GRIN lens를 사용할 수가 있다. LDA의 경우 active layer가 line형태이므로 cylindrical lens를 사용할 수가 있다.

Fig. 8은 TWA를 여러 단으로 설치하여 출력을 증강시키기 위한 것이다. 각 증폭 단계의 증폭율을 G, 증

폭단 수를 n이라 하면, 최종 출력 P_o은

$$P_o = P_i G^n \dots\dots\dots(1)$$

$$n = \log_{10}(P_o/P_i)/\log_{10}G \dots\dots\dots(2)$$

으로 주어진다. 여기서 P_i은 master laser의 출력이다. 증폭기의 포화를 고려하지 않았는데, 이를 위해서 각 증폭단마다 증폭기의 수가 G배 만큼 증가하여야 한다. 그래서 모든 단에서 개개의 증폭기는 같은 세기의 입력을 받는다. LDA의 경우 증폭율이 매우 높으므로 G = 100, P_i = 1W의 경우 3단을 지나가면 1MW가 된다. G = 30일 경우 4단계가 필요하다. 최근의 보고에 의하면 G = 81(3.9mW에서 315mW)가 보고되었으므로 이 계산은 타당성이 있다 하겠다(19). Fig. 8과 9는 앞의 개념에 기초한 출력 1MW용 LDA 증폭기 시스템이다. Fig. 8은 여러개의 증폭기 계열에서 나오는 빔을 binary phase grating을 이용하여 결합하는 것이다. 이 시스템의 약점은 master laser나 증폭기의 앞단계에서 문제가 발생하면 전체 시스템이 동작할 수가 없다는 것이다. 이러한 약점을 보완한 것이 Fig. 9이다(20,21). 파장이 수 nm씩 떨어진 여러 개의 master laser를 사용하고 각각의 증폭기 계열에서 나오는 빔을 bandpass filter를 이용하여 결합한다. 이 경우 phase matching을 해야하는 수가 줄어들므로 Fig. 8의 시스템보다 조금 더 여기에 대한 부담이 줄어든다. 또한 전체 시스템의 고장의 가능성이 줄어든다.

Space power transmission의 경우 수 1000km이상의 거리를 우주 공간에서 전송해야 하므로 transmitting aperture의 크기가 커야 한다. 따라서 개개의 증폭기 계열에서 나오는 빔을 하나로 결합하지 않고 Fig. 10과 같이 평행광으로 보낼 필요가 있다. 이 때 하나하나의 빔의 분포는 y방향으로는

$$U(x,y) = U_o \exp(-y^2/b^2) \dots\dots\dots(3)$$

와 같고 x방향으로는 균일하다고 가정하여, 모든 출구에서 나오는 빔을 far field에서 coherent하게 결합한

다. incoherent한 경우는 far field에서 결합하여도 위상관계가 없으므로 세기만 더해지고 빔의 크기는 변이지만, coherent한 경우는 결합되는 빔의 수에 반 비례하여 far field에서의 spot size가 줄어든다. Fig. 11은 이렇게 결합된 beam pattern을 보여준다. 증상에 있는 Airy disk에 들어가는 출력은 요소 증폭기가 내는 빔들 사이의 평행도, 위상 오차(phase mismatch), 그리고 failure ratio등에 의존한다.

Fig. 12는 개개의 출력 빔 사이에 하나의 빔의 발산각의 5% 내에서 평행도 오차(misorientation)가 불규칙하게 분포해 있다고 보고, 위상 오차에 따른 Airy disk(PC1)와 secondary ring(PC2) 내부에 들어가는 출력의 변화를 Cray-2S supercomputer로 simulation한 결과이다. 이 그림에서 L_y 는 빔과 빔사이의 공간의 비율을 결정하는 aperture filling factor이다. $L_y = 1$ 의 경우 이웃한 두 빔이 붙어있음을 의미한다. misorientation = 0.05, $L_y = 0.95$, phase mismatch = 0.1 λ 의 조건에서 PC1 = 75%, PC2 = 80%가 된다(22).

3. 결론

몇가지 대표적인 beam-combining technology를 검토하고 이들의 장단점을 이용하여 대출력의 레이저 빔을 얻는 방법을 고려하였다. 가장 유용한 방법은 binary phase grating을 이용하는 것과 traveling-wave amplification이다. 이 둘을 함께 사용하는 것도 고려하였다. 우주 과학이나 산업계에서 점점 더 높은 출력을 요구함에 따라 단일 레이저로서는 그 출력이 제한되어 있으므로 앞으로 빔결합이 점점 필요하게 될 것이다. 특히 반도체 레이저의 경우 단일 소자 내에서 약 10 μ m 떨어진 array의 형태로 제작되어 단일 소자의 출력이 연속 10W이상 되고 injecton-locking이나 TWA를 이용하여 출력빔의 분포도 거의 diffraction-limited beam이 되어 장래가 매우 유망하다 할 것이다(23).

Coherent beam-combining의 경우 phase matching이 까다롭다. LDA의 경우 출력 빔의 위상이 drive current에 의존하므로 전류를 closed-loop로 미세하게 조절하여 위상을 조절할 수가 있다.

결합된 출력이 수 100-kW가 되면 isotope separation이나 material processing에 적용될 수가 있고, 수 100kW이상이면 laser fusion이나 space power transmission에 응용될 수가 있다.

참고 문헌

1. D.R.Scrifres, C.Lindstorm, R.D.Burnham, W. Streifer, and T.L.Pauli, Electron.Lett. **19**,169(1983).
2. A. Lasso, M. Mittelstein, T. Arakawa, and A. Yariv, Electron. Lett. **22**, 79(1985).
3. R.J.De Young, J.H.Lee, M.D.Williams, G.Schuster, E.J.Conway, NASA TM 4045, June 1988.
4. K.H.Blau, M.A.Bobb, T.L.Miller, and G.R.Collis,SPIE Vol.740 Laser Diode Optics, pp.48-52(1987).
5. R.I.Smith,SPIE Vol.756, pp.25-29(1987).
6. B.Laurent and J.L. Perbos, SPIE Vol. 756,pp.30-37(1987).
7. C. Roychoudbuty,SPIE Vol. 740, pp.66-69(1987).
8. R.F. Begley, D. Goux, D.W. Chen, and O. Giat, Appl. Opt. **21**, 3213(1986).
9. R.H. Rediker and R.P. Schloss, Appl. Phys. **11**, 303(1986).
10. W.B. Veldkamp, J.R. Leger, and G.J. Swanson, Opt. Lett. **11**, 303(1986).
11. U. Killat, G. Rabe, and W. Rave, Fiber and Integrated Optics **4**, 159-167(1982).
12. J.R. Leger, G.J. Swanson, and W.B. Veldkamp, Appl. Phys. Lett. **48**, 888-890(1986).
13. M. Cronin-Golomb, A. Yariv, and I. Ury, Appl. Phys. Lett. **48**, 1240(1986).
14. J.O. White, G.C. Valley, and R.A. McFerlane, Appl. Phys. Lett. **50**, 880-882(1987).
15. J.R. Andrews, Appl. Phys. Lett. **48**, 1331(1986).

16. J.C. Simpson, Electron. Lett. 18, 438(1982).
17. Y. Yamamoto, IEEE J. Quantum Electron. QE-16, 1047-1052(1980).
18. T. Saitoh and T. Mukai, IEEE J. Quantum Electron. QE-3, 1010-1020(1987).
19. L. Goldberg and J. F. Weller, Electron. Lett. 22, 858-859(1986).
20. J.H. Kwon, M.D. Williams, and J.H. Lee, NASA TM 101529, Sec. 1988.
21. J.H. Kwon, J.H. Lee, Proceedings of the 24th IECEC, pp.521-526, 1989.
22. J.H. Kwon, J.H. Lee, and M.D. Williams, J. Appl. Phys. 69, pp.1177-1182(1991).
23. M.Sakamoto, D.F. Welch, G.L. Harnagel, W. Streifer, H. Kung, and D.R. Scifres, Appl. Phys. Lett. 52, 27(1988).

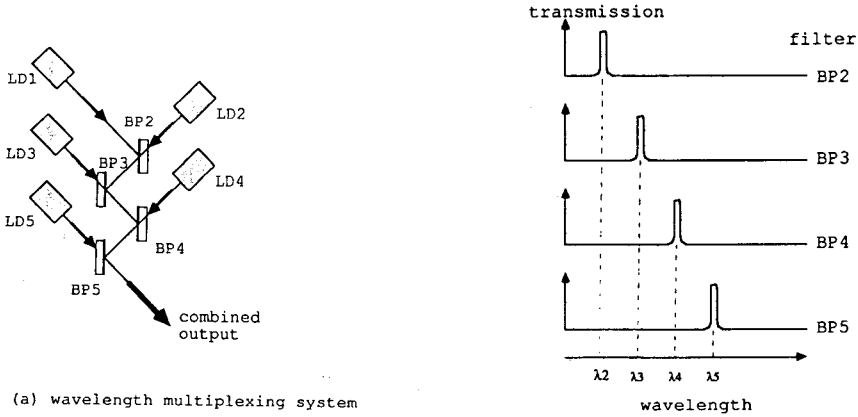


Fig. 1 (a) Wavelength multiplexing system.
(b) Bandpass filter transmission curves.

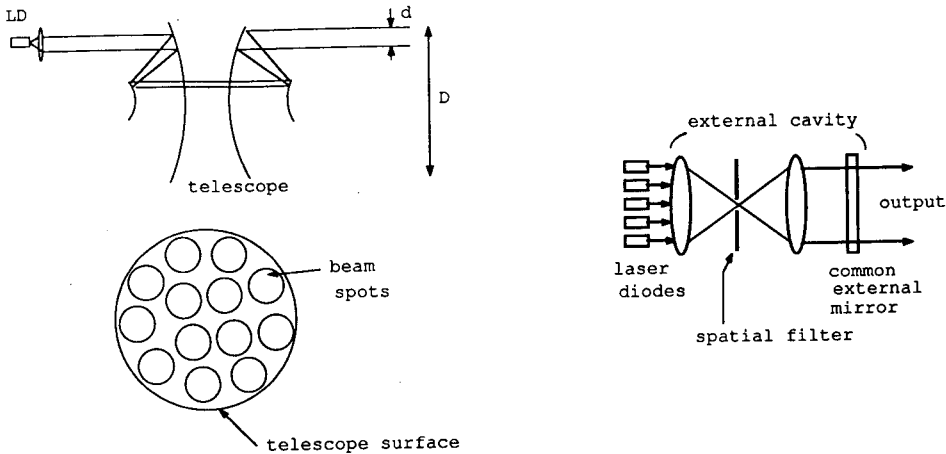


Fig. 2 Spatial multiplexing system. d: individual beam diameter, D: telescope diameter.

Fig. 3 Common cavity beam-combining system.

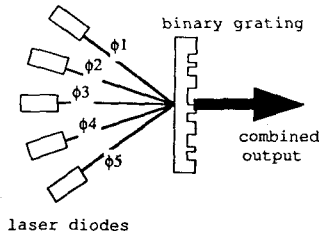


Fig. 4 Beam-combining system using the binary phase grating.

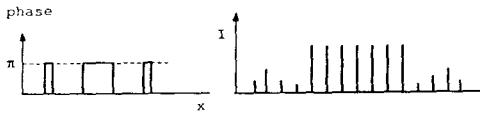


Fig. 5 (a) Typical binary grating groove shape. (b) diffracted intensity distribution.

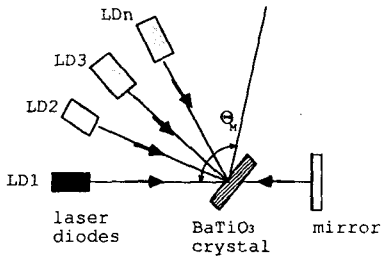


Fig. 6 Phase conjugation beam-combining system. LD : laser diodes.

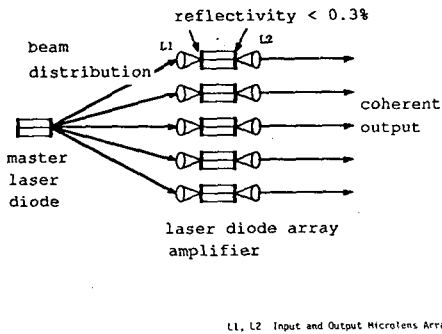


Fig. 7 Parallel amplification through laser diode array.

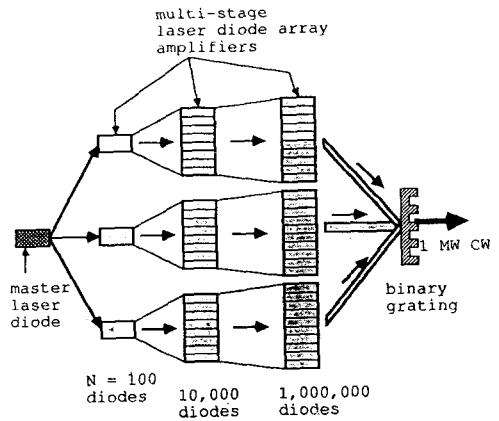


Fig. 8 Multi-stage amplification and beam combining system.

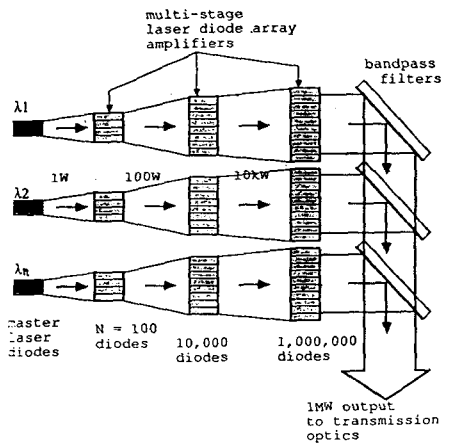


Fig. 9. Hybrid multi-stage beam-combining system.

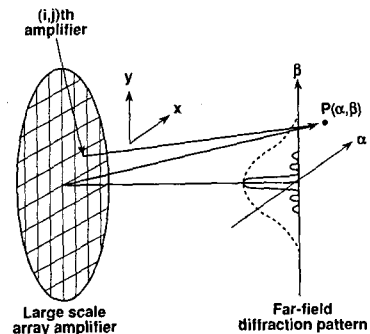


Fig. 10 Geometry of far-field diffraction of large scale amplifier array.