
루프 미러를 이용한 고 반복률 펄스 발생에 관한 연구

정찬권* · 김선엽* · 강영진*

A Study on High-Repetition Rate Optical-Pulse for Loop-Mirror

Chan-gwoun Jeoung* · Sun-youb Kim* · Young-jin Kang*

이 논문은 2005학년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행됨

요 약

본 논문은 광섬유 루프 결합기를 이용한 고반복률의 펄스 발생에 대해 연구하였다. 최근 OTDM에서, 고 반복률 광 펄스의 개발이 필요하다. 이것은 광섬유나 집적화된 도파관 지연 선로 회로들 일반적인 접근법과 차이가 있다. 고 반복률 광펄스 다중 현상은 광펄스들의 분리 폭이 사용된 결합기의 전달대역폭보다 더 클 때 발생한다. 분석으로, 출력 반복율은 서로 다른 등가 전송 대역폭인 광섬유 결합기를 이용하여 조절될 수 있다. 분리간격은 직렬의 광루프 미러 결합기 수를 조절함으로써 얻을 수 있다.

ABSTRACT

This paper is studied the high-repetition rate optical-pulse stream generation using optical loop mirror coupler. With the recent development of the ultrahigh-speed optical time division multiplexed system, high-repetition rate optical-pulse stream generation is necessary. This is different from conventional approaches, which use fiber or integrated waveguide delay line circuits. The high-repetition-rate optical-pulse multiplication phenomenon occurs when the optical pulse's spectral width is greater than the transfer bandwidth of the coupler used. From the analysis, the output repetition rate can be controlled by using fiber couplers with different equivalent transfer bandwidths. The pulse separation spacing is controlled by number of cascaded coupler in optical loop mirror coupler scheme.

키워드

Coupler, OTDM, pulse generator, bandwidth.

I. 서 론

1960년 Maiman에 의해 레이저가 개발되고, 1970년에 미국 Corning Glass사에 의해 20dB/km의 전송손실을 갖는 광섬유가 개발된 후, 전기신호를 광신호로 변환하는 반도체레이저 기술이 발전함에 따라 광섬유 통신시스템이 상용화되고 있다.[1]

1980년 Shaw[2]가 광통신 시스템에서 광소자들 중 광결합기를 광섬유만으로 제작할 수 있음을 발표한 이후로 광통신 시스템에서 광신호처리를 위한 연구가 활발히 진행되어, 편광기, 광필터, 위상변조기, 광증폭기, WDM(Wavelength Division Multiplexing) 광결합기 등의 소자가 실용화단계에 이르게 되었다. 또한 통신 시스템의 전송 속도를 높이기 위한 방법으로 짧은 펄스열을 생성하여 채널별로 변조한 후 각 채널을 시간

축상에서 광학적으로 다중화하여 전송함으로써 전송속도를 높이는 OTDM(Optical Time- Division Multiplexing) 시스템의 연구가 활발히 이루어지고 있다.[3] 이러한 초고속 OTDM 시스템을 구현하기 위해서는 고 반복률의 광펄스 발생장치가 필요한데 반도체레이저 다이오드나 modelocked laser를 이용하는 연구가 진행되고 어느 정도 이상의 고반복률 펄스를 얻는 것이 불가능한 것으로 밝혀지고 있다. 본 논문에서는 이러한 어려움을 극복하고자 하나의 광섬유로 구성되는 루프 결합기를 이용하여 고반복율을 갖는 펄스 발생에 관한 이론적인 해석과 전산모의 실험을 수행하였다. 이 구조에서는 광펄스의 스펙트럼폭이 광결합기의 전송대역폭보다 클 때 광펄스가 분할되어 고반복율의 광펄스를 얻을 수 있고, 광결합기의 전송대역폭은 광결합기의 간격 또는 결합길이를 조정하여 수 nm 까지 얻을 수 있으며, 다중루프구조로 구성할 경우에는 보다 높은 고반복율의 광펄스를 얻을 수 있음을 보였다.

II. 광결합기의 해석

본 연구에서 광섬유의 기본모드에 대한 전체의 분포를 y방향으로 선택했을 때 거리에 따른 전체는 식 (1)과 같다.[4]

$$E_y = \begin{cases} \frac{J_0(Ur/a)}{J_0(U)} & r/a \leq 1 \\ \frac{K_0(Wr/a)}{K_0(W)} & r/a > 1 \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $U = k_f a = a(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}$

$W = \gamma a = a(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}$

독립된 광섬유에서의 파동방정식과 결합된 광결합기에서의 파동방정식은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$(\nabla_t + k_0 n_c^2(x, y) - \beta_{1,2}^2)\Psi_{1,2} = 0 \quad (2)$$

여기서, $\Psi_{1,2}$: 독립된 광섬유의 전자계

$\beta_{1,2}$: 독립된 광섬유의 전파상수

$$(\nabla_t + k_0 n_c^2(x, y) - \beta_{\pm}^2)\Psi_{\pm} = 0 \quad (3)$$

여기서, Ψ_{\pm} : 우모드와 기모드의 전자계

β_{\pm} : 우모드와 기모드의 전파상수

$n_c(x, y)$: 결합기의 굴절율 분포

식 (2)와 식(3)을 이용하여 결합기의 결합계수는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$C = k_0 \frac{\int_{A_2} (n_1 - n_2)(\Psi_1 \Psi_2) dA}{\int_{A_{\infty}} (\Psi_1^2) dA} \quad (4)$$

여기서, $C_+ \equiv C_- \equiv C$

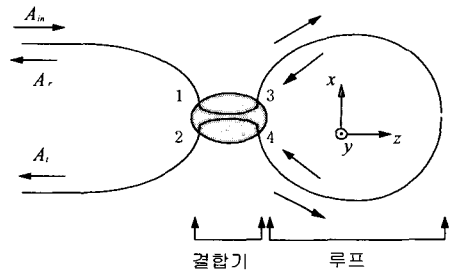


그림 1. 광섬유 루프 결합기 구조
Fig. 1 A fiber loop coupler configuration

간단한 광결합기의 구조는 그림 1과 같다. 평행하게 연마된 두 개의 광섬유로 결합된 광결합기에서 임의의 두 파장을 분리하고자 할 때 두 파장 λ_1, λ_2 에서 결합계수가 각각 $C(\lambda_1) < C(\lambda_2)$ 이고 결합길이가 L 일 때 각각 $S_1 = C(\lambda_1)L, S_2 = C(\lambda_2)L$ 이라 하면 파장에 대한 결합모드 방정식은 식 (5)과 같다.

$$\begin{aligned} P(\lambda_1) &= \sin^2 S_1 = 1 \text{ (or } 0) \\ P(\lambda_2) &= \sin^2 S_2 = 0 \text{ (or } 1) \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 두 파장 λ_1, λ_2 를 분리하기 위한 조건은 식 (6)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \text{조건 1 : } \sin^2 S_1 &= 0 \text{ 또는 } 1 \\ \text{조건 2 : } |S_1 - S_2| &= \pi/2 + q (q=0, 1, \dots) \end{aligned} \quad (6)$$

즉, λ_1 에서 $\sin^2 S_1 = 1$ 이고 $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta \lambda$ 에서 $\sin^2 S_2 = 0$ 이면 $\Delta \lambda$ 의 파장구간 만큼 분리시킬 수 있다. 조건 1은 결합길이 L 이 고정될 때 광결합기의 블록을 y 축으로 수평 이동함으로써 λ_1 의 신호를 100% 또는 0% 의 결합이 발생하도록 조정함으로써 만족시킬 수 있다. 그러므로 두 파장과의 차이는 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta \lambda = \left| \frac{\pi}{2|(\partial C / \partial \lambda) L|} \right|_{\lambda = \lambda_0} \quad (7)$$

조건 1을 만족하는 광결합기로 분리할 수 있는 두 파장간의 간격 $\Delta \lambda$ 는 중심파장에서 $|\partial C / \partial \lambda|$ 의 함수이며, 중심파장에서 $|\partial C / \partial \lambda|$ 을 얻기 위하여 V 값이 $1.3 < V < 2.4$ 의 범위에서 V 와 W 와의 선형관계를 이용하여 모드 파라미터를 표현하면 식 (8)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} W^2 &\approx 1.306 V^2 - 2.276 V + 0.992 \\ U^2 &\approx 0.3.6 V^2 + 2.276 V - 0.992 \\ V &= (2 \pi a / \lambda) (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $2 \Delta = (n_{co}^2 - n_{cl}^2) / n_{co}^2$ 을 의미하고 $\partial C / \partial \lambda$ 는 식 (9)과 같이 표현된다.

$$\left. \frac{\partial C}{\partial \lambda} \right|_{\lambda = \lambda_0} = X[A\lambda + B\lambda^2 + D\lambda^3] + Y[A + 2B\lambda + 3D\lambda^2] \quad (9)$$

여기서,

a = 광섬유 반경

d = 두 코어사이의 간격

$$\begin{aligned} X &= \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{K_0(Wd/a)}{K_1^2(W)} \right] \\ Y &= \frac{K_0(Wd/a)}{K_1^2(W)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= -\frac{0.0487}{a^2 n_{co}} \\ B &= \frac{0.0576}{a^3 n_{co}^2 (2\Delta)^{1/2}} \\ D &= \frac{-4 \times 10^{-3}}{a^4 n_{co}^3 (2\Delta)} \end{aligned}$$

그러므로 평행하게 연마되어 결합된 형태의 광결합기에 대해서 식(9)을 이용하면 중심파장에서 $|\partial C / \partial \lambda|$ 가 결정되며, 식 (7)에 의해서 파장간격을 결정할 수 있다. 파장분리 구간 $\Delta \lambda$ 는 식 (7)에서 결합길이 파장에 대하여 일정하고 $|\partial C / \partial \lambda|$ 이 클수록 $\Delta \lambda$ 가 작아지므로 분해능이 좋아지고 두 코어사이의 거리를 선택하면 파장분리 구간 $\Delta \lambda$ 를 최소화할 수 있다. $|\partial C / \partial \lambda|$ 의 최대가 되는 두 코어사이의 거리는 식 (10)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial d} \left[\left| \frac{\partial C}{\partial \lambda} \right| \right] &= \frac{\partial X}{\partial d} [A\lambda + B\lambda^2 + D\lambda^3] \\ &+ \frac{\partial Y}{\partial d} [A + 2B\lambda + 3D\lambda^2] = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

그림 1과 같은 결합기의 루프 구조에서 광결합기의 정현적인 스펙트럼 전달 특성을 결합계수와 결합모드 방정식[5][6]을 이용하여 표현하면 식 (11)과 같다.

$$[C] = \sqrt{1-r} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi f}{\Delta f}\right) & j \sin\left(\frac{\pi f}{\Delta f}\right) \\ j \sin\left(\frac{\pi f}{\Delta f}\right) & \cos\left(\frac{\pi f}{\Delta f}\right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, r 은 결합기의 손실, f 는 광 주파수이고 Δf 는 결합기 채널 간격의 절반과 동일한 광 주파수 간격이다. 그림 1에서 포트 1로 입사된 광 펄스는 광섬유 루프에서 양쪽으로 갈라지고 다시 광결합기로 재입력되며, 광섬유 루프가 짧기 때문에 광섬유의 굴절률차는 무시하였다. 따라서 광섬유 루프의 전송특성은 식 (12)과 같이 표현할 수 있다.

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{21} \\ T_{12} & T_{22} \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} [C] e^{j\psi} \quad (12)$$

$$= (1-r) \begin{bmatrix} j\sin\left(\frac{2\pi f}{\Delta f}\right) & \cos\left(\frac{2\pi f}{\Delta f}\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi f}{\Delta f}\right) & j\sin\left(\frac{2\pi f}{\Delta f}\right) \end{bmatrix} e^{j\psi}$$

여기서, T_{ij} 는 포트 i에서 포트 j까지 주파수 영역에서의 전송계수이고 ψ 는 광섬유 루프 안에서 유기되는 위상 천이이다. 주파수의 확산관계는 $c = \lambda f$ 에서 광결합기의 전송대역폭을 선폭($\Delta\lambda$)항으로 표현하면 식 (14)과 같이 주어진다.

$$\Delta f = \frac{\lambda^2 \Delta\lambda}{c} \quad (13)$$

주파수 영역에서 포트 1으로 들어오는 입력 X_i 를 고려할때 주파수 영역에서의 출력은 $X_{out} = T_{12} * X_i$ 가 되며, 푸리에(Fourier) 역변환에 의해 일시적인 출력은 식 (14)과 같이 된다.

$$x_{out} = t_{12} * x_i \quad (14)$$

$$= [\delta'(t-\tau) + \delta'(t+\tau)] * \left(\frac{x_i * D}{2}\right)$$

여기서, $\tau = 1/\Delta f$ 이고 D는 전파로 인한 펄스 확산함수이다. 그리고 δ' 는 델타 함수이다. 루프의 길이가 짧기 때문에 광섬유 루프 결합기에서 D는 무시한다고 가정하면 입력펄스가 Δf 보다 큰 대역폭을 가질 경우 포트 2에서 입력 펄스보다 많은 펄스를 얻을 수 있으며, N개의 동일한 광섬유 루프 결합기로 구성되면 협대역 파장분할 결합기를 실현할 수 있고 출력 펄스율을 조절할 수 있다.

III. 전산모의 실험

앞에서 검토한 이론을 바탕으로 광섬유의 반경 $a = 4.07 \mu\text{m}$, 코어 굴절율 $n_1 = 4.18$, 크래딩 굴절율 $n_2 = 4.17704$ 인 광섬유의 제원을 갖는 루프 구

조의 광섬유 결합기에서 고 반복율에 대한 전산모의 실험을 수행하였다.

그림 2는 코어사이의 간격에 따른 결합계수의 변화를 나타낸 것인데, 간격이 좁을수록 결합계수가 커짐을 확인 할 수 있다.

그림 3에서, 코어사이의 거리 $d = 2a + \delta$ 에서 $\delta = 0$ 일 때 결합계수가 최대가 되는 중심파장범위와 $\delta > 0$ 일 때 결합계수가 최대가 되는 중심파장의 범위가 일정하지 않음을 알 수 있으며, 그림 4는 100% 광결합을 발생시키기 위한 결합길이 $L = \pi/2C$ 를 나타낸 것으로 역시 파장에 따라서 변화한다는 것을 알 수 있다.

그림 5에서 두 코어사이의 간격에 따라 $|dC/\partial\lambda|$ 의 최대가 되는 중심파장의 범위가 일정하지 않고 다르다는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 6은 두 코어사이의 거리와 중심파장에 따른 파장분리구간 $\Delta\lambda$ 를 식 (7)을 이용하여 나타낸 것으로 결합 길이가 일정할 때 $|dC/\partial\lambda|$ 의 최대가 되는 두

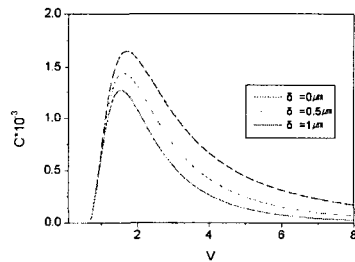


그림 2. 결합계수와 정규화 주파수와 의 관계
Fig. 2 Relationship coupling coefficient and normalized frequency

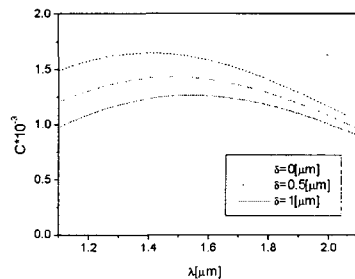


그림 3. 결합계수와 광신호 파장과의 관계
Fig. 3 Relationship coupling coefficient and signal wavelength

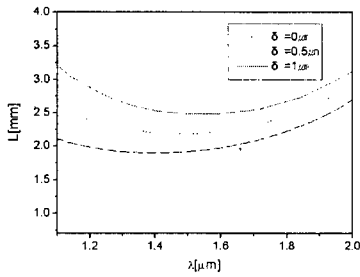


그림 4. 결합길이와 신호 파장과의 관계
Fig. 4 Relationship coupling length and signal wavelength

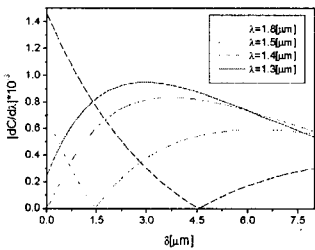


그림 5. $|\partial C/\partial \lambda|$ 와 코어 간격과의 관계
Fig. 5 Relationship $|\partial C/\partial \lambda|$ and center wavelength

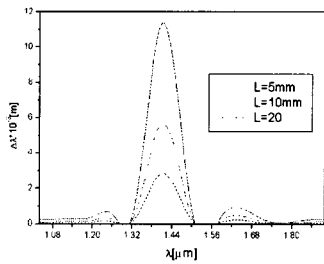


그림 6. $\Delta \lambda$ 와 중심 파장과의 관계
Fig. 6 Relationship $\Delta \lambda$ and center wavelength

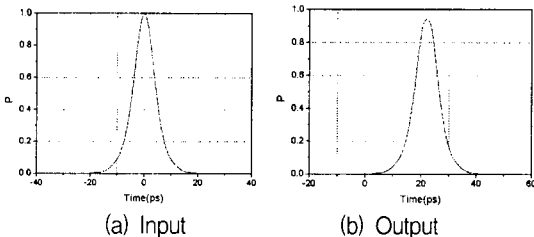


그림 7. $\Delta f = 8$ nm 인 광결합기의 입·출력
Fig. 7 Input pulse width = 10 ps and output pulse after coupler loop with $\Delta f = 8$ nm

코어사이의 거리를 선택하면 파장분리구간 $\Delta \lambda$ 를 최소화할 수 있는 것을 알 수 있다.

그림 7로부터 입력펄스가 루프 미러 광결합기의 전송대역폭보다 작으므로 광펄스의 분할이 전혀 이루어지지 않았음을 확인 할 수 있다. 그림 8는 입력 펄스폭이 1 ps 인 경우, Δf 의 변화에 따른 3dB 루프 미러 광결합기의 출력 펄스를 보인다. Δf 가 어느 일정한 값 이상으로 커질 경우, 입력 신호와 출력 신호가 동일하게 나타나는데, 이에 의해 Δf 의 값이 루프 미러 광결합기의 중요한 요소임을 확인 할 수 있다.

그림 8는 Δf 가 5nm 이하로 주어질 때 출력 펄스가 정확히 분할됨을 보이고 그림 9은 다중 루프 광결합기에 따른 전산모의실험 결과를 보이는데 이 때 루프 미러 광결합기의 전송대역5폭 (Δf)은 8nm이다. 그림 9(a)는 펄스폭이 1 ps 인 입력 펄스를 보이고, (b)는 하나의 광결합기를 고려했을 때의 출력 펄스이다. (c)는 두개의 광결합기를 통과한 경우이고, 그리고 (d)는 세 개의 광결합기를 통과한 경우이다. 그림에서 보듯이 광결합기의 직렬연결에 의해 펄스 분리간격을 조절할 수 있음을 확인할 수 있다.

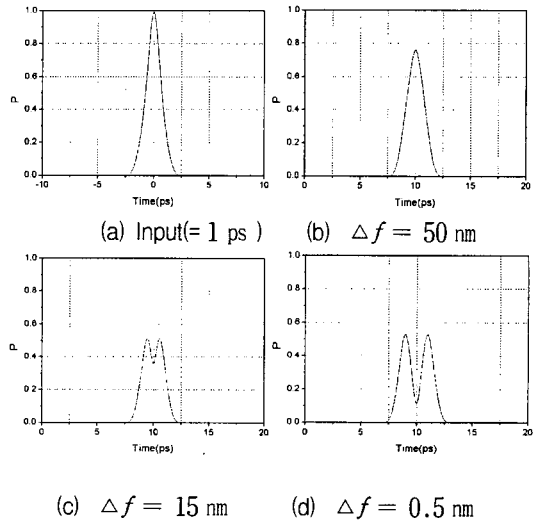


그림 9. Δf 에 따른 광결합기의 출력
Fig. 8 Out optical pulse against different Δf with input pulse width = 1 ps

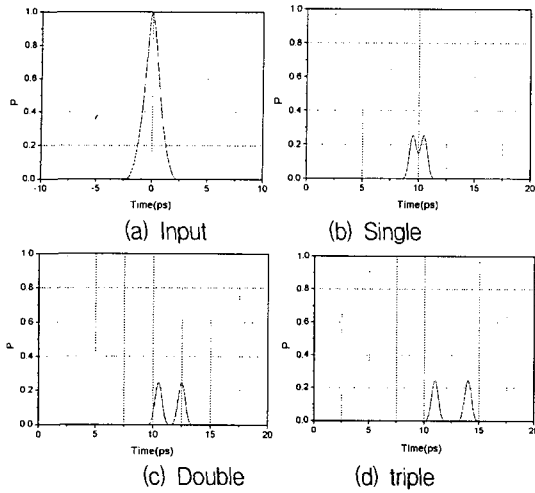


그림 9. $\Delta f = 8 \text{ nm}$ 의 광결합기의 수에 따른 출력
 Fig. 9 Output optical pulse with multiple coupler,
 each with $\Delta f = 8 \text{ nm}$

V. 결 론

OTDM 시스템에서 고 반복율을 갖는 광펄스장치가 필요하다라는 문제점을 지니고 있어 이에 대한 해결이 급선무라 할 수 있다. 이에 본 논문에서는 OTDM 시스템의 광원 장치로 광섬유 결합기를 이용한 루프 광결합기를 제안하고, 그 구조와 원리를 광결합기에서의 결합모드방정식을 바탕으로 광신호의 결합특성을 분석하여 광결합기의 간격과 결합길이에 따른 파장분리 간격특성을 이용하여 입력 펄스의 스펙트럼폭과 광결합기의 전송대역폭과의 관계를 고찰함으로써 고 반복율을 갖는 광펄스를 발생시킬 수 있음을 보였다.

본 논문에서 구성한 루프 광결합기의 출력을 전산 모의 실험한 결과로는 광섬유결합기의 전송대역폭에 따라 $1.5 \mu\text{m}$ 파장의 입력 펄스폭이 10 ps 즉, 스펙트럼 폭이 0.8nm 일 때에 대해 결합기의 전송대역폭을 8nm 로 조절하여 하나의 펄스를 얻었다. 입력 펄스폭이 1 ps 인 경우에 대해서는 전송대역 폭이 5nm 이하로 주어지는 경우에 만족할 만한 출력 펄스를 얻을 수 있었다. 또한, 펄스 간격은 루프 광결합기 구조에서 광결합기를 직렬로 연결하였을 때 광결합기의 직렬 연결수에 따라 펄스 분리간격을 조절할 수 있음을 확인하였다. 즉, 고 반복율을 갖는 펄스를 발생시키기 위한 루프 광결합기에서 가장 중요한 요소는 광결합기의 전송대역폭이고, 이 요소에 의해 고 반복율을 갖는 펄

스를 발생, 조절할 수 있었음 확인하였다.

본 논문에서 제안된 구조는 단일 광섬유만으로 광결합기와 루프를 구성할 수 있으므로 완전 광섬유 전송 시스템을 구현하는 데에도 이용할 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- [1] "광통신의 전개" 전자통신 연구소, 1993
- [2] G. Keiser. "Optical Fiber Communications", McGraw-Hill, 2nd ed.1991.
- [3] 박영일 외, "2.5 Gbps, 8채널 광다중화 신호의 123km 전송현장실험" Photonics conference'96, pp. 183-184, 1996.
- [4] Clifford R. Pollock. " Fundamentals of Optoelectronics", Irwin, 1995. 853-858, July 1991.
- [5] E. A.Kuzin, B. Ibarra Escamilla, P. Rojas Laguna, J. Sanchez Momdragon "Nonlinear Optical loop mirror with low birefringence twisted fiber in the loop", Optics Comm., 1998
- [6] D. B. Mortimore, "Fiber loop reflectors," J. Lightwave Technol., Vol. 6, No. 7, pp. 1217-1224, July 1998.

저자약력



정찬권(Chan-Gwoun Jeong)

원광대학교 전자공학과 박사과정
 ※관심분야 : 반도체 및 통신 소자,
 광통신 및 광전소자



김선엽(Sun-youb Kim)

원광대학교
 전기전자 및 정보공학부
 ※관심분야 : 반도체 및 통신 소자,
 광통신 및 광전소자

강영진(Young-jin Kang)

제 8권 제 2 호 참조
 ※관심분야 : 반도체 및 통신 소자, 광통신 및 광전소자
 마이크로파 및 전파방송