論文97-34D-4-15

광섬유 격자 소자를 이용한 WDM 시스템용 전광 분기 결합 장치의 구조 연구

(Optical Add/Drop Multiplexer for WDM system using Fiber Bragg Grating)

金 世 潤 *, 李 相 培 *, 崔 相 三 *, 鄭 峻 **, 金 相 蓉 **,
朴 一 鍾 **, 鄭 智 采 ***

(Se Yoon Kim, Sang Bae Lee, Sang Sam Choi, Joon Chung, Sang Yong Kim, Il Jong Park, and Jichai Jeong)

요 약

기존의 광섬유 격자 소자를 이용한 전광 분기 결합 장치가 가지는 여러 문제점을 보완할 수 있는 새로운 형태의 편광분광기와 광섬유 격자 소자를 이용한 전광 분기 결합 장치를 제안하고 그에 대한 특성을 분석하여 보았다. 이 장치의 특징은 두 팔의 신호들이 간섭에 의해서가 아니라 편광 상태에 의해서 합쳐지기 때문에 주위의 온도에 무관하다는 것이다. 실험적으로 두 팔의 온도차이가 65℃일때 분기된 신호의 변동이 0.3 dB 이하였으며 분기 단자에서 0.8 nm 떨어진 인접 채널의 반사된 신호들과 차이는 -26 dB 이하이었다. 실제 2.5 Gbit/s WDM 시스템에 적용해 본 결과 분기 단자에서의 BER 특성은 결합 단자에 동일 파장의 신호 유무에 따라 0.3 dB 이하의 crosstalk 파워 페널티를 보였다.

Abstract

We demonstrate a novel wavelength-division add/drop multiplexer employing fiber Bragg gratings and polarization beam splitters. The multiplexer is easy to fabricate without any special technique such as UV trimming, and yet shows very stable performance with less than 0.3-dB crosstalk power penalty in a 0.8-nm-spaced, 2.5 Gbps-per-channel WDM transmission system. We find that the rejection of adjacent channels is more than -26 dB, and the signal leakage through output port is less than -34 dB.

* 正會員, 韓國科學技術研究院 光技術研究센터
(Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology)
** 正會員, 韓國通信 電送技術研究所 光通信基礎研究팀
(Transmission Technology Research Laboratories, Korea Telecom)
*** 正會員, 高麗大學校 工科大學 電波工學科
(Department of Radio Engineering, Korea University)

接受日字:1997年2月24日, 수정완료일:1997年4月8日

Ⅰ. 서 론

현재 광통신 시스템은 전 세계적으로 초고속 정보통신망의 중요성이 증가하는 가운데 활발히 연구되고 있다. 특히 파장다중화를 이용한 WDM(Wavelength Division Multiplex) 시스템은 광정보 집적도가 높아 고밀도 통신이 가능하므로 조만간 실용화될 예정이다. 이미 국내에서도 채널 당 2.5Gbit/s급 광전송 시스템의 개발을 넘어 10Gbit/s급 광전송 시스템의 개발이 활발히 연구중에 있다. 이러한 광전송 WDM 시스템의 핵심기술은 가변성 광원과 주파수의 안정화, 광대역 광증폭기, 광링크의 설계, WDM 시스템용 소자의 개발

에 있는데, 이 WDM 시스템 소자중에서 가장 핵심이 되는 것이 WDM 시스템의 송신단과 수신단 사이의 임의의 지점에서 연속된 신호들의 각 채널을 추가하거나 삭제할 수 있는 기능 소자인 전광 분기 결합 장치이다. 이미 전세계적으로 활발히 연구되고 있는 광섬유 격자 소자(fiber Bragg grating)는 매우 작은 삽입 손실과 파장 선택도가 높아 광필터로서 매우 좋은 특성을 지니고 있다. 그러나 광섬유 격자 소자는 기본적으로 대역 반사 필터(band-rejection filter)이기 때문에 대역 통과 필터(band-pass filter)인 전광 분기 결합 장치로 사용하기 위해서는 여러 가지 기술이 필요한데 이러한 광섬유 격자 소자를 이용한 전광 분기 결합 장치로는 Mach-Zehnder 간섭계형[1], 써큘레이터(circulator)형[2], 커플러(coupler)형[3]등이 있다. 그러나 이런 장치들은 광출력의 안정성이 떨어지거나, 제작이 힘들거나, 가격이 비싸다는 문제점들을 지니고 있다. 본 연구에서는 이전의 방법들과 비교할 때 높은 안정성과 쉬운 제작성, 그리고 경제성을 지닌 광섬유 격자 소자와 편광분광기(polarization beam splitter)를 이용한 새로운 전광 분기 결합 장치를 제작하고 그 특성을 분석한 뒤 실제 WDM 전송 시스템에서의 성능을 분석해 보았다.

Ⅱ. 소자 제작 및 특성

1. 광섬유 격자 소자 제작

광섬유 격자 소자는 광섬유의 코어에 자외선영역의 엑시머 레이저(KrF 또는 ArF excimer laser)를 이용하여 주기적인 굴절률 변화를 영구적으로 새김으로써 광섬유가 식 (1)과 같이 굴절율 변화의 주기에 의해서 결정되는 파장의 빛에 대하여 반사특성을 보이는 물질이다.

$$\lambda_g = 2n_{eff}\Lambda \qquad (1)$$

(λ_g : 브래그 파장, n_{eff} : effective refractive index, Λ : index modulation period)

이러한 격자를 광섬유 내부에 새길 수 있는 것은 광섬유가 244nm부근의 자외선에 대해 가지는 광민감성(photosensitivity)에 기인하며, 그 원리가 아직 완전히 밝혀지지는 않았으나 Ge이 첨가된 광섬유 코어의 244nm흡수 대역에 기인한다고 추정되어지고 있다. 이러한 광민감성 현상은 1978년 K. O. Hill 등에 의해서 광섬유에 아르곤(Ar) 레이저를 조사하므로써 광섬유 내에 정상파를 형성시켜 광섬유 격자가 형성될 수 있음이 처음 발견되어졌으나[4], 1989년 G. Meltz 등[5]이 엑시머 레이저를 이용하여 Ge이 첨가된 광섬유 측면에 간섭무늬를 형성하므로써 영구적인 광섬유 격자를 새길 수 있음을 보인 이후로 본격적인 연구가 시작되었다. 이 후 광섬유 격자 소자를 이용한 광섬유 레이저[6], 필터[7]의 개발과 센서로서의 응용[8]등이 활발히 연구되어졌으며 변형된 형태의 chirped fiber grating, long period grating, tilted grating등이 개발되어 광섬유를 진행하는 광신호의 분산 보상(dispersion compensation)이나 펄스 압축(pulse compression)[9], 센서, EDFA(erbium doped fiber amplifier) 이득 스펙트럼의 평탄화[10] 등에 대한 연구가 이루어져 왔다. 이러한 광섬유 격자 소자를 제작하는 방법에는 여러 가지가 있으나 그 중 위상마스크를 이용하는 방법이 가장 많이 이용되고 있다[11].

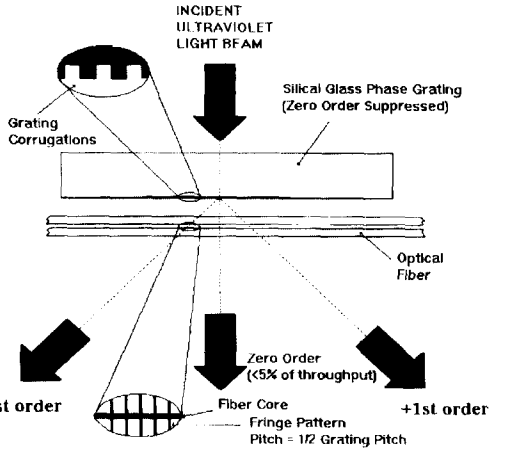


그림 1. 위상마스크 통한 광섬유 격자의 제조방법
Fig. 1. Fabrication of fiber Bragg grating using phase mask.

위상마스크는 일종의 광학 회절 소자(Diffractive Optical Element)이며 인가된 빛을 여러 차수의 회절 방향에 따라 분리시켜주는 역할을 한다. 위상마스크에 새겨진 광섬유 격자의 높이를 조절하므로써 위상마스크에 수직으로 입사된 자외선 레이저빛의 영차 회절패턴은 수%이내의 양으로 억제되어 대부분의 레이저 파워가 ±1차 방향으로 회절되므로써, 이 방향으로 회절되어진 빛들이 광섬유의 코어에서 간섭을 일으켜 광섬

유 내에 광섬유 격자를 형성하게 된다.

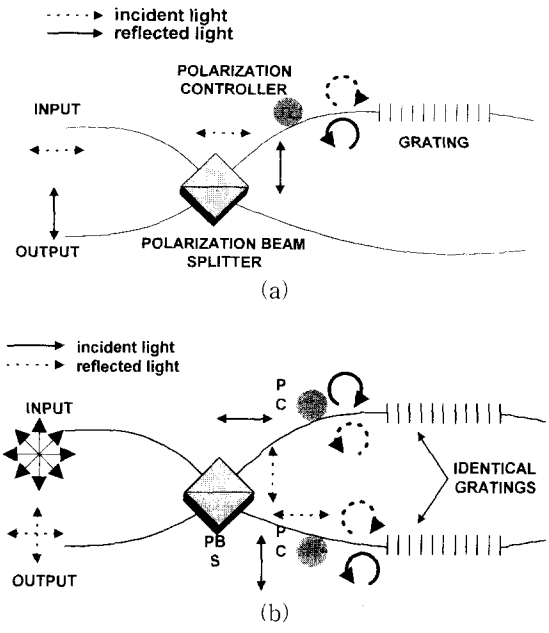


그림 2. 편광분광기를 사용한 전광 분기 결합장치의 동작원리 (a) 입사된 빛이 편광상태를 지닌 경우 (b) 입사된 빛이 임의의 편광상태를 지닌 경우

Fig. 2. Principle of device operation. (a) polarization sensitive configuration (b) polarization insensitive configuration

2. 편광분광기를 이용한 전광 분기 결합 장치의 동작원리

편광분광기와 광섬유 격자 소자를 이용한 필터의 기본 원리는 입사된 빛이 선형 편광 상태(linearly polarized)를 지닐 때와 그렇지 않을 경우로 나누어 생각할 수 있다[12]. 그림 2.(a)와 같이 수직 방향으로 선형 편광 상태를 지닌 빛이 입력 단자(input port)로 입사되어 질 때, 편광분광기를 통해 한쪽 팔로만 진행하게 된다.

이렇게 한쪽 팔로만 진행된 빛은 $\lambda/4$ 편광조절기(polarization controller)를 통과하면서 원편광(circularly polarized)된 빛으로 편광 상태가 변하게 되고 광섬유 격자 소자에서 반사되면서 원편광상태의 편광 회전 방향이 반대로 바뀌게 된다. 반사된 빛은 다시한 번 편광조절기를 거치면서 선형 편광으로 편광 상태가 바뀌는데 이번에는 수평방향의 선형 편광을 지닌 빛이 되어 입사된 단자 쪽이 아닌 다른 단자(output port)로 빠져나가게 된다. 이러한 원리로 선형 편광 상태를 지닌 빛은 광섬유 격자 소자를 하나만 사용하여 필터를 구성할 수 있다. 그림 2.(b)는 임의의 편광 상태를 지닌 빛에 대한 필터의 구성을 보여주고 있다.

입력 단자로 입사된 빛은 편광분광기를 통과하면서 각각에 수직인 선형 편광된 상태로 갈라진다. 두 팔로 갈라진 신호들은 $\lambda/4$ 편광조절기를 통과하면서 원편광된 상태로 변화한다. 광섬유 격자 소자에서의 반사된 신호의 원편광의 방향이 반대가 되어 다시 편광조절기를 통과하게 된다.

그러므로 반사 후에 신호는 원래 입력 신호의 수직 방향으로 선형 편광된 상태를 가지게 되고 따라서 빛은 출력 단자에서 나오게 된다. 따라서 임의의 편광 상태를 지닌 빛에 대해서는 동일한 광섬유 격자 소자 두 개가 필요함을 알 수 있다.

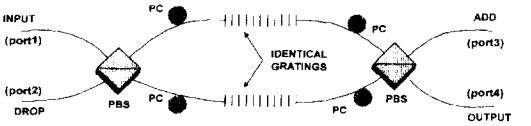


그림 3. 편광분광기를 이용한 전광 분기 결합 장치

Fig. 3. Schematic of optical add/drop multiplexer.

전광 분기 결합 장치는 임의의 편광 상태를 지닌 빛에 대해 사용하여야 함으로 두 번째 설명한 구조를 이용하여야 한다. 이러한 기본구조를 갖는 필터 두 개를 그림 3.과 같이 구성하면 새로운 방식의 전광 분기 결합 장치를 만들 수 있다[13].

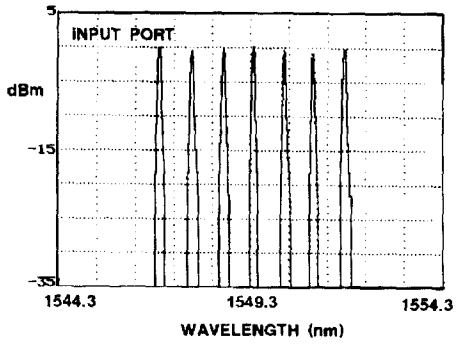
또한 이 장치는 대칭 구조를 갖기 때문에 브래그 파장을 갖는 빛을 단자 3.으로 입사함으로써 새로운 신호를 더할 수도 있다. 이런 경우에 광섬유 격자 소자의 반사율이 매우 높지 않은 경우 새로 더해지는 신호가 광섬유 격자 소자를 통해 누설되어 분기되는 신호의 비트 오율(bit error rate)을 악화시키는 crosstalk 현상이 심각하게 발생할 수 있다.

그러므로 실제적으로 crosstalk을 최소화하기 위하여 99% 이상의 반사율을 갖는 광섬유 격자 소자가 필요하며, 만약 다른 브래그 파장을 갖는 광섬유 격자 소자를 부착하여 분기하는 신호와 결합시키려는 신호를 다르게 하면 이러한 crosstalk 현상을 피할 수 있고, 하나의 광섬유 격자 소자 대신 여러 다른 채널에 맞는 브래그 파장을 갖는 광섬유 격자 소자들을 부착한다면 한 번에 많은 채널들을 분기시키거나 결합시킬 수도 있다.

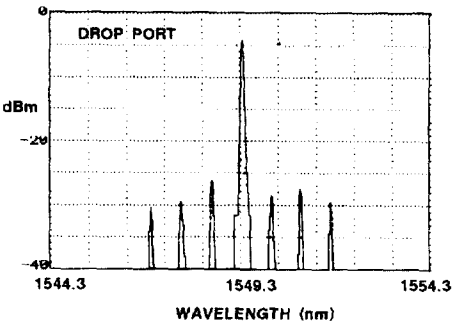
Ⅲ. 전광 분기 결합 장치의 특성

실험적으로 전광 분기 결합 장치는 0.4 nm 대역폭을 갖고 1549.3 nm에서 광 반사율이 99%인 동일한 두 개의 광섬유 격자를 가지고 구성되었다. 두 개의 광섬유 격자 소자는 본 실험실에서 제작한 Ge 농도가 18 mol [%], 클래딩(cladding)의 지름이 135 μm인 광섬유에 KrF 엑시머 레이저(450mJ/pulse, 반복 주기 20Hz)와 위상 마스크를 사용하여 제작되었다.

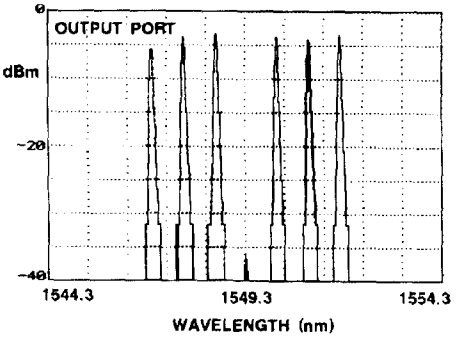
장치의 특성을 조사하기 위하여 그림 4.(a)에서와 같이 가변 파장 레이저(Santec TSL-900)를 사용하여 1546.9 nm에서 1551.7 nm까지 0.8 nm(100 GHz)의 채널간격을 지닌 7 채널을 입력 광신호로 사용하였고 각 단자에서의 스펙트럼들은 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer, 분해능 0.1 nm)를 이용하여 측정하였다. 그림 4.(b)는 7 채널의 광 신호중에서 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 해당하는 1549.3 nm의 신호가 단자 2(drop port)로 분기되는 것을 보여주고 있다. 분기된 채널과 0.8 nm 떨어진 인접 채널의 반사된 신호들과 차이는 -26 dB 이하로 인접 채널들은 광섬유 격자 소자에서 반사되지 않고 투과되고 있음을 알 수 있다. 그림 4.(c)에서와 같이 1549.3 nm의 신호중에서 광섬유 격자 소자를 통해 나온 누설 신호는 단자 4(output port)에서 -34dB 정도로 측정되었다. 이것은 높은 반사율을 갖는 광섬유 격자 소자를 사용함으로써 누설 신호에 의한 영향이 거의 없다는 것을 보여주고 있다. 1549.3 nm의 신호를 결합하기 위하여 단자 3(add port)으로 입사시킨 경우는 앞에서 설명한 같은 원리로 단자 1(input port)을 통해 진행하던 신호들과 합쳐져서 출력 단자로 나오는 것을 확인하였고 그 특성은 신호를 분기하는 경우과 차이가 없었다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. 전광 분기 결합 장치의 각 단자에서의 스펙트럼
(a) 입력 단자 (b) 분기 단자 (c) 출력 단자

Fig. 4. Spectrum at each port of the optical add/drop multiplexer.
(a) input port (b) drop port (c) output port

실제 WDM 시스템에서의 성능을 평가하기 위하여 그림 5.과 같이 WDM 전송시스템을 구성하였다. 광송신부는 1547.83 nm부터 1551.03 nm까지 파장 간격이 0.8 nm인 5개의 채널로 구성하고 입력-출력과 분기-결합간의 신호 누설에 의한 파워 페널티(power penalty)를 측정하기 위하여 5 채널 중 가운데에 위치한 3번 채널(1549.43 nm)을 $LiNbO_3$ 외부변조기를 이용하여 2.5 Gbit/s로 변조한 후 광증폭기를 거친 뒤, 1×2 커플러를 사용하여 둘로 나누어 하나는 다른 채널들과 함께 전광 분기 결합 장치의 입력 단자로 넣고, 다른 하나는 10 km의 광섬유를 전파시킴으로써 근사적으로 입력 단자 신호와 상관관계가 없는 신호를 만들어 결합 단자(add port)에 연결하였다. 결합 단자로 더해지는 신호의 전력 수준(power level)은 출력 단자로 진행하는 채널들과 같은 전력을 갖도록 variable attenuator를 통해 조정되었다. 분기 단자를 통해 나오

는 신호는 대역 통과 필터를 거쳐 에러 검출기로 보내져서 비트 오율(bit error rate)을 측정하였다. 그림 6.에서 보는 바와 같이 분기된 신호의 수신감도는 약 -30.8dB 이었고, 결합 단자에서의 신호의 유무에 따라 10^{-9}BER에서 측정된 crosstalk 파워 페널티는 0.3 dB 이하였다.

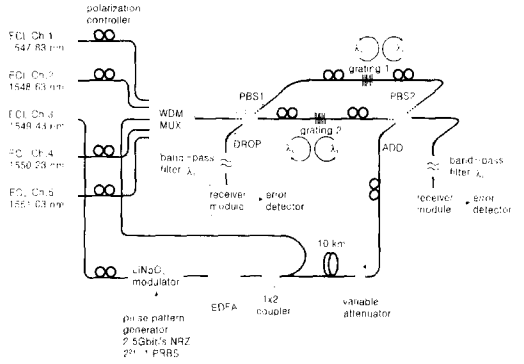


그림 5. 전광 분기 결합 장치를 사용한 2.5 Gbit/s 5 채널 WDM 전송 실험
Fig. 5. 2.5 Gbit/s 5 channel WDM transmission experiment using the optical add/drop multiplexer.

본 전광 분기 결합 장치의 장점 중 하나는 두 팔의 신호들이 간섭에 의해서가 아니라 두 수직한 편광 상태에 의해서 합쳐지기 때문에 주위의 온도에 무관하다는 것이다. 실험적으로 두 팔의 온도차이가 65℃일때 단자 2.로 빠져나온 신호의 변동이 0.3 dB 이하였다. 따라서 전광 분기 결합 장치의 두 팔의 경로차이는 신호의 한 비트 주기(2.5 Gbit/s에서 약 8cm)보다만 작으면 되고 그것은 간섭계적으로 유지되어질 필요는 없기 때문에 Mach-Zehnder 간섭계형 전광 분기 결합 장치보다 훨씬 안정적인 특성을 나타낸다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 WDM(Wavelength-Division Multiplex) 통신 시스템의 소자중에서 가장 핵심이 되는 전광 분기 결합 장치를 광섬유 격자소자와 편광분광기를 이용하는 방법으로 새롭게 개발하였다. 개발된 전광 분기 결합 장치는 두 빛의 간섭 현상을 이용하는 것이 아니라 편광 상태를 이용하는 것으로 제작이 용이하고 외부의 온도 변화에 의한 영향을 받지 않는 특성을 보였다. 좁은 대역폭과 높은 반사율을 갖는 광섬유 격자 소자를 이용함으로써 분기 단자에서 인접 채널 신호들의 반사를 -26dB 이하로 줄였고, 분기된 신호 중 광섬유 격자 소자를 통해 나오는 누설 신호를 -34dB 정도로 억제할 수 있었다. 본 장치가 실제 WDM 시스템에서 사용되었을 경우의 성능을 분석하기 위하여 2.5 Gbit/s WDM 시스템에 적용해 본 결과, 분기 단자에서의 BER 특성은 결합 단자에 동일 파장의 신호 유무에 따라 0.3 dB 이하의 crosstalk 파워 페널티를 보임을 알 수 있었다.

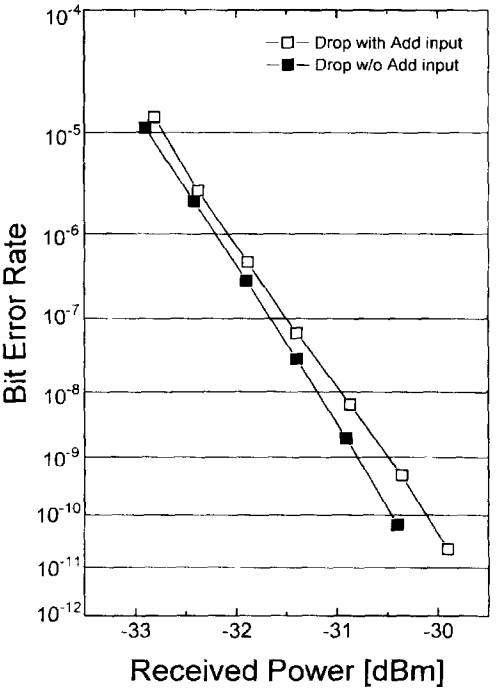


그림 6. 결합 단자로 더해진 신호가 있을 때와 없을 때의 분기된 채널의 비트 오율 특성
Fig. 6. Bit error rates of a dropped channel with and without an added channel.

현재 광섬유 격자 소자의 브래그 파장에 해당하는 고정된 파장만을 분기/결합할 수 있을 뿐 아니라 다른 파장의 신호들도 분기/결합할 수 있는 파장 가변형 전광 분기 결합 장치에 관한 연구를 수행하고 있다

참 고 문 헌

[1] F. Bilodeau, D. C. Johnson, S. Theriault, B. Malo, J. Albert, and K. O. Hill, "An all-fiber dense-wavelength-division mul-

tiplexer/ demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings," IEEE Photon. Technol. Lett., 7, pp. 388-390, 1995.

[2] C. R. Giles and V. Mizrahi, "Low-loss ADD/DROP Multiplexer for WDM lightwave networks," in Tenth International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, 1995 Technical Digest, vol. 3, paper ThC2-1.

[3] J.-L. Archambault, P. St. J. Russell, S. Barcelos, P. Hua, and L. Reekie, "Grating-frustrated coupler: a novel channel-dropping filter in single-mode optical fiber," Opt. Lett., 19, pp. 180-182, 1994.

[4] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication," Appl. Phys. Lett., **32**, pp. 647-649, 1978.

[5] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," Opt. Lett., 14, pp. 823-825, 1989.

[6] G. A. Ball and W. W. Morey, "Continuously tunable single-mode erbium fiber laser," Opt. Lett., 17, pp. 420-422, 1992.

[7] F. Bilodean, K. O. Hill, B. Malo, D. C. Johnson, and J. Albert, "High-return-loss narrowband all-fiber bandpass Bragg transmission filter," IEEE Photon. Tech. Lett., **6**, pp. 80-82, 1994.

[8] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection," Electron. Lett., 28, pp. 236-238, 1992.

[9] H. G. Winful, "Pulse compression in optical fiber filters," Appl. Phys. Lett., **46**, pp. 527-529, 1995.

[10] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, N. S. Bergano, and C. R. Davidson, "Long-period fiber-grating-based gain equalizers," Opt. Lett., **21**, pp. 336-338, 1996.

[11] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," Appl. Phys. Lett., 62, pp. 1035-1037, 1993.

[12] M. J. Guy, S. V. Chernikov, J. R. Taylor, and R. Kashyap, "Low-loss fiber Bragg grating transmission filter based on a fiber polarization splitters," Electron. Lett., 30, pp. 1512-1513, 1994.

[13] Se Yoon Kim, Sang Bae Lee, Joon Chung, Sang Yong Kim, Jichai Jeong, and Sang Sam Choi, "Highly stable optical Add/Drop multiplexer using polarization beam splitters and fiber Bragg grating," in Optical Fiber Communication Conference '97, accepted.

저 자 소 개

金 世 潤(正會員)

1973년 6월생. 1996년 2월 고려대학교 전파공학과 졸업. 현재 고려대학교 전파공학과 석사과정, 한국과학기술연구원(KIST) 광기술센터 학생연구원. 주관심분야는 광통신 시스템, 광섬유 격자 소자를 이용한 광통신용 소자 등

崔 相 三(正會員) 第 34卷 D編 第 3號 參照
현재 한국과학기술연구원(KIST) 광기술센터 책임연구원, STEPI 연구기획단장

李 相 培(正會員) 第 34卷 D編 第 3號 參照
현재 한국과학기술연구원(KIST) 광기술센터 선임연구원

鄭 峻(正會員)

1963년 8월 31일생. 1986년 2월 서울대학교 공과대학 전자공학과 졸업. 1988년 6월 스탠포드대학교 전기공학과 석사. 1993년 6월 스탠포드대학교 전기공학과 박사. 1993년 5월 일본 히타치 중앙연구소 연구원. 1994년 9월 ~ 현재 한국통신 연구개발본부 전송기술연구소 선임연구원. 관심분야는 광통신 시스템, 레이저 공학

金 相 蓉(正會員)

1965년 3월 29일생. 1988년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1990년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1992년 8월 서울대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1996년 12월 ~ 현재 한국통신 연구개발본부 전송기술연구소 전임연구원. 주관심분야는 광통신 시스템, 광증폭기

朴 一 鍾(正會員)

1961년 4월 15일생. 1984년 2월 광운대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1986년 2월 광운대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1986년 2월 ~ 현재 한국통신 연구개발본부 전송기술연구소 선임연구원. 주관심분야는 광통신 시스템 및 광통신망

鄭 智 采(正會員) 第 34卷 D編 第 1號 參照
현재 고려대학교 전파공학부 부교수