

마이켈슨 간섭계를 이용한 새로운 파장 잠금 방법

정회원 박 경 수*, 엄 진 섭**

New wavelength locking method using Michelson Interferometer

Kyoungsu Park*, Jinseob Eom** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 팔 길이 가변 마이켈슨 간섭계를 이용한 파장 잠금 구조를 새로이 제안하였다. 제안된 구조는 LD 드라이버, 마이켈슨 간섭계, ATC, APC, 신호처리부로 구성된다. 이 구조에서는 0.0005nm(=62.4MHz)이하의 정밀도로 파장 잠금이 가능하며, 마이켈슨 간섭계의 팔 길이가변성을 이용하여 주위 환경변화에 따른 문제점들에 쉽게 대처할 수 있다.

Key Words : WDM, wavelength locking, wavelength monitoring, Michelson interferometer.

ABSTRACT

In this paper, we propose a new wavelength locking structure which uses the Michelson interferometer equipped with a movable arm. The proposed one consists of LD driver, Michelson interferometer, automatic temperature controller, automatic power controller, and signal processor. This structure can provide the wavelength locking capability of a resolution below 0.0005nm(=62.4MHz) and cope easily with an external environment variation using movable arm of Michelson interferometer to give a good stability.

1. 서 론

인터넷 사용의 급증에 따른 정보 전송용량의 증가를 수용하기 위한 방안으로 WDM(Wavelength Division Multiplexing)을 이용한 광 네트워크의 구성이 활발히 진행되고 있으며, 앞으로는 채널간 파장 간격을 더욱 줄여 채널 수를 증가시키고자 하는 DWDM(Dense WDM) 기술이 도입되어 막대한 정보 증가량에 유연히 대처할 수 있을 것으로 인식된다.

WDM 광 전송방식은 좁은 간격의 여러 파장들을 하나의 광섬유로 전송하므로 각 파장간의 간격 유지 및 분리가 전송 성능에 큰 영향을 미치게 되는데, 파장이 안정되지 않을 경우 WDM 소자들로부터의 출력 변화로 인하여 광 전력 손실 및 채널

간 간섭이 발생하게 되며 이는 통신 품질의 저하를 초래한다. 따라서 WDM 광 네트워크에서는 발진파장의 안정화가 필수적이다. 한편 국제전기통신협회 (ITU-T)에서는 각 WDM 채널에 대한 발진파장을 아래 표 1과 같이 권장하고 있으며, 파장 간격으로서 100GHz(0.8nm)를 권고하고 있다.^[1-3]

표 1. ITU-T 권고안

λ [nm]	ITU Freq.[THZ]	Wavelength code
:	:	:
1551.721	193.2	19320
1552.524	193.1	19310
1553.329	193.0	19300
1554.134	192.9	19290
:	:	:

* 강원대학교 전자공학과 (rudm1@naver.com), ** 강원대학교 전기전자정보통신공학부 광통신 실험실 (jeom@kangwon.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-03-098, 접수일자 : 2005년 3월 8일

※ 본 논문은 정보통신부 정보통신연구진흥원, 광주과학기술원 초고속광네트워크연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터, 그리고 강원대학교 EFRC, BK21, 산학협력중심대학사업단, 정보통신연구소의 일부 지원에 의해 수행되었습니다.

광통신 시스템의 송신 단에서 발진되는 레이저 파장이 안정되기 위해서는 레이저 다이오드의 온도와 공급전류가 모두 안정되어야 한다. 본 논문에서는 APC(Automatic Power Controller)와 ATC(Automatic Temperature Controller)를 통하여 레이저 발진파장을 정해진 값으로 세팅시킨 후에 발생할 수 있는 발진파장의 변화를 그림 1과 같은 마이켈슨 간섭계 구조를 이용하여 검출하고 이를 ATC로 피드백시켜 온도를 조절함으로써 발진파장을 원래의 값으로 회복시키는 방법을 제시하고자 한다.

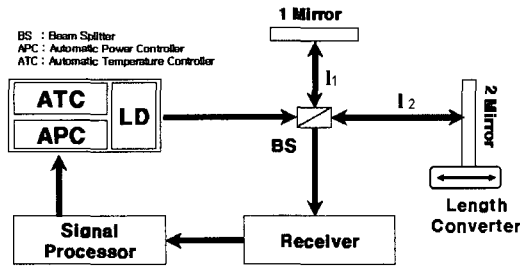


그림 1. 제안된 파장 잠금기의 구성도

II. 빛의 간섭 이론 및 기존의 파장 안정화 방법

2.1 빛의 간섭 이론

빛의 세기가 각각 I_1, I_2 이며 서로 다른 경로를 진행하는 동일 파장의 두 빛이 다시 만나게 되면, 두 빛 간의 광 경로차로 인하여 두 빛 간에 위상차(δ)가 발생한다. 이는 간섭된 빛의 총세기 I 의 증가(보강 간섭) 또는 감소(상쇄 간섭)를 야기하며 식(1)과 같이 나타내어진다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (1)$$

두 빛 간의 위상차가 0일 경우 간섭 빛의 세기는 식(2)와 같이 최대가 된다.

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (2)$$

그러나 두 빛 간의 위상차가 π 인 경우 간섭 빛의 세기는 식(3)과 같이 최소가 된다.

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (3)$$

그림 2 (a)는 위상차에 따른 빛의 간섭세기를 표시한 식(1)을 나타내는 그래프이며, 그림 2 (b)는 (a)를 시각적인 밝기로 나타낸 것이다.

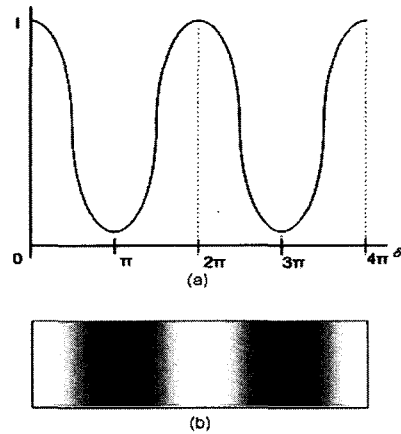


그림 2. 위상과 빛의 세기의 관계

2.2 기존의 파장 안정화 방법

파장 안정화 방법 중에서 가장 간단한 방법은 발진파장의 변화를 검출하기 위한 외부 장치를 사용하지 않고 레이저 구동 전류와 온도만을 일정하게 유지하는 것이다. 이는 가장 간단한 방법이지만 안정도에 있어서 한계가 있다.

따라서 보다 정밀하고 높은 안정도를 얻기 위해서 광섬유 격자(fiber grating), AWG(Arrayed Waveguide Grating), 에탈론 필터 등을 주파수 기준기로 사용하여 각 WDM 채널의 주파수(파장) 안정도를 향상시키는 방법들이 제안되었다. 그러나 상기 방법들 중에서 광섬유 격자는 각 광섬유 격자들의 반사 및 투과 특성이 표준 주파수에 정확히 일치되도록 제작되어야 하는 어려움이 있다. AWG를 사용한 파장 안정화 방법^[4]은 여러 WDM 채널을 동시에 안정화시킬 수는 있으나 제작된 AWG의 각 통과대역 특성이 조금씩 다르므로 각 WDM 채널의 파장 안정도가 저하될 우려가 있다. 한편, 에탈론 필터^[5]는 제작 시에 공진 길이를 조절하여 표준 주파수에 일치된 등간격의 절대 주파수들을 제공할 수 있으나 공진기 길이가 짧기 때문에 획득할 수 있는 정밀도(0.008nm)에 있어서 제한이 따른다. 그리고 위의 방법들은 모두 주변 상황변화에 대한 적절한 대응이 어렵다는 단점이 있다.

III. 제안된 시스템의 동작 원리 및 개요

3.1 제안된 파장 잠금기의 동작 원리

광통신의 광원으로는 일반적으로 단일모드 레이저 다이오드가 사용되며 보통 선폴이 1nm 이하이고 온도에 따른 발진파장의 변화는 약 0.1nm/℃이

다. 이를 구동시키는 광원 드라이버는 APC와 ATC로 구성되는데, 출력 광 전력과 온도를 설정된 값으로 유지시켜주는 APC와 ATC에 의해서 레이저 다이오드로부터 일정한 특성의 레이저 광이 출력된다. 그런데 만일 어떠한 원인으로 인하여 광원의 발진 파장이 변화하게 되면 이를 신속히 검출하여 원래의 설정된 파장으로 환원시켜야 하는데 이는 ATC를 사용하여 레이저 다이오드의 온도를 조절함으로써 쉽게 구현될 수 있다.

본 연구에서는 발진파장의 변화를 검출하기 위하여 마이켈슨 간섭계를 사용하고자 한다. 마이켈슨 간섭계는 두 팔로 구성되는데 각각 광분배기(Beam Splitter)와 제1 반사경 그리고 광분배기와 움직임이 가능한 제2 반사경으로 구성된다. 마이켈슨 간섭계에서는 두 팔간의 광 경로차가 광 수신부로 입력되는 두 광간의 위상차를 야기하며, 이 위상차의 정도에 따라 광 수신부에 흐르는 전류 또는 전압의 크기가 변하게 된다. 그림 1을 통하여 이 과정을 좀더 자세히 설명하면 레이저 광은 렌즈를 거친 후 평행 광으로 출력되며, 이 평행광은 마이켈슨 간섭계의 광분배기를 통하여 50:50으로 분배되고 분배된 광은 각각 제1 반사경과 제2 반사경으로 입사된다. 제1 반사경으로 입사된 광은 제1 반사경에 의해 반사되어 입사경로와 동일한 경로를 거친 다음 다시 광분배기를 통하여 광 수신부로 입사된다. 제2 반사경으로 입사된 광은 제2 반사경에 의해 반사된 후에 입사된 경로를 통하여 광 수신부에 입사된다. 위의 두 광은 광분배기를 통과한 후에 서로 간섭을 일으키게 되며 이 간섭신호의 크기에 비례하는 전류가 광 수신부로부터 생성된다.

그런데 간섭계에서는 제1 반사경과 제2 반사경간의 광 경로차뿐만 아니라 간섭계로 입사되는 입력 광의 파장이 변화되어도 광 수신부로 들어오는 두 광 간의 위상차가 변화되어 광 수신부에서의 출력 전압 또한 변하게 되며, 이를 이용하여 파장 변화를 검출할 수 있다.

3.2 발진파장과 간섭신호 위상과의 관계

이래에서는 발진파장의 변화와 이로 인한 간섭신호의 위상변화 관계를 살펴본다. 광분배기로부터 두 반사경까지의 거리가 각각 l_1 과 $l_2(l_2 > l_1)$ 일 때, 발진 파장이 λ_0 에서 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 로 변화함으로써 두 경로간 위상차가 π 가 되었다고 가정하자. 이때 발진파장의 변화량 $\Delta\lambda$ 는

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{4(l_2 - l_1) - \lambda_0} \approx \frac{\lambda_0^2}{4(l_2 - l_1)} \quad (4)$$

(λ_0 : 기준 파장, l_1 : 거리 1, l_2 : 거리 2)

와 같이 주어진다. 위상차 π 를 야기하기 위한 파장 변화량 $\Delta\lambda$ 와 거리차 $\Delta l (= l_2 - l_1)$ 과의 관계를 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 에 대하여 그래프로 나타내면 그림 3과 같이 된다.

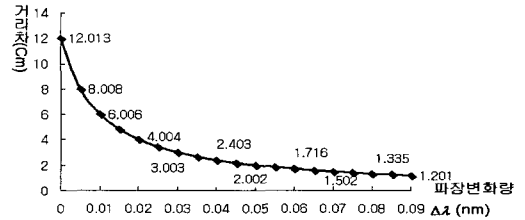


그림 3. 위상차 π 를 야기하기 위한 파장 변화량과 거리차와의 관계

한 예로서 그림 3에서 거리차 $\Delta l = 6 \text{ cm}$ 일 때 위상차 π 를 야기하는 파장변화량 $\Delta\lambda$ 는 0.01 nm 가 된다. 이는 광 수신부의 출력전압을 최대에서 최소(또는 역)로 변화시키는 파장변화량을 나타낸다. 따라서 만일 최대와 최소 출력 전압간의 분해능이 $1/10$ 으로 주어지면 파장 정밀도는 $0.001 \text{ nm} (= 124.8 \text{ MHz})$ 이 되며, 분해능이 $1/20$ 이라면 $0.0005 \text{ nm} (= 62.4 \text{ MHz})$ 이 됨을 알 수 있다. 이로부터 본 논문에서 제안된 파장 잠금 구조의 파장 정밀도는 0.0005 nm 보다 더 좋을 수 있음을 알 수 있다.

3.3 제안된 파장 잠금기의 동작 절차

제안된 파장 잠금기의 동작 절차는 다음과 같다. WDM 시스템에 적용하여 레이저 다이오드를 처음 ON 시킬 때 일단은 간섭계의 한 쪽 팔 길이를 조정하는 모드로 진입한다. 이는 주위의 환경변화로 인하여 길이 변화등 파장 잠금 시스템에서의 물리적인 변형이 존재할 수 있기 때문이다. 이 경우 원하는 기준출력을 얻을 때까지 간섭계의 한 쪽 팔 길이를 조정함으로써 변형된 간섭계 파장특성(스펙트럼)을 원래의 모습으로 교정할 수 있다. 이렇게 하여 주위 환경변화에 대한 보정이 끝난 후에는 다음 장에서 설명되는 바와 같이 한 쪽 팔 길이를 등속으로 가변시킴으로써 기준파장으로부터 발진파장의 광대역 천이여부를 확인 할 수 있다. 이처럼 초기 세팅 과정이 끝나면 팔 길이 가변을 멈추고 고정된 팔 길이를 유지함으로써 본격적인 파장 잠금 기능으로 진입하게 된다.

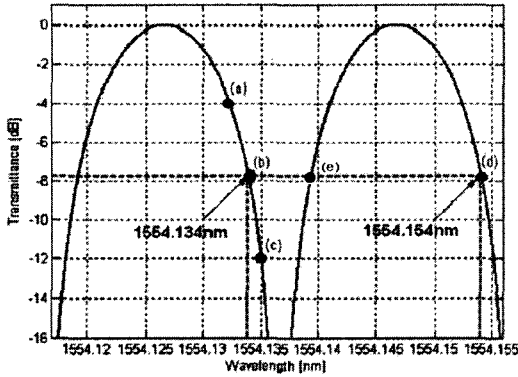


그림 4. 마이켈슨 간섭계의 파장 특성

IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 4는 본격적인 파장 잠금 기능을 위하여 간섭계 두 팔간의 거리차를 6cm로 고정하였을 때 발진파장의 변화에 따른 간섭신호 세기의 변화를 보여주는 스펙트럼이다. 그림 4 (b)의 위치가 원하는 채널의 기준 파장 및 기준 출력 값을 나타낸다고 가정하자. 만일 어떠한 변동으로 인하여 발진파장이 그림 4 (a) 또는 (c)지점으로 변하게 되면 광수신기 출력 값은 (b)지점에 대하여 상대적으로 높아지거나 낮아지게 되고 이를 검출하여 신호처리를 거친 후 LD 드라이버의 온도를 제어하여 다시 (b)의 위치로 환원시킨다.

지금부터는 마이켈슨 간섭계의 가변 팔을 활용하는 방법을 살펴보고자 한다. 시스템을 처음 동작시키기 위하여 레이저 광원을 ON시킬 때에 레이저 모듈의 비정상적인 동작 등으로 인하여 발진파장이 할당된 고정값(예를 들면 그림 4 (b)의 1554.134 nm)을 크게 벗어나 다른 대역의 파장(예를 들면 그림 4 (d)의 1554.154nm)으로 동작하는 경우를 생각해 볼 수 있다. 하지만 그림 4에서 볼 수 있는 것처럼 이때도 여전히 기준 출력 값과 동일한 출력이 얻어진다. 본 구조에서는 이를 해결하기 위하여 한 쪽 팔의 등속 운동시 일정한 주파수를 가지는 정현파 간섭신호가 얻어진다는 특성을 이용하였다. 양 팔의 거리차를 최대 6cm로 하고 가변 팔을 2cm/s의 속도로 등속도 왕복 운동시키면 기준파장(1554.134 nm)과 오류파장(1554.154nm) 각각에 대한 간섭신호는 시뮬레이션을 통하여 그림 5에서 보이는 것처럼 서로 다른 주파수를 가지는 정현파로 나타난다. 그림으로부터 첫 출발시점에서의 위상 값은 서로 동일하더라도 약 1.5초 후에 두 정현파 간섭신호 간

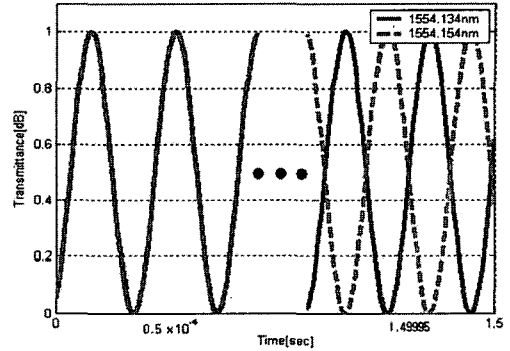


그림 5. 두 파장에 대한 이동시간대 간섭신호의 위상변화

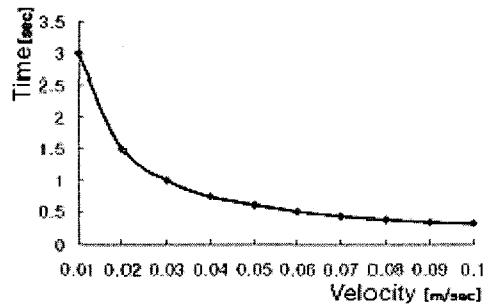


그림 6. 가변 팔의 속도 대 위상차 π 가 얻어지는데 소요되는 시간

에는 π 만큼의 위상차가 나는 것을 알 수 있다. 이때 모든 손실은 무시하였다.

그림 6은 간섭계에서 가변 팔의 속도를 변화시킬 때 위 두 파장의 정현파 간섭신호간에 π 만큼의 위상차가 나는데 걸리는 시간을 보여주는 그래프이다. 만일 두 파장간의 간격이 더 좁을 경우(그림 4 (b)와 (e)에는 π 만큼의 위상차가 나는데 걸리는 소요시간이 더욱 길어질 것이다.

위에서 언급된 것처럼 팔 길이를 등속운동으로 가변시킬 때 파장에 따라 정현파 간섭신호의 주파수 또는 위상이 달라지는 것을 확인하기 위하여 그림 7과 같은 실험을 수행하였다. 그림 7은 파장이 각각 1551.4nm와 1552.8nm인 두 광원을 2x2 3dB 커플러로 결합시켜 마이켈슨 간섭계로 입사되는 광원으로 사용하고 있음을 보여준다. 먼저, 가변 팔을 0.3mm/s의 속도로 등속 왕복운동시킬 때 두 파장의 간섭신호들의 합을 구하는 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 그림 8 (a)에 보였다. 또한 시뮬레이션과 동일한 파장들과 동일한 속도하에서 그림 7처럼 실험한 결과를 그림 8 (b)에 보였다. 그림 8로부터 두 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이로부터 팔 길이가 고정된 간섭계에서 두 파장이 동일한

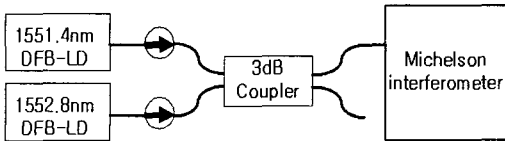
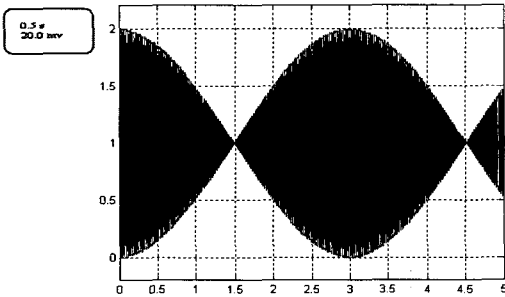
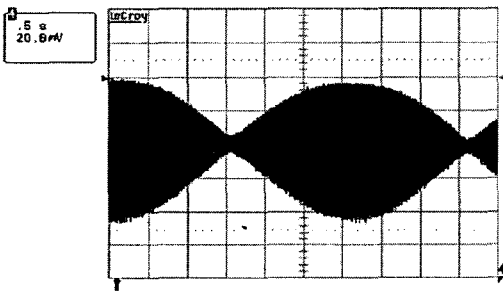


그림 7. 파장에 따른 간섭신호의 위상차 실험 구조



(a) 시뮬레이션 결과



(b) 실험결과

그림 8. 두 파장에 대한 간섭 신호의 합을 보여주는 시뮬레이션과 실험 결과

출력전압을 나타내다할지라도 두 파장간격이 충분히 크다면 (이론적으로는 파장 잠금기의 분해능(0.0005 nm)보다 크다면) 간섭계의 한 쪽 팔을 등속 왕복 운동시킬 경우 각 파장에 대한 정현파 간섭신호의 주파수가 달라짐을 확인할 수 있다.

따라서 그림 5에서 보인 것처럼 두 파장의 정현파 간섭신호간에 π 만큼의 위상차가 나는 시점을 적절히 설정한 후에 팔 길이를 등속으로 가변 시키면서 이 시점에서 간섭신호를 샘플링하면 이로부터 그림 4 (b)와 (d)에서 보인 것과 같은 발진파장의 광대역 천이 여부를 알 수 있다. 이처럼 본 논문에서 제안된 구조는 0.0005nm(=62.4MHz)이하의 뛰어난 파장 안정 정밀도를 제공하며 팔 길이 가변성을 이용하여 시스템 세팅시 주위의 환경변화로 인한 간섭계 출력 스펙트럼의 변동을 교정할 수 있다. 뿐만 아니라 위에서 보여진 것처럼 같은 발진파장

의 파장 광대역 천이 여부 검출 기능을 제공한다.

V. 결론

광 네트워크에서 WDM 방식을 적용할 때 파장의 안정성 결여로 인하여 통신시 오류가 발생하는 것을 막기 위하여 광원부에는 파장 잠금 기능이 필요 요구된다.

본 논문에서 제안한 마이켈슨 간섭계를 사용하는 구조는 0.0005nm(=62.4MHz) 이하의 정밀한 파장 잠금 성능을 제공할 수 있다. 그리고 처음 동작을 위하여 레이저 광원을 ON 시킬 때에 간섭계의 팔 길이 가변성을 이용하여 주위 환경변화로 인한 파장 잠금 시스템의 출력 스펙트럼 변동에 능동적으로 대처 할 수 있다. 나아가 레이저 모듈의 비정상 동작 등으로 인하여 다른 대역의 파장으로 발진하면서도 기존 출력 값과 동일한 광 세기가 모니터링 되는 경우에도 마이켈슨 간섭계의 한쪽 팔을 등속 운동 시킴으로써 발진 파장의 광대역 천이 여부를 검출할 수 있다. 이로부터 제안된 구조는 기존의 구조보다 더욱 정밀하고 안정된 파장 잠금 기능을 제공할 수 있다.

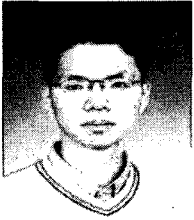
참고 문헌

- [1] G. Vareile, et al., "Terabit transoceanic system assessment with industrial margins using 25GHz channel spacing and NRZ format," in Optical Fiber Communication 2002, paper WP6
- [2] K. J. Park, S. K. Shin, H. C. Ji, H. G. Woo, and Y. C. Chung, "A multi-wavelength locker for WDM system," in Optical Fiber Communication Conference 2000, vol. 2, pp.73-75
- [3] D. M. Adams et al., "Module-packaged tunable laser and wavelength locker delivering 40mW of fiber-coupled power on 34 channels," Electron Letters, vol. 37, pp.691-693, 2001
- [4] G.E. Shtengel, R.F. Kazarinov, and L.E. Eng, "Simultaneous laser wavelength locking and spectral filtering using fiber Bragg Grating," in Int. Semiconduct. Laser Conf., Nara, Japan, 1998, pp. 269 - 270.

- [5] J. H. Jang et al., "A cold-start WDM system using a synchronized etalon filter," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 9, no. 3, pp.383-385, 1997

박 경 수 (Kyoungsu Park)

준회원



2003년 8월 강원대학교 전기
전자정보통신공학부 전기전자
전공(공학사)

2003년~현재 강원대학교 대학
원 전기공학과(공학석사)

<관심분야> 광통신, 광교환, 광
소자

엄 진 섭 (Jinseob Eom)

정회원



1982년 2월 서울대학교 전자공
학과 (공학사)

1984년 2월 서울대학교 대학원
전자공학과(공학석사)

1990년 12월 미국 Texas A&M
University 전기공학과(공학박
사)

1991년~1992년 한국통신 선임연구원

1992년~현재 강원대학교 전기전자정보통신공학부
정교수

<관심분야> 광통신, 광교환, 광소자