論文95-32A-8-16

광섬유 파브리-페로 필터를 이용한 4채널 광주파수 다중화

(4-channel optical frequency division multiplexing using the fiber Fabry-Perot filter)

柳 甲 烈 *, 朱 武 楨 *, 朴 昌 洙 *

(Gap Youl Lyu, Moo Jung Chu, and Chang Soo Park)

요 약

본 논문에서는 100GHz의 자유분광너비(free spectral range,FSR)를 갖는 광섬유 파브리-페로 필터의 연속된 공진주파수에 4개의 반도체레이저들의 중심 주파수 및 주파수 간격을 안정화시키는 실험결과를 기술하였다. 이때 각 채널 당 중심 주파수 변화폭은 15MHz 이하이고 주파수 잠김범위(locking range)는 12GHz 이상이었다. 이 실험에서 오차신호 발생용으로 사용한 광신호는 광섬유 파브리-페로 필터의 반사광을 이용함으로써 소광비를 높이고, 투과광을 이용한 경우보다 수용가능한 채널의 수를 증가시킬 수 있는 새로운 방법을 제시하였다.

Abstract

In this paper, the frequency separation locking and interval stabilization of 4-channel DFB-LDs have been demonstrated using a fiber Fabry-Perot filter with an free spectral range of 100GHz. Frequency fluctuation and locking range of each channel were appeared to be within 15MHz and over 12GHz, respectively. Back-reflection curve from the fiber Fabry-Perot filter was used for the extraction of an error signal in order to increase the number of accomodable channels and extinction ratio.

I. 서 론

광전송시스템에서 전송용량을 늘리는 방법으로 기본 전송률(bit-rate)을 높이거나 광주파수 영역에서 다중기술을 이용하는 방법 등이 있다. 특히, 전송시스템에서 사용되는 전자소자 및 광소자의 대역한계(현재 상용화된 소자의 한계로는 20Gb/s 이하) 때문에 광주파수 다중기술(optical frequency division multiplexing, OFDM)은 수백 Gb/s 이상의 대용량 전송시스템을 구현하는데 효과적인 기반기술로 선호되고 있다[1,2]. 현재 채널당 비트율은 10Gb/s 까지 가능하며, 채널다중 수는 원하고자 하는 전송용량에 따라 10 채널 이상도 가능하다.

광주파수다중기술은 서로 다른 광주파수를 갖는 광원으로부터 나오는 빛을 독립적인 신호로 변조시켜 다중화시킨 후 전송하는 방식으로 초기에는 830nm 와 1300nm의 파장을 이용하여 2 채널 다중화하여 전송하였으나, 선폭이 좁고 주파수 안정도가 뛰어난 MQW (multi-quantum well) DFB-LD(distributed feedback laser diode)의 출현으로 광섬유의 손실이 낮고 주파수 특성이 평탄한 1550nm 영역의 채널 다

* 正會員, 韓國電子通信研究所 光波通信研究所
(Elec. and Tele. Research Institute, Lightwave Comm. Section)

接受日字:1994年12月29日, 수정완료일:1995年7月29日

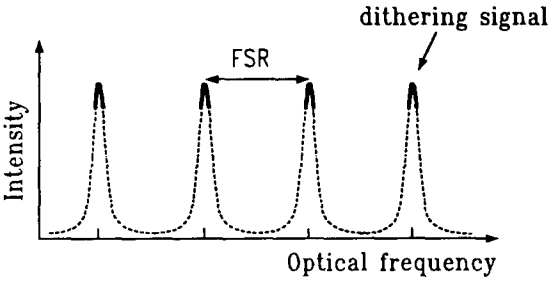
중화가 연구되기 시작하였고, 광원의 파장을 가변시킬 수 있는 다전극 DFB 또는 DBR(distributed Bragg reflector) LD의 개발로 수십에서 수백 채널의 다중화 전송이 가능하게 되었다.

광주파수 다중방식은 광섬유가 갖고 있는 광대한 대역폭(1550nm 영역에서 30THz 이상)을 충분히 활용할 수 있으며, 광섬유 증폭기와 결합하여 광주파수별로 할당된 채널들의 독립성을 상실함이 없이 증폭 및 전송할 수 있기 때문에 수백 Gbps이상의 초대용량 전송과 장거리 전송시스템에 적합한 방식이라 할 수 있다. 더우기 이러한 시스템은 기존의 시스템으로부터 나오는 고속의 광신호를 광주파수 다중방식으로 묶어 한가닥의 광섬유를 통해 전송할 수 있으므로 용량이 포화된 전송구간에서 이미 포설된 광전송로의 개수나 증설없이 기존 시스템과 결합하여 전송용량을 늘릴 수 있는 최적 시스템이라 할 수 있다. 또한, 채널간의 독립성은 디지틀 및 애널로그 신호를 동시에 주파수 다중화 하여 결합/전송하는 것을 가능케하므로 다양한 형태의 서비스가 요구되는 광가입자망에서의 활용도가 클것으로 예상된다.

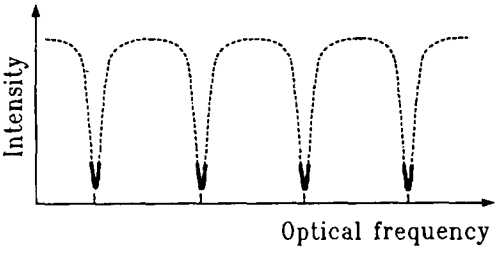
본 논문에서는 OFDM의 관련기술 중 기본기술에 해당하는 광주파수 다중화에 관한 실험을 수행하였다. 1550nm 영역에서 발진하는 4채널용 DFB-LD의 중심 주파수를 100GHz의 자유분광너비를 갖는 광섬유 파브리-페로 필터(fiber Fabry-Perot filter)의 연속된 공진주파수와 일치시킴으로써 채널의 중심 주파수는 물론 채널 주파수 간격을 동시에 안정화 시킬 수 있는 소형 안정화장치의 구현 가능성을 제시하였다. 또한 이 실험에서 광섬유 파브리-페로 필터의 반사광을 오차신호(error signal) 발생용 광신호로 이용함으로써, 투과광을 이용한 경우보다 수용가능한 채널수를 증가시킬 수 있는 새로운 방법을 제시하였다.

Ⅱ. 반사광을 이용한 광주파수 다중화

파브리-페로 공진기를 이용한 단일 채널의 광주파수 안정화실험의 경우 오차신호를 발생시키기 위하여 투과광을 이용하는 것이 일반화 되어 있고[3], 또한 기존의 파장다중화(wavelength division multiplexing, WDM) 및 OFDM의 다채널 광주파수 다중화의 경우도 채널의 간격 및 광주파수 안정화를 위하여 공진기의 연속된 투과광을 이용해왔다[4,5]. 그림 1(a)처럼 공진기를 투과한 광원의 출력은 에어리(Airy)함수를 띄고, 입사한 광원의 광주파수가 공진기의 공진주파수에 일치하면 최대가 되며, 일치하지 않으면 투과 출력은 줄어들게 된다.



(a)



(b)

그림 1. 파브리-페로 공진기의 (a) 투과광 및 (b) 반사광

Fig. 1. (a) Tansmitted light and (b) reflected light of the Fabry-Perot cavity.

따라서 공진기로 투과되어 광검출기(photodiode, PD)로 받은 광원의 출력이 항상 최대가 되도록 광주파수 안정화용 조절기를 이용하여 광원의 중심주파수(또는 중심캐리어)를 조정시켜 주면 각 광원의 광주파수들은 광섬유 필터의 연속된 공진주파수에 놓이게된다. 공진되어 투과하는 광출력은 채널의 수 만큼 증가하게 되므로, 채널 수가 많아지는 경우 광검출기를 포화시켜 다중채널 수를 제한한다. 그러나 그림(b)처럼 공진될 때 반사 광신호는 공진기로 입사한 광에서 공진되어 투과한 광신호와 공진기 손실을 제외한 것과 같으므로 dc 광세기 성분을 제거하면서 투과신호의 특성을 유지하게 되고, 따라서 투과광을 이용할 경우 보

다 반사광을 이용할 때, 채널당 광출력이 상대적으로 줄어들어 수용할 수 있는 채널의 수를 늘릴 수 있는 최적의 방법이 된다. 본 실험은 공진기 반사 곡선의 최소점 근방에서 광주파수를 수 kHz 범위로 흔들어(dither) 주고, 이를 위상에 민감한 검출(phase sensitive dectection, PSD)방법을 사용하여 검출한 후 안정화시키는 방법으로 이때 PSD에 입력되는 reference의 위상은 투과곡선을 이용한 위상보다 π 만큼 차이가 난다.

Ⅲ. 실험 장치 및 방법

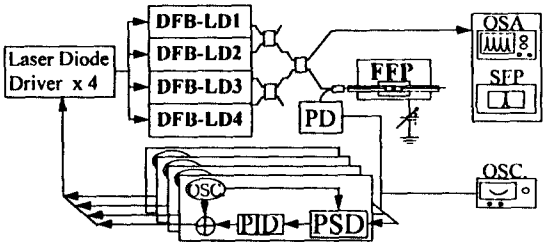


그림 2. 4 채널 광주파수 다중실험 장치
Fig. 2. Block diagram of experimental setup for 4-channel optical frequency division multiplexing.

그림 2는 4채널 광원을 동시에 등간격으로 광주파수 안정화시키기 위한 실험장치이다. 여기서 사용한 4개의 DFB-LD는 2.5Gbps 전송용으로 열전냉각기(thermoelectric cooler, TEC), 써미스터(thermistor), 광고립기(optical isolator)가 내장되어 있으며, 핀 배열의 모양은 나비(butterfly) 형태로 되어 있다. 레이저의 발진파장은 각각 25° C와 25mA에서 1545.3nm, 1545.8nm, 1546.4nm, 그리고 1548.9nm 이고 선폭은 각각 25MHz 정도이다. 독립된 4개의 레이저의 주입 전류 및 온도를 각각 수 uA, 수 mK 이내로 안정화시키기 위하여 전류 및 온도조절기가 사용되었고, 전류 및 온도를 조절함으로써 중심파장을 원하는 파장에 맞추었다. 이때 사용된 DFB-LD의 전류및 온도에 대한 중심주파수 변화량은 각각 -330MHz/mA, -11GHz/° C이었다. 등간격의 광주파수 채널 슬롯 발생과 채널당 STM-64(synchronous transfer module-64:10Gb/s) 신호를 수용할 수 있도록 가변형 광섬유 파브리-페로 필터(FSR:100GHz, finesse:150, 삽입손실: 9dB, Queensgate ser.# 228)를 기준공진기로 사용하였다. 슬롯에 대한 광원의 주파수 정렬과 안정화를 위한 오차신호 추출을 위해 각각의 광원의 중심주파수를 서로 다른 수 kHz의 정현파로 변조시킨 후 광출력을 2x2 광커플러 3개를 사용하여 결합하였다. 최종단의 광커플러 출력중 한가닥은 광다중된 4채널 출력으로 사용되고 다른 한 가닥은 로킹을 위한 입력으로 사용된다. 반사 출력을 얻기 위한 방법으로 광섬유필터 전단에 2 x 1 광섬유커플러를 사용함으로써 2 x 2 의 경우에 비해 사용되지 않는 출력으로 부터 되돌아 오는 프레넬(Fresenel) 반사 출력을 제거할 수 있어 잡음이 줄어드는 이점이 있다. 오차 신호추출은 광섬유 필터의 투과 출력이 아닌 반사출력을 이용함으로써 신호의 소광비(extinction ratio)를 높이면서 광 주파수 다중광원의 수를 최대로 확장할 수 있도록 구성하였다. 미세한 공진 길이 조정을 위하여 PZT (piezoelectric transducer)가 광섬유 공진기에 부착되었고 인가된 전압에 따른 공진주파수 이동 변화는 약 -17 GHz/V 이었다. 광섬유 파브리-페로 필터로 부터 dithering 신호의 추출은 수신감도를 높이기 위해 광섬유 파브리-페로 필터로 부터 반사되어 나온 신호를 사용하였다. 검출된 반사신호는 위상에 민감한 검출기능을 갖는 balanced modulator/demodulator (AD630)를 이용하여 에어리 함수의 1차 미분신호에 해당하는 오차신호로 바뀌고, 비례, 적분 및 미분기(proportion, integration & differentiation, PID) 회로를 거쳐 제어를 위한 전류로 변환된 후 각각의 광원의 바이어스에 중첩인가 된다.

Ⅳ. 실험 결과 및 논의

그림 3은 25° C에서 자유발진하는 4개의 DFB-LD의 스펙트럼(ch1~ch4)을 보인 것이고 아래 그림은 기준공진기로 사용된 FFP 필터의 투과 스펙트럼을 보인 것으로 어븀이 첨가된 광섬유 증폭기(erbium-doped fiber amplfier)의 넓은 영역에서 증폭된 자발방출(amplified spontaneous emission) 스펙트럼을 광섬유 파브리-페로에 입사하여 광스펙트럼분석기(optical spectrum analyzer, OSA)로 측정한 결과이다. 이 스펙트럼으로부터 광섬유 파브리-페로 필터의

FSR은 0.8nm (1550nm에서 100GHz) 임을 알 수 있었고, 광섬유 파브리-페로의 PZT에 인가되는 dc 전압을 조절함으로써 광섬유 파브리-페로의 인접한 투과 공진 주파수를 DFB-LD들의 중심주파수 근처로 이동할 수 있었다. 그러나 실험에 사용한 4번째 DFB-LD(ch4)는 다른 광원의 파장간격에 비교하여 멀리 떨어져 있으므로 온도조절기를 이용하여 중심파장을 이동시켰다. 그림 3에서 a, b, c와 d는 온도에 대한 파장변화 특성을 알아보기 위하여 DFB-LD의 온도를 5 ° C 간격으로 변화할 때 얻은 곡선으로 0.1 nm/° C 정도의 변화 특성을 갖고 a곡선은 온도가 15° C 일때 특성을 보여준다. 따라서 광섬유 파브리-페로의 PZT에 인가된 전압에 따른 투과 곡선의 변화와 온도변화에 따른 4개 광원의 중심파장의 변화를 관찰하여 동일 기준공진기인 광섬유 파브리-페로 필터의 연속적인 공진 반사곡선의 최저치(또는 주파수 슬롯)근처에 각각 정렬시켰다.

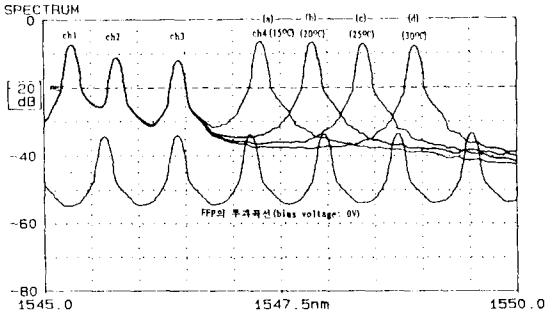


그림 3. 자유발진하는 4 채널 DFB-LD들과 광섬유 파브리-페로 필터의 스펙트럼 (여기서 채널4의 a,b,c와 d는 각각 15° C, 20° C, 25° C 와 30° C의 온도조건을 갖는다.)

Fig. 3. Spectra of free running 4-channel DFB-LDs and the fiber Fabry-Perot filter.

그림 4는 첫번째 DFB-LD의 일정한 광주파수를 광섬유 파브리-페로의 (a)투과곡선 과 (b)반사곡선에 안정화했을 때 PD로 받은 광신호이고, (c)는 광신호가 없는 상태를 오실로스코프의 X-Y 모드로 측정하였다.

여기서 X축은 DFB-LD에 광주파수를 흔들어 주기 위해 공급한 전류(광주파수의 변화,-330MHz/mA)를 나타내고, Y축은 PD로 받은 광신호의 세기를 나타낸다. 반사광의 세기(최저치에서)는 투과광의 세기(최고치)에 비교하여 대략 0.1 배 이하이고, 여기서 로킹된 상태에서 흔들어주는 폭을 최소화 할 때, 그 비율은 더욱 작아진다. 실험에서 사용된 광섬유 파브리-페로 필터에서 삽입손실이 9dB 정도이고, 2 x 1 광섬유커플러를 이용할 경우 반사광에 대하여 손실이 3dB이고, 총 피네스가 높은 필터를 사용할 때 반사광 대 투과광의 세기비는 더욱 커지므로 본 실험에 더욱 적합하다고 생각한다.

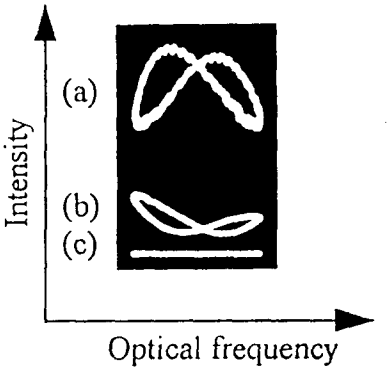


그림 4. 광주파수 로킹상태에서 (a)투과곡선, (b)반사곡선과 (c)무신호

Fig. 4. (a) Tansmitted light, (b) reflected light under optical frequency locking, and (c) no signal.

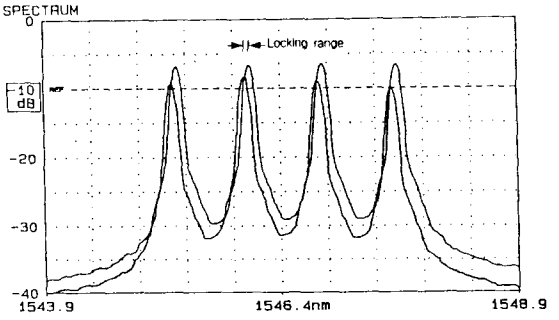


그림 5. 필터를 움직임에 따라 100GHz(0.8nm)간격으로 광주파수 로킹된 4채널 및 12GHz의 잠김범위

Fig. 5. Locking range of stabilized four DFB-LDs while the center frequency of the FFP filter is moving. Locking range is estimated to be 12GHz (~0.1nm at 1550nm).

그림 5는 광섬유 파브리-페로 필터의 FSR인 100GHz(0.8nm)간격으로 4채널 광주파수 다중된 광원의 스펙트럼을 보인 것이다.

각각 4채널 DFB-LD의 중심 광주파수는 한개의 광섬유 파브리-페로 필터의 연속된 투과 곡선위에 로킹된 상태이므로 광섬유 파브리-페로필터의 공진 주파수를 이동시킬 때 4채널의 광주파수도 동시에 이동함을 알 수 있었다. 여기서 각 채널의 광주파수가 기준공진기의 공진주파수를 추적할 수 있는 잠김범위는 0.1nm (12GHz)정도 였다. LD에 인가되는 전류나 온도를 이용하여 로킹될 경우 4채널의 DFB-LD들의 전류 및 온도 조건에 따른 파장변화를 표 1에 표시하였다.

표 1. 주입 전류 및 온도에 따른 4채널 DFB-LD들의 파장변화

Table 1. Wavelength change of 4 channel DFB-LDs according to the injection current and temperature.

채널	파장nm(최소/최대)	전류mA(최소/최대)	온도(℃)
CH1	1545.2/1545.3	27/34	24
CH2	1546.0/1546.1	40/46	26.3
CH3	1546.8/1546.9	31/39	28
CH4	1547.6/1547.7	22/29.2	17.7

이 장치의 경우 잠김범위를 제한하는 요소는 전류 및 온도 변화에 따른 광출력의 변화임을 알 수 있었다. 잠김상태에서 DFB-LD의 온도를 변화시키면 광주파수가 변화하므로 자동적으로 이를 보상하기 위하여 전류가 변하게 된다. 이때 LD에 인가되는 전류가 문턱전류(threshold current)이하이면 로킹상태가 풀리게 되고, 반대로 전류가 많아지면 광원의 출력이 높아져 결국 광검출기는 포화상태가 되어 이 실험장치에서 로킹상태가 풀리게 된다. 이 실험장치를 최적의 상태로 만들기 위해서는 온도, 전류, 궤환회로의 조건 등을 종합적으로 고려해야 할 것으로 생각된다.

그림 6은 그림 4의 네번째 채널이 광섬유 파브리-페로 필터의 연속된 임의의 공진주파수에 로킹된 스펙트럼을 보여준다. 이 결과는 어떠한 광원도 인접한 광원의 광주파수 채널과 관계없이 로킹될 수 있음을 보여준다. 그림에서 채널 1, 채널 2와 채널 3 의 스펙트럼이 변화하는 이유는 기준공진기로 사용한 광섬유 파브리-페로 필터의 온도특성이 측정 시간에 따라 변화하기 때문이라고 생각되며, 따라서 장기 안정도를 유지하기 위해서는 원자나 분자의 흡수선을 이용한 절대광원[6]으로 다시 기준공진기를 안정화시키는 것이 필요하다.

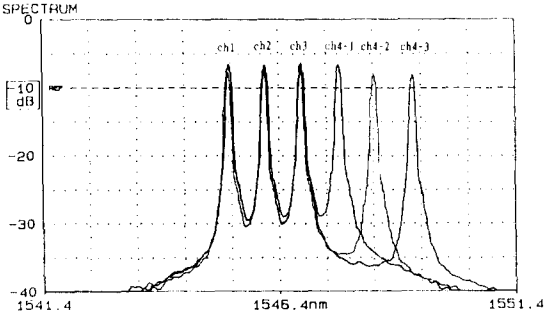


그림 6. 광섬유 파브리-페로 필터에서 연속된 공진주파수에 로킹된 스펙트럼

Fig. 6. Locking spectra of DFB-LDs with 100GHz interval using the fiber Fary-Perot filter.

그림 7은 첫번째 채널에 해당되는 광원의 중심주파수 변화를 보인 것으로 (a) 부분은 로킹되기 전의 자유발진(free running) 상태이며 (b)는 로킹된 상태의 주파수 변화를 보인 것으로 15MHz 이내의 안정도를 유지하고 있다.

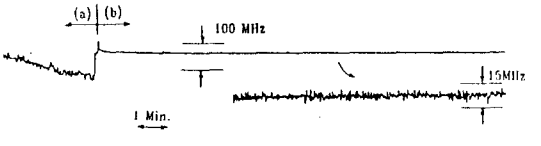


그림 7. 채널 1의 광주파수 변화

Fig. 7. Recorder traces of frquency fluctuation for the first channel.
(a) a free running laser
(b) a stabilized laser

여기서 각채널의 주파수 안정도는 광섬유 파브리-페로의 공진주파수의 안정도에 의존하므로 분자나 원자 개스를 이용한 절대기준광을 이용하여 광섬유 파브리-페로의 공진주파수를 안정화시키는 연구와 기준광원을 광통신용 광동기원으로 이용하는 연구가 필요할 것으로 본다.

V. 결 론

광주파수 흔들어 줌(dithering) 방식과 광섬유 파브리-페로 필터를 이용하여 4채널 로킹시스템을 구성하였으며, 각각의 중심주파수를 100GHz 간격으로 4채널 다중화시켰다. 오차 신호추출은 광섬유 필터의 투과 출력이 아닌 반사출력을 이용함으로써 신호의 소광비를 높이고 광 주파수 다중광원의 수를 최대로 확장할 수 있도록 구성하였다. 이때 광섬유 파브리-페로 필터의 공진 광주파수를 이동함에 따라 각 슬롯으로 4개 광원의 광주파수가 동시에 이동되어 각각의 인접한 공진주파수에 로킹됨을 알 수 있었고, 채널 중심주파수는 15MHz 내의 안정도를 갖고 잠김범위는 12GHz(~0.1nm)정도였다.

감사의 글

※ 이 연구는 HAN/B-ISDN 사업의 일환으로 수행되었고, 도움을 주신 이만섭 박사님께 감사드린다.

참 고 문 헌

[1] K. Nosu, H. Toba, and K Iwashitu, "Optical FDM transmission technique," *J. Lightwave Technol.*, vol.LT-5, pp. 1301-1308, 1987.

[2] N. K. Cheung et al.,"Dense wavelength division multiplexing techniques for high capacity and multiple acess communication systems," *IEEE J. select. Areas commun.*, vol.8, pp.945-1215, 1990.

[3] H. Tsuchida and Y. Mitsuhashi, "Frequency stabilization of a modulated semiconductor laser," *Electron. Lett.*, vol.23, pp.1147-1148, 1987.

[4] Pie-Yau Chien and Ci-Ling Pan, "Relative frequency stabilization of a set of laser diodes using the time-gating technique," *Optics commun.*, vol.83, pp. 81-84, 1991.

[5] B. Glance, P. J. Fitzgerald, K.J. Pollack, J. Stone, C. A. Burrus, G. Eisenstein, and L. W. Stulz, "Frequency stabilization of FDM optical signals," *Electron. Lett.*, vol.23, pp.750-752, 1987.

[6] Sudo, S., Sakai, Y., Yasaka, H., and Ikegami, T., "Frequency stabilization of 1.55 m DFB laser diode using vibrational-rotational absorption of 13C2H2 molecules," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.1, pp. 392-394, 1989.

저 자 소 개

柳 甲 烈(正會員)

1961年 2月 20日生. 1987年 2月 서강대학교 물리학과 졸업(이학사). 1989年 8月 서강대학교 물리학과 졸업(이학석사). 1993年 2月 서강대학교 물리학과 졸업(이학박사). 1993年 5月~현재 한국전자통신연구소 광파통신연구실 선임연구원. 주관심분야는 레이저의 광주파수 안정화, 광증폭, 광전자 소자, 광통신시스템 등임.

朴 昌 洙(正會員)

1955年 1月 1日生. 1979年 2月 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1981年 2月 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1990年 12月 Texas A&M Univ.(Texas) 전기전자공학과 졸업(공학박사). 1982年 7月 ~ 현재 한국전자통신연구소 광파통신연구실장, 책임연구원. 주관심분야는 레이저 다이오드 응용, 광통신시스템 설계, 마이크로파 응용을 위한 광전변환 등임.

朱 武 楨(正會員)

1958年 2月 6日生. 1980年 2月 연세대학교 물리학과 졸업(이학사). 1982年 2月 KAIST 물리학과 졸업(이학석사). 1985年 2月 KAIST 물리학과 졸업(이학박사). 1985年 3月 ~ 현재 한국전자통신연구소 광파통신연구실 책임연구원. 주관심분야는 비선형 광학, 광주파수 변환, 광증폭, 광통신시스템 등임.