

論文2001-38SD-10-5

Mach-Zehnder 변조기를 갖는 Sagnac 간섭기를 이용한 간단한 색분산 측정법

(A Simple Method for Chromatic Dispersion Measurement
Using Sagnac Interferometer with Mach-Zehnder Modulator)

田金洙*, 金熙周*, 姜東星*, 潘在景*

(Keum-Soo Jeon, Hee-Ju Kim, Dong-Sung Kang, and Jae-Kyung Pan)

요 약

본 논문에서는 Mach-Zehnder 변조기가 포함된 Sagnac 간섭기를 이용한 간단한 색분산 측정 방식을 제안하고, 제한한 시스템의 등가모델과 등가 전달함수를 유도하였다. 색분산은 2.235km 길이의 광섬유의 이용하여 측정하였으며 이론적인 값과 1500nm에서 1580nm의 파장 범위에서 매우 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract

In this paper we propose the simple system for measuring the chromatic dispersion of a fiber by using Sagnac interferometer with a Mach-Zehnder modulator and induce the equivalent model and the transfer function of this system. The chromatic dispersion of fibers with length of 2.235km is measured by using this method in wavelength region from 1500nm to 1580nm and we conform that the measured results had a good agreement with the theoretical results given Corning Fiber.

I. 서 론

단일모드 광섬유에서 색분산은 광섬유를 제작하거나 광통신 시스템 설계시에 매우 중요한 파라미터 중의 하나이다. 색분산 측정은 Nd-YAG/Raman 레이저를 이용한 time-of-flight 법^[1], 위상천이 법(phase-shift)^[2], 간섭을 이용한 측정법^[3] 그리고 광섬유의 전달함수를 이용한 방법^[4] 등이 발표되었다.

간섭을 이용한 방법은 매우 짧은 길이의 광섬유 (1-2m)만이 측정이 가능하기 때문에 긴 광섬유의 색분산은 파라미터의 불안정성 때문에 곤란하다는 단점을 갖는다. 매우 짧은 펄스의 광섬유 Raman 레이저를 이용한 time-of-flight 법과 위상천이 법은 긴 광섬유의 색분산 측정에 모두 사용이 가능하다. 하지만 time-of-flight 법의 측정의 정확성은 레이저와 전자회로의 불안정성, 펄스의 모양이 광파위에 민감한 특성의 단점을 갖는다. 이러한 문제가 부분적으로 해결된 논문^[5]이 발표되었지만 측정 시스템이 너무 복잡하고 부피가 크다는 단점을 가진다. 레이저 다이오드나 LED 열을 이용한 위상천이 법은 정확한 측정을 위해서는 측정용 광섬유 외에 기준 광섬유나 전기선이 필요하고 이 단점을 보완하기 위해서 파장다중화를 이용한 새로운 위상천이 색분산 측정법^{[6][7]}이 제안되었다. 하지만 이 두 방법의 단점은 온도와 전류에 매우 안정적인 레이저 다이오드를 필요로 한다는 것이다. 광섬유의 전달함수를

* 正會員, 全北大學校 電子情報工學部

(Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University)

※ 본연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-00257)지원으로 수행되었음.

接受日字:2001年3月27日, 수정완료일:2001年7月24日

이용한 방법의 단점은 측정하고자 하는 광섬유가 매우 길어야(수십 Km이상)하고 변조 주파수가 20GHz 정도의 큰 대역폭을 사용해야만 정확한 색분산을 측정할 수 있다.

그리고 최근에 Sagnac 간섭기와 위상변조기를 이용한 색분산 측정법^[8]이 발표되었다. 본 논문에서는 MZ (Mach-Zehnder) 변조기가 포함된 Sagnac 간섭기와 회로망 분석기만을 이용하여 짧은 길이의 광섬유에서 긴 길이의 광섬유까지 정확한 해상도를 갖는 간단한 색분산 측정 방식을 제안한다. 본 논문에서 제안한 측정 방식에서는 부가적인 보상이나 기준을 위한 전자회로나 광섬유와 필요하지 않기 때문에 측정 시스템이 매우 간단하고, 광손실이나 출력파워가 변화가 측정결과에 영향이 미치지 않고 측정시 기계적인 조작이 불필요하기 때문에 재현성 있는 측정이 가능하다. 그리고 광섬유의 절대 지연시간을 직접 측정할 수 있어 dip이 발생하는 주파수를 찾는 방법보다 정확한 측정결과를 얻을 수 있는 장점을 가진다.

II. 측정원리

그림 1은 본 논문에서 제안하는 색분산 측정 시스템을 보이고 있다. 파장가변 레이저(tunable laser : TL)에 의해 공급된 광은 광섬유 3dB 결합기에 의해 MZ 변조기와 측정용 광섬유(fiber under test : FUT)가 삽입된 Sagnac 간섭기를 시계 방향으로 반시계 방향으로 진행하게 된다. 서로 반대 방향으로 진행하는 광은 다시 결합기에 의해 합해지고 서클레이터를 통해서 PD에 수신되고 회로망 분석기를 이용하여 전달함수를 측정한다. 간섭기 내부에 MZ 변조기를 삽입하여 시계 방향으로 진행하는 광은 RF신호에 의해 MZ 변조기의 순방향(설계

된 입력단자에 광이 입사됨) 변조되고 반시계 방향으로 진행하는 광은 RF신호에 의해 MZ 변조기의 역방향(설계된 출력단자로 광이 입사됨) 변조된다.

그림 1의 MZ 변조기가 삽입된 Sagnac 간섭기의 변조과정은 등가적으로 그림 2와 같이 생각할 수 있다. 그림 1에서 시계방향으로 진행하면서 변조되는 광은 그림 2에서 위 부분에 해당하고 반시계 방향은 그림 2의 아래부분에 해당된다. 따라서 두 개의 MZ 변조기가 있는 것으로 생각할 수 있다. 여기에서 사용된 변조기는 진행파형 MZ 변조기이며 그림에서 MZ 변조기 내부의 화살표 방향은 진행파형 MZ 변조기가 설계된 입력 방향을 나타내며 화살표 방향으로 광이 입력되면 순방향 변조를 하게된다. 따라서 시계 방향으로 진행하는 광은 RF와 같은 방향으로 진행하는 순방향 변조가 되고 반시계 방향으로 진행하는 광은 RF와 광이 서로 반대로 진행하는 역방향 변조 상태가 된다. 일반적으로 진행파형 MZ 변조기는 주파수가 낮을 때 순방향이나 역방향의 경우 비슷한 변조특성을 보이고, 주파수가 증가하면 순방향에 비해 역방향의 변조 특성이 -15dB 이하로 떨어지는 특성을 보인다.

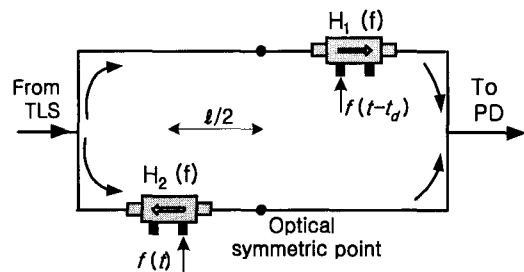


그림 2. MZ 변조기의 양방향 변조를 이용한 Sagnac 간섭기의 등가모델

Fig. 2. The equivalent model of Sagnac interferometer using bidirectional modulation of a MZ modulator.

광학적인 관점에서 반대 방향으로 진행하는 두 광은 동일한 경로를 진행하므로 광전력 분배기에서 상호 결합하면서 보강간섭을 일으키게 된다. 그러나 RF 주파수 영역에서 살펴보면 MZ 변조기의 위치에 따라 변조 특성이 크게 변하게 된다. 그림 2에서 시계 방향으로 진행하는 광은 간섭기의 비대칭 길이에 해당하는 t_d 만큼 지연된 $f(t-t_d)$ 신호에 의해 변조되고, 반시계 방향으로 진행하는 광은 $f(t)$ 에 의해 변조된다. 따라서 Sagnac

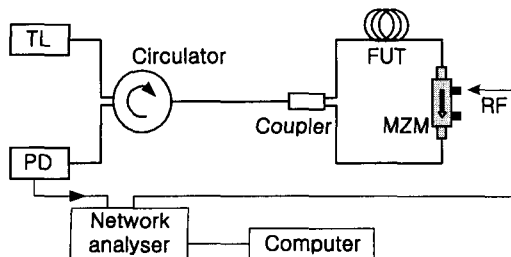


그림 1. 제한된 색분산 측정 시스템
Fig. 1. A proposed chromatic dispersion measurement system.

간섭기에서 MZ 변조기의 양방향 변조에 의해 변조된 출력 신호는 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} C(f) &= e^{-j2\pi f t_d} F(f) H_1(f) + F(f) H_2(f) \\ &= F(f) [e^{-j2\pi f t_d} H_1(f) + H_2(f)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 $H_1(f)$ 는 MZ 변조기의 순방향 변조의 전달함수이고 $H_2(f)$ 는 MZ 변조기의 역방향 변조의 전달함수를 나타낸다.

식 (1)에서 Sagnac 간섭기의 전체 등가 전달함수는 식 (2)와 같다.

$$H(f) = e^{-j2\pi f t_d} H_1(f) + H_2(f) \quad (2)$$

만약 그림 2에서 MZ 변조기의 위치가 대칭되는 위치에 있고 두 MZ 변조기의 전달함수, 즉 순방향과 역방향 전달함수는 동일하다고 가정한다면, 전체 전달함수 식 (2)는 식 (3)과 같다.

$$H(f) = H_1(f) + H_2(f) = 2H_1(f) \quad (3)$$

그러나 MZ 변조기가 대칭되는 위치에 있지 않을 경우는 그림 2에서 보는 것처럼 한 쪽 변조기의 출력은 다른 쪽에 비해 t_d 만큼 지연된 신호에 의해 변조된다. 식 (2)에서, t_d 는 그림 2의 위 부분과 아랫부분의 RF 신호의 경로차에 의한 시간 지연을 나타내고 있으며, 식 (4)와 같은 관계를 갖고 있다.

$$t_d = \frac{l}{v} = \frac{n_{\text{eff}} l}{c} \quad (4)$$

여기에서 l 은 광경로차에 해당하는 광섬유의 길이이고, n_{eff} 는 광섬유 내에서 광이 느끼는 유효굴절률, c 와 v 는 각각 진공과 파이버 내에서 빛의 속도이다. 그림 3은 $H_1(f)$ 와 $H_2(f)$ 가 동일한 경우 대칭점에서 어긋난 정도 l (지연시간 t_d)에 따른 전달함수 $(1 + e^{-j\omega t_d})$ 의 크기를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 MZ 변조기의 위치가 대칭에서 벗어나는 경우 전달함수에서 ripple이 발생하고 대칭에서 벗어난 정도, 다시 말해 지연시간이 증가하면 ripple의 주기가 감소함을 알 수 있다. 즉 지연시간과 ripple의 주기는 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 역으로 ripple의 주기를 알면 광섬유의 비대칭 길이에 해당하는 지연시간을 측정할 수 있다.

식 (2)에서 전달함수 $H_1(f)$ 와 $H_2(f)$ 가 동일하지 않은 경우에는 전체 전달함수 $H(f)$ 의 크기는 변하게 되지만 지연에 의해 발생한 전달함수 ripple의 주기는 변하지 않는다.

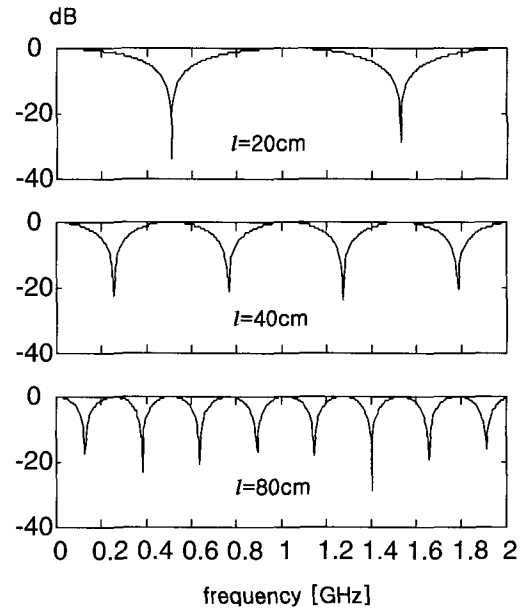
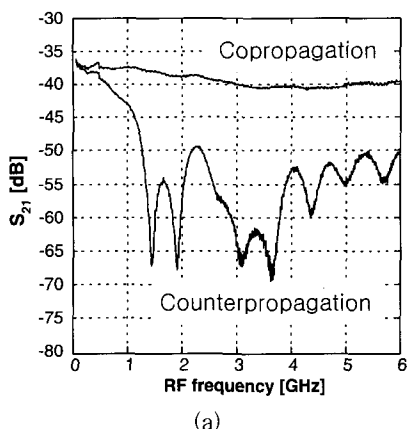


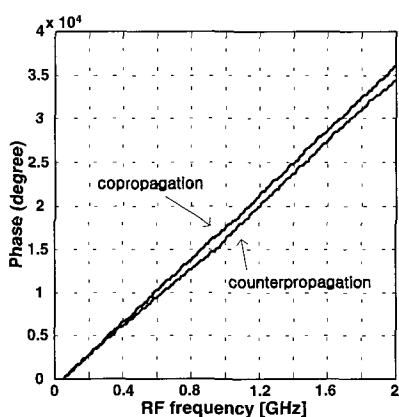
그림 3. 광경로차에 의한 전달함수 특성

Fig. 3. Transfer characteristics for optical path differences.

이러한 원리를 이용하여 색분산을 측정할 수 있다. 광섬유에서 색분산은 각각 다른 파장에서 광이 느끼는 유효굴절률이 다르기 때문에 일정거리를 진행하면 각 파장의 속도차에 의한 지연이 발생한다. 따라서 제안한 시스템에서 측정하고자 하는 광섬유의 길이를 일정하게 유지하고 광 파장을 변화시키면 각 파장들은 느끼는 유효굴절률의 차에 의해 각각 조금씩 다른 지연이 발생하고 이러한 지연이 전달함수의 주기를 변화시키게 된다. 하지만 전달함수의 주기를 직접 측정한다면 dip이 발생하는 주파수에서의 전달함수가 매우 작기 때문에 PD에서의 잡음과 회로망 분석기의 해상도의 영향으로 정확한 색분산 측정에 제한을 주게된다. 따라서 전달함수의 주기를 측정하지 않고 측정된 값과 식 (2)의 값을 지연시간 t_d 를 변화시키면서 비교하여 가장 상관관계가 큰 t_d 를 구하는 방식을 사용하였다. 이 때 식 (2)의 전달함수 $H_1(f)$ 와 $H_2(f)$ 는 MZ 변조기의 순방향 변조와 역방향 변조를 직접 측정한 값을 이용하였다.



(a)



(b)

그림 4. MZ 변조기의 순방향 및 역방향 변조 특성 (a) 크기특성 (b) 위상특성

Fig. 4. Co- and counterpropagation modulation characteristics of Mach-Zehnder modulator. (a) Magnitude spectrum (b) Phase spectrum.

그림 4(a)는 측정된 MZ 변조기의 순방향 변조특성과 역방향 변조의 크기특성을 그림 4(b)는 위상특성을 나타내고 있다. 크기특성은 주파수가 증가할수록 순방향에 비해 역방향의 변조특성이 급격히 떨어지지만 500 MHz 이하의 주파수에서는 순방향과 역방향 변조특성이 거의 동일한 특성을 보인다. 위상특성은 순방향과 역방향의 위상변화의 기울기가 조금 다른 특성을 보이고 있다.^[9]

III. 측정 및 고찰

본 논문에서 광섬유의 색분산을 측정하기 위하여 광원으로는 1500nm~1580nm의 파장가변 레이저를 사용

하였다. 변조기는 1550nm에서 $V_{\pi}=3.8V$, 삽입 손실이 약 5dB 특성을 갖고 입력단에 편광유지 광섬유와 편광 조절기가 부착된 Sumitomo에서 제작한 MZ 변조기를 광수신기로는 1.5 μ m 대역에서 20GHz까지 수신이 가능한 PIN-PD를 이용하였으며, 수신된 신호는 20dB증폭기를 이용하여 증폭하였다. RF 주파수는 50MHz에서 1GHz까지 측정하였다.

색분산 측정은 2.235km 길이의 Corning SMF-28TM 광섬유를 사용하였다. 측정은 파장가변 레이저의 파장을 1500nm에서 1580nm까지 5nm의 간격을 변화시키면서 각각의 MZ 변조기의 순방향과 역방향 전달함수를 측정하고 FUT를 첨가하여 전체 전달함수를 측정하였다. RF 변조 주파수는 50MHz에서 1GHz의 범위를 사용하였다.

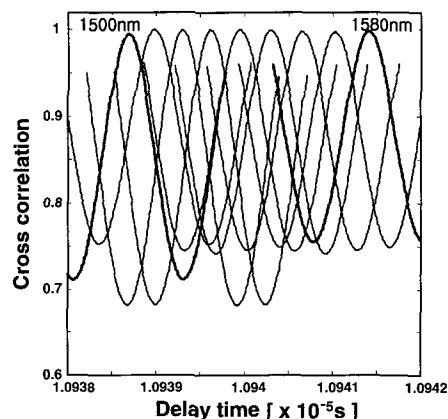


그림 5. 각 파장에서 지연시간에 대한 상관값
Fig. 5. Correlation to delay time at each wavelength.

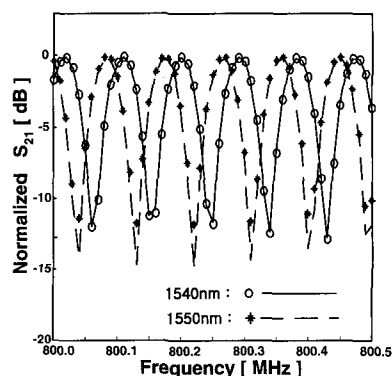


그림 6. 변조 주파수에 따른 정규화된 전달함수의 크기
Fig. 6. Normalized transfer function amplitude to modulation frequency.

그림 5는 측정된 값과 식 (2)에서 지연시간 t_d 를 변화시키면서 구한 상관 값을 1500nm에서 1580nm 까지 10nm 간격의 파장에 대해서 나타낸 것이다. 여기에서 각 파장에서 가장 큰 상관 값을 나타내는 지연시간이 FUT의 전체 지연시간이 된다. 그림 6은 1540nm(실선)와 1550nm(점선) 두 파장에서의 측정된 전달함수와 식 (2)를 이용하여 계산된 전달함수 값을 800MHz에서 800.5MHz까지 확대 비교한 것이다. 그림에서 *와 o는 측정된 값을 나타낸다. 두 파장에서 측정된 값과 계산된 값이 매우 잘 일치함을 확인할 수 있으며, 그림에는 나타내지 않았지만 측정된 다른 파장에서도 잘 일치함을 확인하였다.

그림 7은 각 파장에서의 km당 측정된 지연시간(o)과 측정값을 2차 다항식으로 근사화한 그림이며 그림 8은 근사화 함수를 근거로 계산한 색분산 값을 나타낸다. 제안한 방법의 정확성을 확인하기 위해 Corning사에서 주어진 색분산 방정식 (5)와 비교하였다^[10].

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \quad [\text{ps/nm} \cdot \text{km}] \quad (5)$$

여기에서 λ_0 는 색분산이 0이 되는 파장을, S_0 는 λ_0 에서의 색분산함수의 기울기를 나타낸다. 그림 9는 제안한 시스템으로 측정한 결과에 식 (5)의 값을 비교한 것으로 이 때의 λ_0 는 1312nm, S_0 는 0.085[ps/nm²·km]이다. 측정된 색분산과 계산된 색분산의 측정 파장영역에서 0.07[ps/nm.km] 보다 작은 오차를 나타내었으며 S_0 는 0.005 [ps/nm²·km]의 오차를 나타내었다. 본

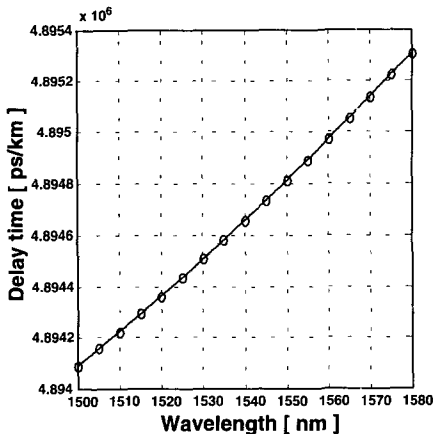


그림 7. 측정된 km당 지연시간
Fig. 7. Measured delay time per km.

실험에서는 2.235km 길이의 광섬유 색분산 만을 측정하였지만 다양한 길이의 색분산도 측정이 가능하리라 생각한다.

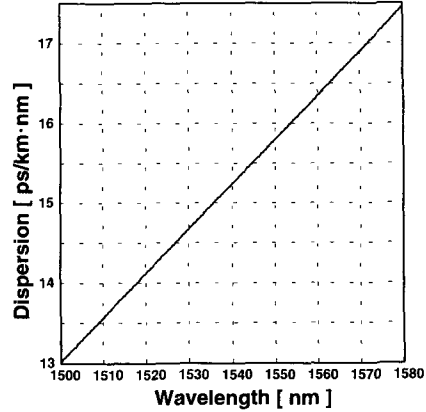


그림 8. 측정된 색분산
Fig. 8. Measured chromatic dispersion.

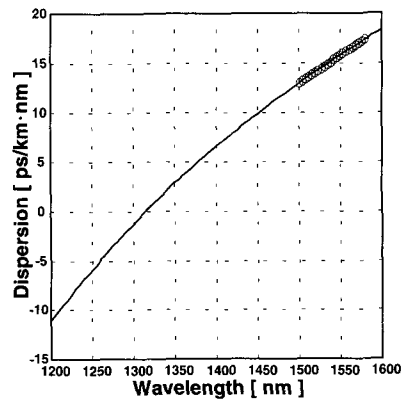


그림 9. 측정된 색분산과 이론적인 값의 비교
Fig. 9. Comparison of measured chromatic dispersion with theoretical equation.

IV. 결 론

본 논문에서는 MZ 변조기가 포함된 Sagnac 간섭기를 이용한 색분산 측정 방식을 제안하고 등가모델을 유도하였다. 2.235km 길이의 광섬유의 색분산을 측정하였으며 이론적인 값과 1500nm에서 1580nm의 파장 범위에서 매우 잘 일치함을 확인하였다. 제안된 측정 방식에서는 어떠한 부가적인 보상이나 기준을 위한 전자 회로나 광섬유가 필요하지 않기 때문에 측정 시스템이 매우 간단하고, 광손실이나 출력파워가 변화가 측정결

과에 영향이 미치지 않고 측정시 기계적인 조차이 불 필요하기 때문에 재현성 있는 측정이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] L. G. Cohen and C. Lin, "Pulse delay measurements in the zero material dispersion wavelength region for optical fibers," Appl. Opt., vol. 16, pp. 3136~3139, 1977.

[2] B. Costa, D. Mazzoni, M. Puleo, and E. Vezzoni, "Phase-shift technique for the measurement of chromatic dispersion in optical fibers using LED's," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-18, no. 10, pp. 1509~1515, 1982.

[3] J. Stone and L. G. Cohen, "Minimum-dispersion spectra of single-mode fibers measured with subpicosecond resolution by white-light cross correlation," Electron. Lett., vol. 18, pp. 716~718, 1982.

[4] B. Christensen, J. Mark, G. Jacobsen, and E. Bodtker, "Simple dispersion measurement technique with high resolution," Electron. Lett., vol. 29, no. 1, pp. 132~134, 1993.

[5] A. C. Van Bochove, J. F. Jacobs, and J. T. Nijhuis, "Improved Raman-fibre pulse delay measurement system," Electron. Lett., vol. 21, no. 7, pp. 282~283, 1985.

[6] M. Fujise, M. Kuwazuru, M. Nunokawa, and Y. Iwamoto, "Highly accurate long-span chromatic dispersion measurement system by a new phase-shift technique," J. Lightwave Technol., vol. LT-5, no. 6, pp. 751~758, 1987.

[7] L. Thevenaz and J. P. Ploux, "Modulation frequency-shift technique for dispersion measurements in optical fibres using LED's," Electron. Lett., vol. 23, no.20, pp. 1078~1079, 1987.

[8] L. S. Abedin, M. Hyodo, and N. Onodera, "Application of Sagnac interferometer for measuring chromatic dispersion of installed singlemode fibres," Electron. Lett., vol. 36, no. 5, pp. 413~414, 2000.

[9] G. K. Gopalakrishnan, W. K. Burns, R. W. McElhannon, C. H. Bulmer, and A. S. Greenblatt, "Performance and modeling of broadband LiNbO3 traveling wave optical intensity modulators," J. Lightwave Technol., vol. 12, no. 10, pp. 1807~1819, 1994.

[10] http://www.corningfiber.com/products/smf28_frame.htm

저 자 소 개

田 金 洙(正會員)

1995년 2월 : 전북대학교 전기공학과 학사. 1997년 2월 : 동대학원 전기공학과 석사. 현재 동대학원 전기공학과 박사과정. <주관심분야> 광통신용 광집적소자 설계 및 제작, 광도파로 해석, 광전송시스템, 광/무선 통신시스템 등

姜 東 星(正會員)

1993년 2월 : 전북대학교 전기공학과 학사. 1995년 2월 : 동대학원 전기공학과 석사. 1999년 8월 : 동대학원 전기공학과 박사과정 수료, 현재 : (주)켄포토닉스 주임연구원. <주관심 분야> 광통신용 폴리머 광집적소자 설계 및 제작, 유리집적광학, 광도파로 해석 등

金 熙 周(正會員)

1993년 2월 : 전북대학교 전기공학과 학사. 1995년 2월 : 동대학원 전기공학과 석사. 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정. <주관심분야> 광통신용 광집적소자 설계 및 제작, 광전송시스템, 광/무선 통신시스템 등

潘 在 景(正會員)

1980년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학사). 1982년 2월 : 동대학원 전자공학과(공학석사). 1987년 8월 : 동대학원 전자공학과(공학박사). 1987년 5월~현재 : 전북대학교 전자정보공학부 교수, 전북대학교 전기전자회로합성연구소 연구원, 전북대학교 정보통신연구소 연구원. 1991년 1월~1992년 1월 : 미국 Ohio 주립대 전기공학과 객원연구원. <주관심 분야> 광통신용 소자, 집적광학소자, 광/무선 통신시스템 등