

# 분산천이 광섬유를 이용하는 등간격 다채널 광전송 시스템에서 발생하는 4광파혼합 효과의 편광 의존성\*

이상수 · 이현재 · 이동호 · 박창수

한국전자통신연구원 광파통신연구실

(1996년 10월 7일 받음)

분산천이 광섬유를 이용하는 등간격 다채널 광전송 시스템에서 광섬유의 4광파혼합이 전송품질에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 4광파혼합의 효율을 최소화하기 위해 편광조절기를 사용하여 인접한 채널 간의 편광상태가 서로 직교하도록 하였다. 이 경우 채널들의 편광이 일정하게 정렬된 경우와 비교하여 전송시 전력 페널티가 1.5 dB 감소되었다.

## I. 서 론

시분할다중(time division multiplexing, TDM) 방식을 이용하는 기존의 광전송 시스템은 전송용량이 증가하면서 시스템의 구조가 매우 복잡해질 뿐만 아니라, 전자소자의 대역폭 한계로 인해 수십 Gb/s 이상의 전송용량을 확보하는 것은 현실적으로 어렵다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 최근 파장분할다중(wavelength division multiplexing, WDM) 방식이 많이 연구개발되고 있다. 파장분할다중 기술은 미리 정해진 서로 다른 파장에 각각 시분할다중된 고속신호를 실어 하나의 광섬유로 전송하는 다중방식으로서, 기존의 전자소자 기술을 이용하여 쉽게 전송용량을 증가시킬 수 있는 전송방식이다. 또한 기존 시스템의 용량 확장이 용이하고, 네트워크 구성에 있어 많은 다양성을 제공하기 때문에 향후 전송 분야의 핵심 기술이 될 전망이다.<sup>[1-3]</sup>

파장분할다중 기술을 이용하는 다채널 광전송 시스템에서는 여러 개의 빛살이 동시에 하나의 광섬유로 입력되기 때문에 단위 면적당 광세기가 높아져, 4광파혼합(four-wave mixing, FWM),<sup>[4]</sup> 유도라만산란(stimulated Raman scattering, SRS),<sup>[5]</sup> 자기위상변조(self-phase modulation, SPM),<sup>[6]</sup> 교차위상변조(cross phase modulation, XPM),<sup>[7]</sup> 유도브릴루앙산란(stimulated Brillouin scattering, SBS)<sup>[8]</sup> 등과 같은 광섬유의 비선형 현상이 나타나게 된다. 이러한 비선형 현상들은 채널간의 신호 왜곡, 전력손실 및 새로운 주파수 성분의 발생 등을 유발하여 전송거리와 채널수를 제한한다. 특히 색분산에 의한 전송 거리의 제한을 극복하기 위해 분산천이 광섬유를 사용하는 광전송 시스템에서는 채널간의 위상차이가 아주 작게 되어 4광파혼합의 효율이 매우 높아지게 된다. 더우기 채널들이 등간격으로 배열되어 있는 경우에는 4광파혼합에 의해 발생

된 새로운 주파수 성분들이 신호채널에 중첩되어 시스템의 성능을 열화시키는 주요인이 된다. 4광파혼합을 최소화하기 위한 방법으로 각 채널간의 간격을 비등간격으로 설정하는 방법,<sup>[9]</sup> 각 채널의 편광상태를 조절하는 방법,<sup>[10]</sup> 전송용 광섬유의 색분산을 조절하는 방법<sup>[11]</sup> 등이 제안되어 있다.

이 논문에서는 분산천이 광섬유를 이용하는 파장분할다중 광전송 시스템에서 4광파혼합이 전송품질에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 그리고 인접한 채널간의 편광 상태를 서로 직교(orthogonal) 하도록 조절하여 4광파혼합의 영향을 감소시켰다. 실험에 사용한 광전송 시스템은 각 채널들이 0.8 nm의 등간격으로 배열되어 있고, 채널당 전송속도가 2.5 Gb/s인 4채널 파장분할다중 시스템으로서, 채널별로 편광 및 광세기의 조절이 가능하도록 구성하였다.

## II. 광섬유에서의 4광파혼합

서로 다른 주파수( $f_i, f_j, f_k$ )를 갖는 강한 세기의 광이 광섬유와 같은 비선형 매질에 입사되면 매질내에는 3차 비선형 편극(third order nonlinear polarization)이 유도되며, 이것에 의해 새로운 주파수  $f_{FWM}$ 를 가지는 광이 발생되는데 이러한 현상을 4광파혼합이라고 한다. 이때 4광파혼합에 의해 새로이 생성되는 광의 주파수는  $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k (i, j \neq k)$ 의 관계를 가지며, 광의 세기  $H(f_{FWM})$ 는 (식 1)과 같이 주어진다.<sup>[12]</sup>

$$H(f_{FWM}) = \frac{36,864\pi^6}{n^4\lambda^2c^2} (x)^2 \frac{E(f_i)F(f_j)G(f_k)}{A_{eff}^2} e^{-\alpha L} \eta L_{eff}^2 \quad (1)$$
$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left[ 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right]$$

위 식에서  $n$ 은 광섬유의 굴절율,  $x$ 는 3차 비선형 감수율(nonlinear susceptibility),  $E(f_i), F(f_j), G(f_k)$ 는 각각 입사광의 세기를 나타내며,  $A_{eff}$ 는 광섬유의 유효단면적,  $L_{eff}$ 는 광섬유의 유효길이,  $L$ 은 광섬유의 길이,  $\alpha$ 는 광섬유의 손실계수를 나타낸다.  $\eta$ 는 4광파혼합의 효율을 나타내는 위상정합계수로서 위상차  $\Delta\beta = \beta(f_i) + \beta(f_j) - \beta(f_k) - \beta(f_{FWM})$ 의 함수이다. 입사광의 파장

\*본 연구는 HAN/B-ISDN 과제중 100Gb/s 광주파수 분할 다중방식 광전송 시스템 개발의 일환으로 수행되었으며, 본 연구수행에 많은 도움을 주신 한국전자통신연구원 광대역전송연구부 이만섭 박사께 감사드립니다.

이 광섬유의 영분산 파장에 근접하는 경우 각 입사광들 간의 위상차이가 거의 없게 되어, 4광파혼합의 효율이 높아지게 된다. 위식에서는 모든 입사광은 일정한 방향으로 선편광되었다고 가정하였다. (식 1)에서 알 수 있듯이 4광파혼합에 의해 새로이 생성되는 광의 세기는 4광파혼합의 효율 및 입사광의 세기에 비례한다. 따라서 다채널 광전송 시스템에서는 영분산 영역의 파장을 사용하거나, 채널당 출력이 임계세기 보다 클 경우 4광파혼합이 잘 일어나게 된다.

4광파혼합이 일어나는 경우 새로운 주파수를 가지는 4광파혼합광 성분이 생성되는 대신에 원래의 신호광 세기는 감소하게 된다. 뿐만 아니라 등간격의 다채널 광전송 시스템에서는 4광파혼합에 의해 생성된 광이 원래의 신호광에 중첩되어 이들간의 상호작용에 의해 간섭을 일으키게 되어 채널간의 혼신(crosstalk)을 유발하게 된다. 이는 수신단에서 수신된 신호의 눈열림(eye opening)을 감소시켜 결과적으로 비트 오류율(bit error rate, BER) 특성이 나빠지게 된다. 그러므로 분산천이 광섬유를 사용하는 등간격 다채널 전송 시스템에서는 4광파혼합을 최소화하여야만 한다.

4광파혼합을 최소화하는 방법중의 하나로 3차 비선형 편극의 편광의존성을 이용하는 방법이 있다. 광섬유와 같이 등방성을 갖는 매질에서 입사광  $E(f_i)$ ,  $F(f_j)$ ,  $G(f_k)$ 에 의해 유도되는 3차 비선형 편극의  $x,y$ 성분은 각각 다음과 같이 표현된다<sup>[13]</sup>.

$$P_{NL,x}(f_{FWM}) = 6\chi [E_x F_x G_x + \frac{1}{3}(E_x F_x G_y + E_y F_x G_x + E_y F_y G_x)] \quad (2)$$

$$P_{NL,y}(f_{FWM}) = 6\chi [E_y F_y G_y + \frac{1}{3}(E_x F_x G_y + E_x F_y G_x + E_y F_x G_x)] \quad (3)$$

만일 광섬유의 복굴절 축(birefringence axes)이 고정되어 있고, 모든 광원이  $x$ 방향으로 선편광되었다면,  $E_x=F_x=G_x=A$ ,  $E_y=F_y=G_y=0$ 이므로  $P_{NL,x}=6\chi A^3$ ,  $P_{NL,y}=0$ 이 되지만,  $E(f_i)$ 가  $y$ 축으로 편광되어 있고,  $F(f_j)$ ,  $G(f_k)$ 가  $x$ 축으로 편광된 경우라면  $E_y=F_y=G_y=A$ ,  $E_x=F_x=G_x=0$ 이므로  $P_{NL,x}=0$ ,  $P_{NL,y}=2\chi A^3$ 이 된다. 따라서 입사광의 편광상태가 서로 직교(orthogonal)하는 경우 비선형성은 1/3로 감소하며  $H(f_{FWM})$ 는 비선형성의 제곱에 비례하기 때문에 실제로는 1/9로 감소한다. 그러나 실제로 광섬유의 복굴절 축은 불규칙적으로 변하게 되며 이 경우에는 1/4로 감소하게 된다.<sup>[14]</sup>

### III. 실험장치 구성

분산천이 광섬유를 사용하는 등 간격 다채널 광전송 시스템에서 4광파혼합의 특성을 관찰하기 위해 그림 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 광송신기는 파장 간격이 0.8 nm로 등간격인 네개의 분포채환 레이저 다이오드(distributed feedback laser diode, DFB LD)와 두개의 LiNbO<sub>3</sub> 외부변조기로 구성되며, 펄스패턴 발생기로 부터 출력되는 2.488 Gb/s NRZ(non-return to zero) 신호(PRBS 2<sup>23</sup>-1)에 의해 외부변조기로 AC 결합된다. 실험에서는 외부변조기의 수를 줄이기 위해 LD1(1,542.4 nm), LD3(1,544.0 nm)의 출력광을 3dB 방향성 결합기를 사용하여 결합시켜 외부변조기 1로 입력시키고

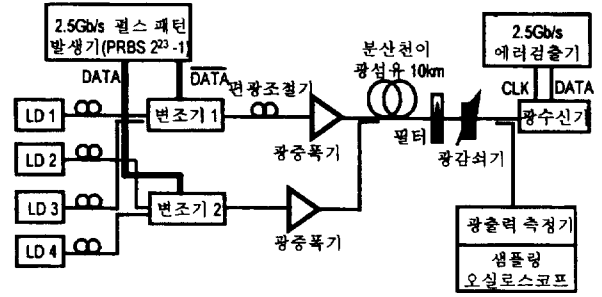


그림 1. 4광파 혼합 특성 측정용 실험 구성도

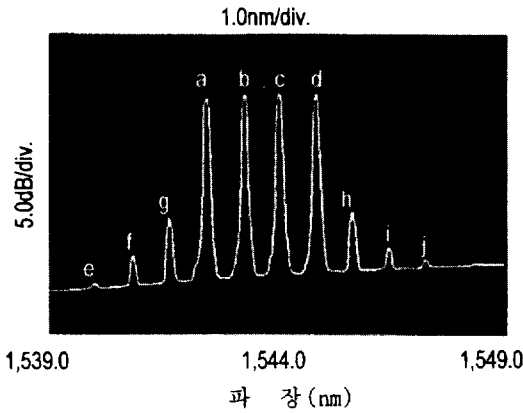
펄스 패턴 발생기의 data 출력을 이용하여 구동하였다. 그리고 LD2(1,543.2 nm)와 LD4(1,544.8 nm)의 출력광을 3 dB 방향성 결합기를 사용하여 결합시켜 외부변조기 2로 입력시키고 data bar 출력을 이용하여 구동하도록 하였다. 각 LD 출력단의 편광조절기는 외부변조기로 입력되는 광의 편광상태를 조절하기 위한 것이다. 외부 변조기 1의 출력단에는 편광조절기를 사용하여 인접한 채널간의 편광상태를 조절할 수 있도록 하였고, 외부변조기 1, 2의 출력단에 광증폭기를 사용하여 분산천이 광섬유 입력단에서 각 채널당 세기가 +6 dBm까지 가능하도록 하였다. 사용된 광원의 -20 dB 발전전폭은 0.23 nm이며, 광송신기의 소광비는 10 dB, 처광계수는 -1이었다.

전송용 광섬유로는 10 km의 분산천이 광섬유를 사용하였다. 광섬유를 10 km 만 사용한 이유는 영분산 값이 서로 다른 광섬유를 여러개 조합할 경우 위상정합조건이 깨지게 되어 4광파혼합이 잘 일어나지 않으므로 최악의 경우(worst case)를 관찰할 수 없기 때문이다. 사용된 광섬유는 영분산 파장이 1,548.7 nm로서 전송 파장과 인접해 있으며, 영분산 기울기는 0.068 ps/nm<sup>2</sup>km, 손실은 약 0.22 dB/km이다.

광수신부는 채널 분리를 위해 -3 dB 투과대역폭이 0.5 nm 이고 삽입손실이 3.5 dB인 파장가변 필터를 사용하여 각 채널별로 신호를 분리할 수 있도록 하였다. 광수신기는 APD, 주증폭기, 클락 및 데이터 추출부로 구성되었으며, 재생된 데이터와 클락은 에러 검출기로 보내져서 비트 오류를 측정하도록 되어있다. 광섬유를 사용하지 않은 경우의 각 채널의 평균 수신감도는 비트 오류 1×10<sup>-9</sup>에서 -34.5 dBm 이었고, 과부하는 -10 dBm 이었다.

### IV. 실험결과

먼저 4광파혼합이 최대로 일어나는 경우에 대하여 알아보았다. 분산천이 광섬유 입력단에서 광의 세기가 각 채널당 +5 dBm이 되도록 하여 전송시킨후 외부변조기 1의 출력단에 있는 편광 조절기를 조절하여 4광파혼합이 최대로 일어나게 하였다. 이때 분산천이 광섬유 출력단에서 관측한 스펙트럼을 그림 2에 나타내었다. 그림에서 a,b,c,d는 원래의 신호광과 4광파혼합에 의해 생성된 광성분이 중첩되어 있는 경우이며, e,f,g,h,i, j는 4광파혼합에 의해 생성된 광성분이다. 그림 2에 나타난 바와 같이 d성분과 4광파혼합에 의해 생성된 h 성분과의 차이는 약 20 dB이다. 그렇지만 등간격 다채널 시스템에서 위상정합조



(각 채널 간의 편광상태 ; a//b//c//d)

표기	파장(nm)	비고
a	1,542.4	채널 1
b	1,543.2	채널 2
c	1,544.0	채널 3
d	1,544.8	채널 4
e	1,540.0	4 광파 혼합광
f	1,540.8	"
g	1,541.6	"
h	1,546.6	"
i	1,546.4	"
j	1,547.2	"

그림 2. 4광파 혼합이 최대인 경우의 스펙트럼 특성

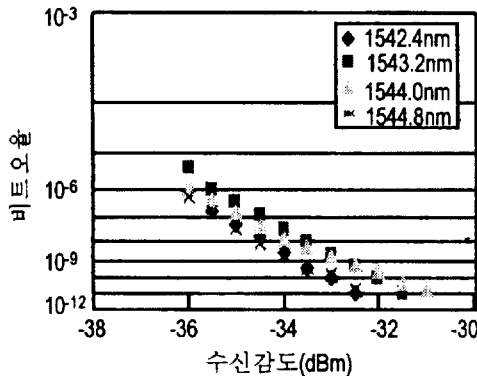
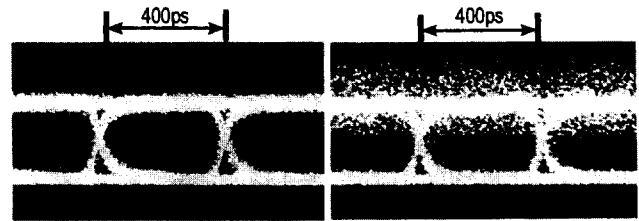


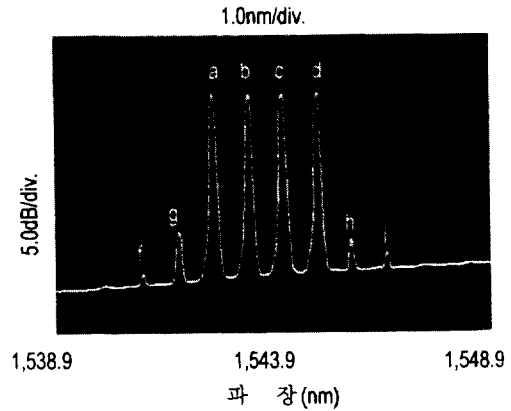
그림 3. 4광파혼합이 최대인 경우의 비트 오류 특성

건이 만족될 경우 전송 채널의 중심에서 보다 많은 4광파혼합 성분이 생기게 되므로<sup>[9]</sup> 실제로 a,b,c,d 대역내에는 h보다 더 세기가 큰 4광파혼합 성분이 포함될 수 있다.

이 경우 비트 오류를 측정된 결과를 그림 3에 나타내었다. 비트 오류  $1 \times 10^{-9}$ 을 얻기 위해 요구되는 광수신기의 입력 광 세기는 채널별로 -32.5~-33.5 dBm 이었다. 이는 광섬유를 사용하지 않은 경우의 수신감도인 -34.5 dBm 보다 1~2 dB 정도 열화된 것으로 4광파혼합에 의해 발생한 성분들이 원래의 신호광 성분과 혼신을 일으키기 때문이다. 채널별로는 4채널중 가운데에 위치한 2, 3 채널이 1, 4 채널보다 전력 페널티가 더 크게 나타났다. 이는 결국 4광파혼합에 의해 생성된 광의 세기가 가운데 채널에서 더 크다는 것을 의미한다.



(a) 광섬유를 사용하지 않은 경우 (b) 4광파 혼합이 최대인 경우  
그림 4. 눈 생김새 특성



(각 채널 간의 편광상태 ; a⊥b⊥c⊥d)

그림 5. 4광파혼합이 최소인 경우의 스펙트럼 특성

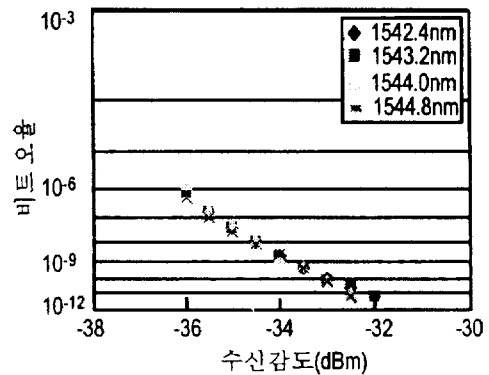


그림 6. 4광파혼합이 최소인 경우의 수신감도 특성

분산천이 광섬유 출력단에서 관측한 눈 생김새(eye pattern)를 그림 4에 나타내었다. 광섬유를 사용하지 않은 경우인 (a)와 비교하여 4광파혼합이 최대인 (b)의 경우 4광파혼합광과 신호광 간의 혼신으로 인해 레벨 1에서의 잡음이 크게 증가하여 눈 열림이 상당히 감소하였다.

다음은 외부변조기 1 출력단의 편광조절기를 조절하여 인접 채널간의 편광상태가 직교되도록 하여 4광파혼합을 감소시킨 경우에 대하여 알아 보았다. 이때 분산천이 광섬유 출력단에서의 스펙트럼을 그림 5에 나타내었다. d성분과 h성분간의 차이는 약 24 dB로 증가함을 알 수 있다. 이는 인접한 채널간의 편광상태가 직교하는 상태가 되어 비선형 편극을 감소시켰기 때문이다. 수신감도를 측정된 결과를 그림 6에 나타내었다. 비트 오류  $1 \times 10^{-9}$ 을 얻기 위해 요구되는 광수신기의 입력세기

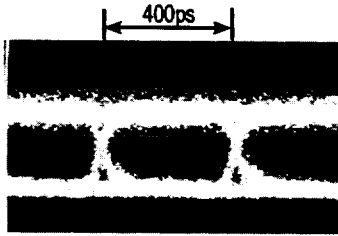


그림 7. 4광파혼합이 최소인 경우의 눈 생김새 특성

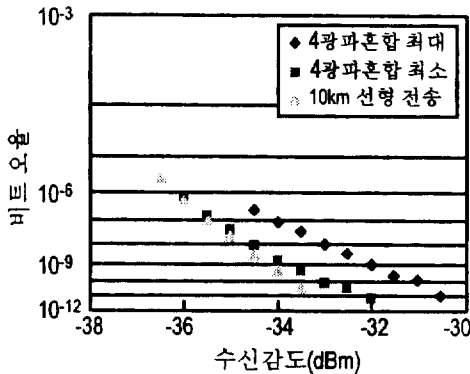


그림 8. 4광파혼합 특성 변화에 대한 채널 2에서의 수신감도 특성

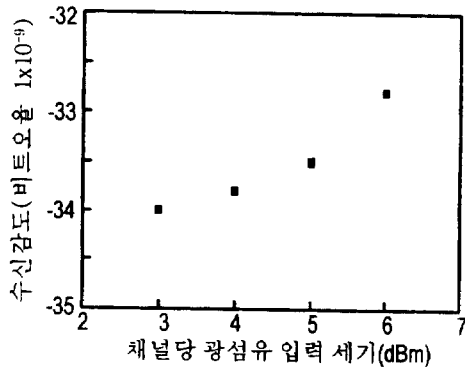


그림 9. 채널당 세기에 대한 수신감도 특성

는 -33.8~-34.0 dBm을 나타내었다. 광섬유를 사용하지 않은 경우와 비교하여 약 0.5 dB의 페널티만을 나타내었다. 분산천이 광섬유 출력단에서 관측한 눈 생김새를 그림 7에 나타내었는데, 4광파혼합이 최대인 그림 4의 (b)와 비교하여 레벨 1에서의 잡음이 거의 없었고 눈 열림도 개선됨을 알 수 있다.

4광파혼합이 최대인 경우와 편광상태를 직교시킨 경우 채널 2에서 측정된 수신감도 특성을 그림 8에 나타내었다. 편광상태를 직교시킨 경우에는 채널당 광섬유 입력세기를 0 dBm으로 하여 비선형 현상이 일어나지 않도록 한 선형 전송(linear transmission)의 경우와 비교하여 수신감도의 차이가 거의 없었다. 그렇지만 4광파혼합이 최대인 경우에는 약 2dB의 전력 페널티가 발생하였다.

한편 4광파혼합에 의해 제한되는 채널당 광섬유 입력세기를 알아보기 위해 각 채널의 세기를 변화시키면서 채널 2에서

측정한 수신감도의 변화를 그림 9에 나타내었다. 이때 인접한 채널 간의 편광상태는 서로 일치하는 경우이다. 채널당 입력 세기가 증가함에 따라서 비트 오류 1×10<sup>-9</sup>을 얻기 위해 요구 되는 광수신기 입력세기는 증가하였다. 특히 채널당 광섬유 입력세기가 +3dBm 이상이 되면 전력 페널티가 급격히 증가함을 알 수 있다.

## V. 결 론

0.8 nm의 등간격을 갖는 2.5 Gb/s x 4채널 광전송 시스템에서 분산천이 광섬유를 사용하여 전송하는 경우 발생하는 4광파혼합에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 입사광의 편광상태를 조절하여 4광파혼합이 최대로 일어나게 하였을 경우 원래의 신호광과 4광파혼합에 의해 생성된 성분간의 혼신으로 인해 비트 오류 특성이 열화되어 채널별로 1~2 dB의 전력 페널티가 발생하였다. 그렇지만 입사광의 편광상태가 서로 직교 되도록 조절하여 4광파혼합을 감소시킨 경우 4광파혼합으로 인해 생성된 광의 세기는 감소하였으며 전력 페널티도 0.5 dB로 감소하였다.

채널당 입력세기를 증가시키면 4광파혼합에 의해 생성된 광의 세기가 증가하므로 전력 페널티도 증가하였는데, 채널당 입력세기가 +3 dBm인 경우 전력 페널티는 0.5 dB였으나 +6 dBm인 경우에는 1.8 dB로 증가하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Yoshida, S. Kuwano, N. Takachio, and K. Iwashita, Optical Fiber Communication Technical Digest, TuD 6(1996).
- [2] Valeria L. da Silva, Y.Liu, D.Chowdhury, M.A. Newhouse, U.Gaubatz, L.Rapp, C. Das, E. Gottwald, and C.-J. Weiske, Optical Fiber Communication Technical Digest, PD2(1996).
- [3] C. Cremer, U. Gaubatz, and P. Krummrich, IEE Electron. Lett., **32**, 1116(1996).
- [4] K. Inoue, K. Nakanishi, K. Oda, and H. Toba, IEEE J. Lightwave Technol., **12**, 1423(1994).
- [5] A.R. Chraplyvy, IEE Electron. Lett., **20**, 58(1984).
- [6] N. Kikuchi, and S. Sasaki, IEEE J. Lightwave Technol., **13**, 868(1995).
- [7] D. Marcuse, A.R. Chraplyvy, and R.W. Tkach, IEEE J. Lightwave Technol., **12**, 885(1994).
- [8] 김향균, 이창희, 한정희, 한국광학회지, **7**, 60(1996).
- [9] F. Forghieri, R.W. Tkach, and A.R. Chraplyvy, IEEE J. Lightwave Technol., **13**, 889(1995).
- [10] C.J. Mahon, L. Olofsson, E. Bodtker, and G. Jacobsen, IEEE Photon. Technol. Lett., **8**, 575(1996).
- [11] Y. Miyajima, M. Ohashi, and K. Nakajima, Optical Fiber Communication Technical Digest, PD7(1996).
- [12] K. Inoue, IEEE J. Lightwave Technol., **10**, 1553(1992).
- [13] K.O. Hill, D.C. Johnson, B.S. Kawasaki, and R.I. MacDonald, J. Appl. Phys. **49**, 5098(1978).
- [14] K. Inoue, IEEE Photon. Technol. Lett., **3**, 560(1991).

**Polarization dependency of Four-wave mixing effect on equal spaced multichannel optical transmission system with dispersion shifted fiber**

Sang-Soo Lee, Hyun-Jae Lee, Dong-Ho Lee, and Chang-Soo Park  
*Lightwave Communication Section, Electronics and Telecommunications Research Institute,  
161 Kajong-Dong, Yusong-Gu, Taejeon 305-606, Korea*

(Received: October 7, 1996)

We have experimentally investigated the fiber four-wave mixing effect on equal spaced multichannel optical transmission system with dispersion shifted fiber. To reduce the fiber four-wave mixing effect, we set the polarization states of the adjacent channels to be orthogonal each other by using polarization controller. In this case, we can reduce the transmission power penalty by 1.5 dB compared with that of equal polarization states.