

광도파로열 격자 라우터의
경로오차 측정 방법에 관한 연구

박재성*, 정영철, 문성욱**
광운대학교 전자통신공학과
대한전선 주식회사 정보통신연구소**

A Study on Measurement Method of Optical Path Error
in Arrayed Waveguide Grating Router

*JaeSung Park, YoungChul Chung
Kwangwoon University Dept. of Electronic Communication

Abstract - Phase errors of arrayed waveguide degrade the performance of AWG router, especially for dense WDM system. So it is necessary to measure the phase error and to compensate. The analysis method of the interference signal from the low coherence interferometer to measure the path length difference phase error is studied. The interference signal generated assuming the intentional path length difference errors of 0.1~0.4 μ m are analyzed and the results show that the path length difference phase error of ΔL within $\pm 14^\circ$ of sampling phase error can be accurately measured.

1. 서 론

WDM 시스템 구축의 핵심 소자로 광도파로 격자 (=AWG: Arrayed Waveguide Grating) 라우터가 주목받고 있다. 하지만, 제작상의 여건을 고려할 때 채널 간격이 50GHz 이하인 DWDM (=Dense Waveguide Division Multiplexing)용 AWG 라우터의 경우 광도파로 제작시 발생 할 수 있는 경로차 길이의 오차를 0.05 μ m 이내로 유지하는 것은 매우 힘들다.[1]

경로차 위상 오차로 인한 AWG 라우터의 위상오차는 출력 단에서 심각한 전송 특성 열화를 가져온다. 따라서 AWG 라우터의 제작 시 발생하는 위상오차를 측정하고, 이를 보상해 줘야만 안정적이고 신뢰성 있게 DWDM (=Dense Wavelength Division Multiplexing) 시스템에서 쓸 수 있다.[2][3]

본 논문에서는 Mach-Zehnder 간섭계의 간섭 실험에서 Fourier 변환 해석을 이용한 AWG 광도파로열의 위상오차 측정을 위한 기술 및 간섭패턴을 연구해 본다.[4][5] 그리고, 실제 실험장치 구현에 앞서 AWG 라우터의 위상오차 측정 방법에 대해서 전산도의 실험을 해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 AWG 라우터의 위상오차

2.1.1 AWG 라우터의 동작

AWG 라우터는 그림 1과 같이 자유 전파영역인 두 개의 슬랩 도파로와 슬랩 도파로를 연결하는 도파로열, 그리고 채널을 형성하는 입, 출력 도파로로 구성되어 있다.[6] Input waveguide region의 한 도파로로 여기된 광파 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_7$ 은 첫 번째 슬랩 도파로에서 퍼져나가 도파로열에 여기가 된다. 도파로열은 두 개의 슬랩 도파로 사이에 정렬이 되어 power를 전달한다. 도파로열의 인접한 도파로들은 ΔL 의 일정한 길이차이

가 난다. 이러한 구조는 파장에 따른 인접한 도파로들간의 $\frac{2\pi}{\lambda} n \Delta L$ 의 위상변위차를 일으켜 도달되어진 두 번째 슬랩 도파로 영역에서의 광파들의 위상은 일정한 차이를 갖게된다. 이는 두 번째 슬랩 도파로에서 집속되는 광파의 방향에 영향을 주게 된다. 따라서 같은 입력 도파로로 여기된 각기 다른 파장의 광파는 파장에 따라 다른 출력 도파로로 전달된다.

2.1.2 위상 오차

현재까지 채널 간격이 0.4nm (=50GHz) 이상에서 제작되는 광도파로열 격자 라우터는 약 -30dB의 crosstalk을 가지고 있었다. 그러나, 10GHz (=0.08nm) 이하의 채널 간격을 가지는 고밀도 AWG 라우터의 제작에 있어서는 약 -15dB의 높은 crosstalk을 가지게는게 사실이다.[7][8]

이런 결과의 주된 원인은 채널 간격이 좁아지면 상대적으로 AWG 라우터에서 도파로열의 인접한 도파로들간에 광경로차 ΔL 이 더 커지기 때문이다. ΔL 이 커지면 제작시 발생할 수 있는 도파로 길이의 오차가 커지게 되며, 위상오차도 더 커질 가능성이 높아진다.

2.2 AWG 라우터의 위상오차 측정이론

2.2.1 측정장치

AWG (=Arrayed Waveguide Grating) 라우터의 광도파로열 경로 오차를 측정하기 위한 실험 구성은 그림 2와 같다. 실험에 사용할 두 광원은 1.3 μ m DFB LD와 1.55 μ m EDFA (=Erbium-Doped Fiber Amplifier)이다. 1.3 μ m DFB LD 경우는 빛의 간섭성 (Coherence)이 강하여 AWG를 통과하고 나온 광파와 "Variable Delay line"을 통해 진행한 광파가 간섭을 일으킨다. 발생된 간섭패턴은 간섭거리가 긴 DFB LD 광원에서 나온 광파의 간섭 파장의 $\frac{\lambda}{2}$ 거리마다 clock generator가 펄스를 발생시키도록 설정함으로써 경로의 변화에 대한 간섭패턴의 표본함수로 사용할 수 있다. 따라서 1.3 μ m DFB LD의 경우 반파장 거리인 0.65 μ m에 해당하는 경로의 변화가 발생할 때 "Waveform Recorder PC"에서 입력광원의 interferogram을 받아들일 수 있게 설정되어 있다.

1.55 μ m EDFA는 ASE (=Amplified Spontaneous Emission)를 발생시켜 저간섭 광원으로 이용한다. 저간섭 광원을 이용하는 이유는, 넓은 파장 대역을 갖는 저간섭 광원은 간섭계의 광경로차가 '0'이 되는 지점을 쉽게 찾을 수 있기 때문이다. 이 빛의 간섭 거리가 짧으므로 AWG 내에서 두 번째 슬랩 도파로의 입력단에 도착한 광파들은 출력단의 위치에 초점이 맞추어진 상이 발생되지 않게 되며 단지 광도파로열을 순차적으로 진행하면서 출력단에 도파하게 될 것을 예상할 수 있다. 이때 출력단에 나온 광파는 "Variable Delay line"의 경로차가 변화할 때 동일한 거리를 거쳐 나온 광파하고만

간섭을 일으키게 된다.

2.2.2 Fourier transform을 이용한 위상오차 측정방법

EDFA 생성 광원의 스펙트럼을 $g(\sigma)$ 라고 하면 발생된 interferogram은 다음과 같이 표현된다.

$$I(x) = F^{-1}[g(\sigma)h(\sigma)] = \sum_{i=1}^N cF^{-1}[g(\sigma)h_i(\sigma)] \quad (1)$$

여기서 만약 N개의 광도파로열에 따른 간섭패턴이 생성된다면 각각의 경우로 나누어 식 (1)의 오른쪽 식과 같이 표현된다. 우리가 알고 싶어하는 정보는 전달함수 $h_i(\sigma)$ 의 위상정보이므로 interferogram을 Fourier transform하여 입력광원의 스펙트럼으로 나누어주면 아무런 수학적인 가정 없이 위상정보를 쉽게 알 수 있다.

이상적으로 설계 및 제작된 AWG의 경우에는 광도파로의 경로차가 매질내의 파장의 정수배만큼의 길이를 갖게되므로 임의의 i 번째 경로를 거쳐 발생한 interferogram에서의 전달함수의 위상정보는 1번째 interferogram의 전달함수의 위상정보와 비교할 때 항상 2π 배만큼 존재하게 된다. 그러나 만약 광도파로열의 경로차가 일정하지 않게 되었을 경우에는 거리와 공간 주파수관계에 있어서 delay 정리에 의해 식 (2)와 같이 전달함수의 위상정보에 영향을 주게 된다.

$$h_i(\sigma) e^{jk \delta x_{i-th AWG}} = c \frac{F[I_i(x + \delta x_{i-th AWG})]}{g(\sigma)} \quad (2)$$

2.3 전산모의 실험

빛의 간섭거리 관계는 다음과 같다.

$$l_{coh} = t_{coh} \times C \quad (3)$$

1.55 μ m EDFA 광원의 생성은 coherence 거리가 약 60 μ m 정도라고 가정 할 때 식 (3)에 의해 coherence 시간은 200fs 로 모델링 하였다. 생성 광원의 샘플링 주기는 0.2 fs로 coherence 시간 내에는 1000개의 샘플링된 값들이 존재한다.

하나의 광파가 가변적인 경로를 갖게 하며 이를 기준 광파라고 정의한다. 다른 하나의 분기된 광파는 AWG에 입사하여 N개의 광도파로열을 지나 출력단에서 기준 광파와 만나게 된다.

본 전산모의 실험에서는 60ps의 광원을 생성하여 40ps를 광파의 간섭량의 편균값을 취하여 interferogram을 형성하였다. 기준 광파의 단위 거리 0.6 μ m(본 연구에서 고려한 샘플링 거리) 변화에는 10개의 샘플링 값이 이동하게 된다. 그러므로 정보 수치적인 해석상 1개의 시간적 샘플링 값에 해당되는 경로의 변화량으로는 0.06 μ m까지 표현가능하며 이것은 위상오차가 수치적인 해석에 따라 $\pm 14^\circ$ 의 위상오차가 발생할 수 있음을 의미한다. 이러한 오차범위 안에서 전달함수의 위상은 같은 값을 의미한다.

AWG 광도파로열의 경로차를 기준 광도파로부터 620 μ m가 되도록 설정을 한 경우 그림 3과 같이 5개의 interferogram을 발생시켰다. 발생한 5개의 interferogram 중 i 번째 interferogram의 peak의 위치를 중심으로 1024개의 값을 취하여 그림 4와 같이 interferogram을 분리해 낼 수 있다. 분리해낸 interferogram의 1024개의 샘플링 값을 Fourier transform을 하여 전달 함수의 중심파장의 위상정보의 값을 계산한다.

첫 번째 interferogram의 $P_{1st\ original}$ 의 위치를 i 번째의 interferogram에 이미 알고 있는 경로차를 고려하여 정확한 위치를 선정 한 후 $\delta x_{i-th AWG}$ 를 계산하면 제작 상에서 발생할 수 있는 경로 오차를 측정할 수 있다.

제작 시 경로오차로 인한 위상오차가 발생하지 않은

이상적인 경우를 전산모의 실험한 결과를 표 1에서 보였다. 위상의 변화가 우리가 예상한 위상오차 범위 ($\pm 14^\circ$)를 만족하였다.

제작시 경로오차로 인한 위상오차가 있는 경우에 대한 전산모의 실험 결과를 표 2에서 보였다. 표 2에서는 제작상의 오차가 발생하였을 시 interferogram의 분석을 통하여 위상의 변화가 발생됨을 알 수 있었으며 이러한 위상의 변화는 예상한 수치적 위상 오차의 범위 안에 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

채널 간격 0.4nm(=50GHz) 이하의 고밀도 AWG 라우터에서 제작 시 발생할 수 있는 위상오차를 보상해 주는 방법이 많이 연구되고 있다. 이를 위해선 AWG 라우터의 제작 오차를 얼마나 정확히 측정해 주느냐가 중요하다.

본 논문에서는 저간섭 광원을 생성시켜 AWG 라우터의 제작오차로 인한 위상오차 측정의 방법을 전산모의 실험 하였다. 실험 결과 $\pm 14^\circ$ 의 샘플링 위상 오차 범위를 만족하였다. 그리고 제작상의 오차를 가정하였을 시에도 예상된 수치적 위상 오차 범위 안에서 결과를 만족하였다.

분석 결과 실험시 예측되는 상황에 적용할 수 있는 측정 방법을 모색할 수 있었다. 이러한 방법을 활용해 실제 환경에서 AWG 라우터의 위상오차 보정시 정확한 위상 보정에 유용할 것이라 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. Takada et al., "Measurement of phase error distribution in silica-based arrayed-waveguide grating multiplexers by using fourier transform spectroscopy," Electron. Lett., Vol. 30, No. 20, pp. 1671-1672, 1994.
- [2] H. Yamada et al., "10GHz-spaced arrayed-waveguide grating multiplexer with phase-error-compensating thin-film heaters," Electron. Lett., Vol. 31, No. 5, pp. 360-361, 1995.
- [3] H. Yamada et al., "Crosstalk reduction in a 10-GHz spacing arrayed-waveguide grating by phase-error compensation," J. Lightwave Technol., Vol. 16, No. 3, pp. 364-371, 1998.
- [4] Chanberain, J., "The principle of interferometric spectroscopy," (John Wiley & Sons, Chichester), Chap. 7, pp. 200-204, 1979.
- [5] P.-L. Francois et al., "Three ways to implement interferential techniques: application to measurements of chromatic dispersion, birefringence, and nonlinear susceptibilities," J. Lightwave Technol., Vol. 7, No. 3, 1989.
- [6] C. Dragone, "An NxN Optical Multiplexer Using a Planar Arrangement of Two Star Couplers," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 3, No. 9, pp. 812-815, 1991.
- [7] H. Yamada et al., "Statically-phase-compensated 10GHz-spaced arrayed-waveguide grating," Electron. Lett., Vol. 32, No. 17, pp. 1580-1581, 1996.
- [8] H. Yamada et al., "10GHz-spaced arrayed-waveguide grating multiplexer with phase-error-compensating thin-film heaters," Electron. Lett., Vol. 31, No. 5, pp. 360-361, 1995.

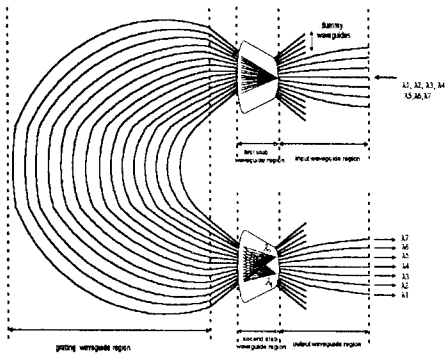


그림 1. 일반적인 AWG 라우터의 구조

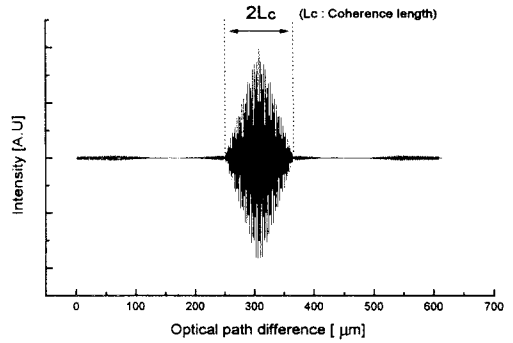


그림 4. i 번째 도파로에 의한 interferogram (Lc는 광파의 coherence 거리)

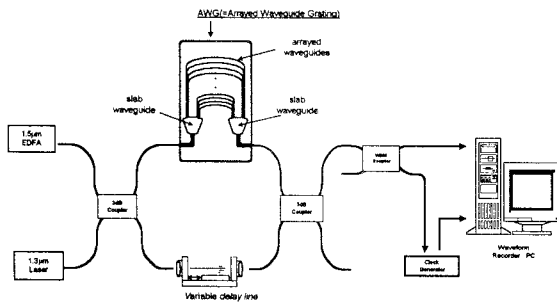


그림 2. AWG 라우터의 광도파로열의 경로 오차를 측정하기 위한 실험장치

표 1. 전산모의 실험을 통해 계산된 광도파로열의 경로차에 대한 위상

	예상되는 위상	계산상의 위상 (전산모의 실험)	1번째 간섭패턴을 기준으로 한 위상차이
1번째 간섭패턴	0°	-45.86°	-0°
2번째 간섭패턴	0°	-48.76°	-2.9°
3번째 간섭패턴	0°	-40.98°	4.88°
4번째 간섭패턴	0°	-50.34°	-4.48°
5번째 간섭패턴	0°	-52.36°	-6.5°

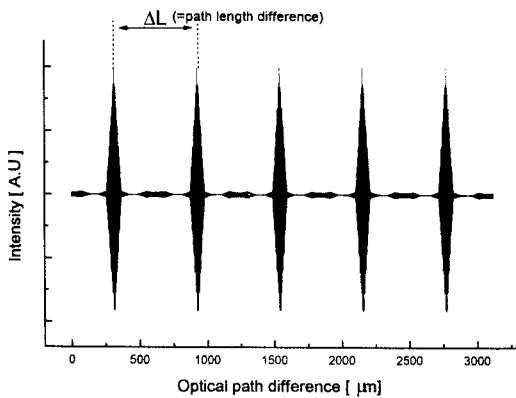


그림 3. 전산모의 실험을 통한 interferogram의 발생

표 2. 전산모의 실험을 통해 계산된 광도파로열의 경로차에 대한 위상

	예상되는 위상	계산상의 위상 (전산모의 실험)	1번째 간섭패턴을 기준으로 한 위상차이
1번째 간섭패턴	0°	-45.86°	
2번째 간섭패턴 ($\delta x_{2nd\ AWG} = 0.1\ \mu m$)	-23°	-74.2°	-28.34°
3번째 간섭패턴 ($\delta x_{2nd\ AWG} = 0.2\ \mu m$)	-46°	-90.41°	-44.55°
4번째 간섭패턴 ($\delta x_{2nd\ AWG} = 0.3\ \mu m$)	-69°	-122.12°	-76.26°
5번째 간섭패턴 ($\delta x_{2nd\ AWG} = 0.4\ \mu m$)	-92°	-148.29°	-102.43°