

몬테카를로 분석 방법을 이용한 AWG의 위상 오차 측정

고춘수[†] · 오용호 · 임성우

원광대학교 반도체·디스플레이학부
☎ 570-749 전북 익산시 신용동 344-2

(2011년 9월 16일 받음, 2011년 10월 17일 게재 확정)

몬테카를로 방법을 기반으로 한 수치해석을 이용하여 AWG(arrayed waveguide grating)의 위상 오차를 측정하는 방법을 제안한다. 진동수 영역 측정법에서 실험치와 가장 근접한 이론치를 구하기 위해 몬테카를로 방법을 사용하며 최적화된 이론치로부터 AWG 각 도파로의 진폭과 위상값들을 결정한다. 이 방법의 타당성을 검증하기 위해 모의실험을 수행하였다. AWG의 각 도파로에 임의로 위상 오차를 설정하여 가상의 실험치를 만들고 우리의 방법을 통해 거꾸로 위상 오차를 알아냈다. 모의실험 결과 간섭계 광원의 진동수 변조 범위가 AWG FSR(free spectral range)의 1.7 배보다 클 때, 그리고 위상 오차가 $\pm 50^\circ$ 이내일 때 매우 정확하게 위상 및 진폭을 측정할 수 있음을 확인하였다.

Measurement of the Phase Errors of AWG by Using the Monte-Carlo Analysis

Chun-Soo Go[†], Yong-Ho Oh, and Sungwoo Lim

Division of Semiconductor and Microelectronics Technology, Wonkwang University, 344-2 Shinyongdong, Iksan 570-749, Korea

(Received September 16, 2011; Accepted October 17, 2011)

We propose a new method to measure the phase errors of an AWG(arrayed waveguide grating) through Monte-Carlo analysis. In the frequency domain method, we used the Monte-Carlo method to fit the theory to the experimental results. The phase and amplitude values are obtained from the fitted theory. To verify our method, we carried out a simulation. Some phase errors were included to make a virtual interferogram and we measured the actual AWG phase errors from it by our method. The results show that our method gives good results if the laser tuning range is larger than 1.7 times of the AWG FSR(free spectral range) and if the phase errors are within $\pm 50^\circ$.

Keywords: Arrayed waveguide grating (AWG), AWG phase error, Monte-Carlo method, Interferometer, Fourier transform

OCIS codes: (060.0060) Fiber Optics and Optical Communications; (060.1810) Buffers, couplers, routers, switches, and multiplexer; (120.3180) Interferometry; (120.5050) Phase measurement

I. 서 론

AWG(arrayed waveguide grating)는 파장 분할 다중화(WDM) 광통신 시스템에서 신호를 다중화(multiplex)하거나 역다중화(demultiplex)하기 위한 핵심 소자이다. AWG의 성능은 채널간의 누화(crosstalk)에 의해 결정되며 이 값은 주로 AWG 각 도파로의 위상에 의존한다^[1, 2]. 그런데 수 센티미터에 달하는 AWG 도파로들의 길이를 파장보다도 매우 작은 정밀도로 제작하는 것은 매우 어려우며 따라서 위상 오차가 발생하기 마련이다. 이러한 위상 오차는 UV 조사법 등으로 보정할 수 있는데^[3, 4], 각 도파로의 위상을 정확히 측정하는 것이 그 선결 과제이다.

AWG의 투과 스펙트럼은 각 도파로들을 통과한 빛들이 중첩되어 나타난 결과이므로 그로부터 각 도파로의 위상을 알아낼 수는 없다. 각 도파로를 통과한 빛에 의한 신호를 분리할 필요가 있는데, Takada 등은 저간섭성 광원 간섭법(optical low coherence method)으로 이를 해결하였다^[5]. 그런데 이 방법으로 각 도파로의 위상을 구하기 위해서는 간섭신호의 최대치 사이의 위치를 매우 정밀하게 측정하거나^[6], 혹은 분리된 간섭 신호로부터 위상 오차를 계산해 내기 위한 별도의 알고리즘이 필요하다^[7]. 또한 수십 또는 수백 개에 달하는 도파로들의 간섭 신호를 모두 측정하기 위해서는 최대 경로차의 절반 이상에 해당하는 거리를 높은 정밀도로 움직일 수 있는 장치가 필요한데, 다채널 AWG로 갈수록 인접한 도파

[†]E-mail: kosoo@wku.ac.kr

로간의 길이차가 커 이 방법을 사용하기 곤란하다.

저간섭성 광원 간섭법에 비해 실험적 편의성을 개선한 방법이 진동수 영역 측정법(frequency domain measurement)이다^[8, 9]. 간섭계를 구성하는 것은 동일하지만 경로 길이가 아니라 광원의 진동수를 변화시키면서 간섭 신호를 측정하며 이를 푸리에 변환(Fourier transform)한 함수를 분석하여 위상을 측정한다. 진동수 변조 범위가 AWG의 FSR(free spectral range)보다 매우 크면 푸리에 변환된 함수가 각 도파로에 의한 신호들로 분리되어 각 도파로의 위상 신호를 알아내기 수월하다. 그러나 일반적으로 이러한 실험 조건을 만족하기는 어려워 각 도파로 신호들이 겹치게 되는데 그에 따라 위상값이 영향을 받는다. 따라서 측정된 간섭 신호로부터 정확한 위상값을 추출하기 위한 알고리즘이 필요하다.

이 논문에서는 몬테카를로 방법을 이용하여 AWG의 위상을 추출하는 새로운 방법을 소개한다. 푸리에 변환된 간섭 신호를 이론치와 비교하여 각 도파로의 위상과 진폭을 결정하는데 최적의 이론치를 구하기 위해 몬테카를로 방법을 사용한다. 2절에서는 간섭 신호 및 그 푸리에 변환에 대한 이론을 전개하고 3절에서는 자체 제작한 몬테카를로 방식의 프로그램을 통해 위상과 진폭을 구하는 과정을 기술한다. 4절에서는 이러한 분석 방법을 검증하기 위한 모의실험(simulation)에 대해 기술한다.

II. 이 론

2.1. AWG를 포함한 간섭계의 출력 세기 계산

AWG는 자유 전파 영역인 두 개의 슬랩(slab) 도파로와 이를 연결하는 도파로 열(arrayed waveguides), 그리고 입력 및 출력 도파로로 구성된다. 도파로 열의 각 도파로들은 일정한 경로차를 갖도록 설계되어 이들을 통과한 빛이 다시 만나 중첩되면 회절격자와 같은 역할을 하게 된다.

진동수 영역 측정법으로 AWG의 위상을 측정하기 위한 장치도를 그림 1에 나타냈다. 광섬유 간섭계의 한 쪽 경로에 AWG의 입력 도파로와 출력 도파로 중 하나를 연결한다. 파장 가변 레이저를 광원으로 사용하여 간섭계의 출력 세기를 진동수의 함수로 측정한다.

AWG의 k -번째 경로에 대해, 입사 레이저의 진동수 $\sigma(=$

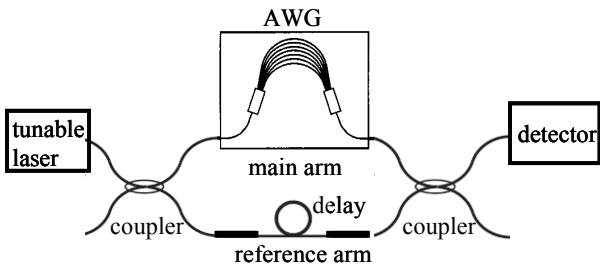


FIG. 1. The diagram of the experimental setup for measuring the phase errors in frequency domain method. The signal is the output of a AWG interferometer as a function of laser frequency.

$1/\lambda, \lambda$: 파장)에서의 투과함수(transfer function)를 다음과 같이 진폭과 위상으로 쓸 수 있다.

$$h_k(\sigma) = A_k(\sigma)e^{i\phi_k(\sigma)} \quad (1)$$

k -번째 경로의 굴절률 효과가 포함된 유효 길이(effective path length)를 L_k 라고 할 때 위상 $\phi_k(\sigma)$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_k(\sigma) = 2\pi L_k \sigma = 2\pi(L_o + k\Delta L + \epsilon_k)\sigma \quad (2)$$

여기서 L_o 은 AWG에서 가장 짧은 도파로를 포함한 경로($k=0$)의 유효 길이이고 ΔL 은 인접한 도파로간의 경로차이다. 이상적인 AWG에서는 인접한 도파로간의 경로차가 ΔL 로 모두 같아야 하지만 실제로는 조금씩 차이가 나며 ϵ_k 가 그 길이 오차에 해당한다. ϵ_k 에 $2\pi\sigma$ 를 곱하면 각 도파로의 위상 오차가 된다.

AWG가 N 개의 도파로로 구성되어 있다면, 간섭계에서 AWG가 포함된 경로의 전체 투과함수는 다음과 같다.

$$h(\sigma) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k(\sigma) = \sum_{k=0}^{N-1} A_k(\sigma)e^{i\phi_k(\sigma)} \quad (3)$$

입사광의 파동함수를 $E_o(\sigma)$ 라고 할 때, 이 경로를 통과한 파동은 입사광에 투과함수를 곱하면 되므로 다음과 같다.

$$E_{AWG}(\sigma) = E_o(\sigma) \sum_{k=0}^{N-1} A_k(\sigma)e^{2\pi i L_k \sigma} \quad (4)$$

간섭계의 또다른 경로(reference arm)를 통과한 파동함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_{ref}(\sigma) = E_o(\sigma) A_r(\sigma)e^{2\pi i \sigma L_r} \quad (5)$$

여기서 A_r 은 이 경로의 투과 진폭이고 L_r 은 유효 경로 길이이다.

간섭계에서 두 경로를 통과한 파동이 중첩되었을 때 파동함수와 그 세기는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} E(\sigma) &= E_{AWG}(\sigma) + E_{ref}(\sigma) \\ I(\sigma) &= |E(\sigma)|^2 = I_{AWG}(\sigma) + I_{ref}(\sigma) + 2Re[E_{AWG}(\sigma)E_{ref}^*(\sigma)] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서

$$\begin{aligned} I_{AWG}(\sigma) &= |E_{AWG}(\sigma)|^2 = I_o(\sigma) \left| \sum_{k=0}^{N-1} A_k(\sigma)e^{2\pi i L_k \sigma} \right|^2, \\ I_{ref} &= |E_{ref}(\sigma)|^2 = I_o(\sigma) I_{ref}(\sigma) \end{aligned} \quad (7)$$

이며 $I_o(\sigma)$ 은 입사광인 레이저의 세기이다. A_k 와 A_r 은 실수로 정의할 수 있으므로, 식 (4), (5)를 (6)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$I(\sigma) = I_{AWG}(\sigma) + I_{ref}(\sigma) + 2I_o(\sigma)A_r(\sigma) \sum_{k=0}^{N-1} A_k(\sigma) \cdot \cos[2\pi(L_k - L_r)\sigma] \quad (8)$$

레이저의 스펙트럼은 어떤 특정한 분포를 갖고 있고, 간섭계에서 실제 측정하는 빛의 세기는 식 (8)의 세기를 σ 에 대해 적분하여 얻을 수 있다. 그런데 선평이 매우 좁은 레이저를 광원으로 사용하는 경우에는 다음과 같이 델타 함수로 가정할 수 있다.

$$I_o(\sigma') = I_o\delta(\sigma' - \sigma) \quad (9)$$

그러면 광원의 진동수가 σ 일 때 간섭계에서 측정되는 간섭함은 다음과 같이 된다.

$$I_f(\sigma) \equiv I(\sigma) - I_{AWG}(\sigma) - I_{ref}(\sigma) = 2I_r A_r(\sigma) \sum_k A_k(\sigma) \cos[2\pi(L_k - L_r)\sigma] \quad (10)$$

2.2. 간섭함의 푸리에 변환

파장 가변 레이저의 파장을 $\sigma_o - \Delta\sigma/2$ 에서 $\sigma_o + \Delta\sigma/2$ 까지 변화시키면서 I_f 를 측정하고 이를 유한 범위에서 푸리에 변환한 함수를 $J(x)$ 라고 하자.

$$J(x) \equiv \int_{\sigma_o - \Delta\sigma/2}^{\sigma_o + \Delta\sigma/2} I_f(\sigma) e^{-2\pi i\sigma x} d\sigma = \int_{-\infty}^{\infty} I_f(\sigma) \text{rect}\left[\frac{\sigma - \sigma_o}{\Delta\sigma}\right] e^{-2\pi i\sigma x} d\sigma \quad (11)$$

여기서 적분 안에 있는 rect 함수는 중심이 σ_o 이고 폭이 $\Delta\sigma$ 인 사각 함수(rectangle function)이다. 식 (10)을 위의 적분에 대입하여 계산하면 다음의 결과를 얻는다^[10].

$$J(x) = I_r A_r \sum_k A_k \left\{ e^{2\pi i(L_k - L_r - x)\sigma_o} \text{sinc}[\Delta\sigma(L_k - L_r - x)] + e^{-2\pi i(L_k - L_r + x)\sigma_o} \text{sinc}[\Delta\sigma(L_k - L_r + x)] \right\} \quad (12)$$

여기서 $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$ 이다. 위 계산 과정에서 A_r 과 A_k 의 진동수 의존성은 무시하였다. 진동수에 따라 이 값들이 변할 수는 있지만 매우 천천히 변하므로 푸리에 변환에의 영향은 무시할 수 있다. 식 (12)를 보면 $J(x)$ 는 sinc 함수들의 합이 됨을 알 수 있다. 각 sinc 함수들의 중심 위치는 $x = \pm(L_k - L_r)$ 이고 폭은 $\frac{1}{\Delta\sigma}$ 이며 위상은 $e^{\pm 2\pi i(L_k - L_r - x)\sigma_o}$, 그리고 진폭은

A_k 이다. 즉, 각 sinc 함수들의 중심 위치에는 L_k 에 대한 정보가 들어 있으며, 각 sinc 함수들의 높이에는 A_k 에 대한 정보가 들어 있다. 만일 측정 과정에서 레이저의 진동수 변조 범위($\Delta\sigma$)가 AWG의 FSR(free spectral range= $1/\Delta L$)보다 충분히 넓으면 sinc 함수들이 서로 완전히 분리되어 AWG 각 경로의 위상과 진폭을 쉽게 측정할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 많은 경우에 이러한 조건을 만족하기 어려워 이웃하는 sinc 함수들이 겹치게 되므로 위상과 진폭을 측정하기 어렵다. 따라서 다음 절에서 기술할 분석 방법이 필요하다.

III. 몬테카를로 방법을 이용한 위상 및 진폭 최적화

AWG가 포함된 간섭계에서 측정한 실험치를 이론적으로 계산한 이론치와 비교하여 AWG의 위상과 진폭을 결정한다. 실험은 진동수 영역 측정법으로 하며, 레이저 광원의 진동수를 변화시키면서 세기를 측정하여 식 (10)과 같은 간섭함을 구한 후 이를 푸리에 변환한 것을 실험치로 삼는다. 이론치는 식 (12)를 이용하여 계산하며 이를 실험치와 비교하여 위상 및 진폭값을 결정하는데, 이론치를 최적화하는 몬테카를로 프로그램을 자체 제작하였다.

식 (12)에서 L_r 의 절대값은 의미가 없고 L_k 와의 차이만이 의미가 있다. 실제 AWG에서도 L_k 의 절대값보다는 이웃하는 경로와의 차이만이 의미가 있다. 따라서 식 (12)의 L_r 을 0으로 놓아도 무방하다. 다만, 실험적으로는 L_r 이 간섭 신호의 진동 주기를 결정하므로 측정 장치의 성능에 맞추어 조절할 필요가 있다.

위상과 진폭값을 최적화하는 몬테카를로 과정은 다음과 같다. AWG가 N 개의 도파로로 이루어져 있다면 N 개의 진폭값 $\{A_k\}$ 와 N 개의 위상(길이)값 $\{L_k\}$ 의 초기값을 임의로 부여하고 이론치와 비용함수를 계산한다. 비용함수는 x 의 각 점에서 이론값과 실험값의 차이를 제공하여 모두 더한 값으로 정의하였다. $2N$ 개의 $\{A_k, L_k\}$ 중에서 무작위로 하나를 선택해 미세하게 변화시킨 후 다시 비용함수를 계산한다. 비용함수가 감소하면 변화된 진폭 또는 위상으로 원래의 값을 대체하고, 반대로 증가하면 변화시킨 A_k 또는 L_k 를 원래의 값으로 되돌린다. 이와 같은 최적화 과정을 그림 2에 나타냈으며 비용함수의 실질적인 변화가 없을 때까지 또는 선택된 진폭 또는 위상 중에서 그 값이 변경되는 경우가 거의 없을 때까지 그 과정을 되풀이한다. $\{A_k\}$ 의 초기값들은 균일하게 주거나 혹은 가우스 분포를 이루도록 한다. $\{L_k\}$ 의 초기값들은 무작위로 줘도 되지만 이상적인 설계치로 시작하는 것이 계산 시간 절약에 도움이 된다. 충분히 최적화가 이루어진 후의 $\{A_k, L_k\}$ 값들이 우리가 원하는 진폭과 위상(길이)이 된다.

IV. 모의실험

몬테카를로 방법을 이용한 AWG의 위상 및 진폭 측정법의 타당성을 검증하기 위해 가상의 실험치를 만들고 이로부터

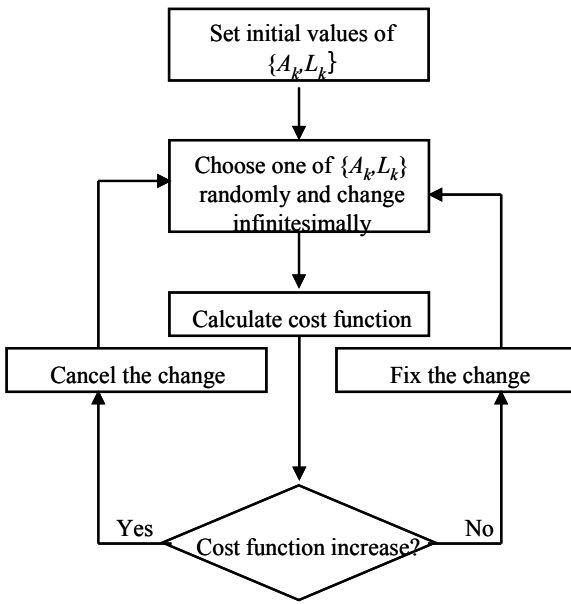


FIG. 2. A diagram showing the Monte-Carlo optimization process.

위상 및 진폭을 측정하여 원래의 값과 비교하였다. AWG의 각 도파로에 임의로 위상 오차와 진폭값을 설정하여 식 (10)과 같은 가상의 간섭 신호를 진동수(σ)의 함수로 만들고 이 신호를 푸리에 변환하여 가상의 실험치를 얻었다. 그리고 앞의 3절에서 기술한 몬테카를로 최적화 과정을 통해 위상 및 진폭을 측정하였다.

AWG의 도파로 수는 100 개로 설정하였다. 각 도파로들의 위상 오차는 무작위로 설정하거나 연속적으로 변하는 함수 형태로 설정하였다. 그림 3(a), (b)에 무작위 위상 오차와 연속 함수 위상 오차의 예를 나타냈다. 투과함수의 진폭은 중심 부근에서 크고 가장자리로 갈수록 감소하며 일반적으로 가우스 함수 분포를 보이므로 여기서도 진폭 분포를 반치폭(FWHM)이 40인 가우스 함수로 하였다. 그림 3(c)에서 그 진폭 분포를 볼 수 있다.

간섭계에서 빛의 파장 변조 범위는, 일반적으로 광통신 분석 장비에서 많이 사용하는 1500 nm로부터 1600 nm까지로 고정하였다. 간섭계에서 AWG가 포함된 경로의 최단 길이와 다른 경로 길이와의 차이는 실제 측정 조건을 고려하여 10 mm로 하였다. 이웃한 도파로간의 경로차(ΔL)가 굴절률 효과를 포함하여 50 μm 이고 각 도파로의 위상오차와 진폭이 각각 그림 3(a), (c)와 같은 AWG에 대해 구한 가상의 간섭 신호를 그림 4에 나타냈다. 그림에서 두 개의 봉우리(peak)를 볼 수 있는데 두 봉우리 사이의 간격이 AWG의 FSR에 해당한다. 파장에 따라 간섭 신호의 세기가 진동하는 것을 확대된 그림에서 확인할 수 있는데 이 진동의 주기가 간섭계 두 팔의 경로차에 의해 결정된다.

그림 4의 간섭 신호를 푸리에 변환하여 얻은 가상의 실험치를 그림 5에 나타냈다. 푸리에 변환을 하면 그 결과가 복소수가 되는데 그림에 표시한 것은 그 크기에 해당한다. 약

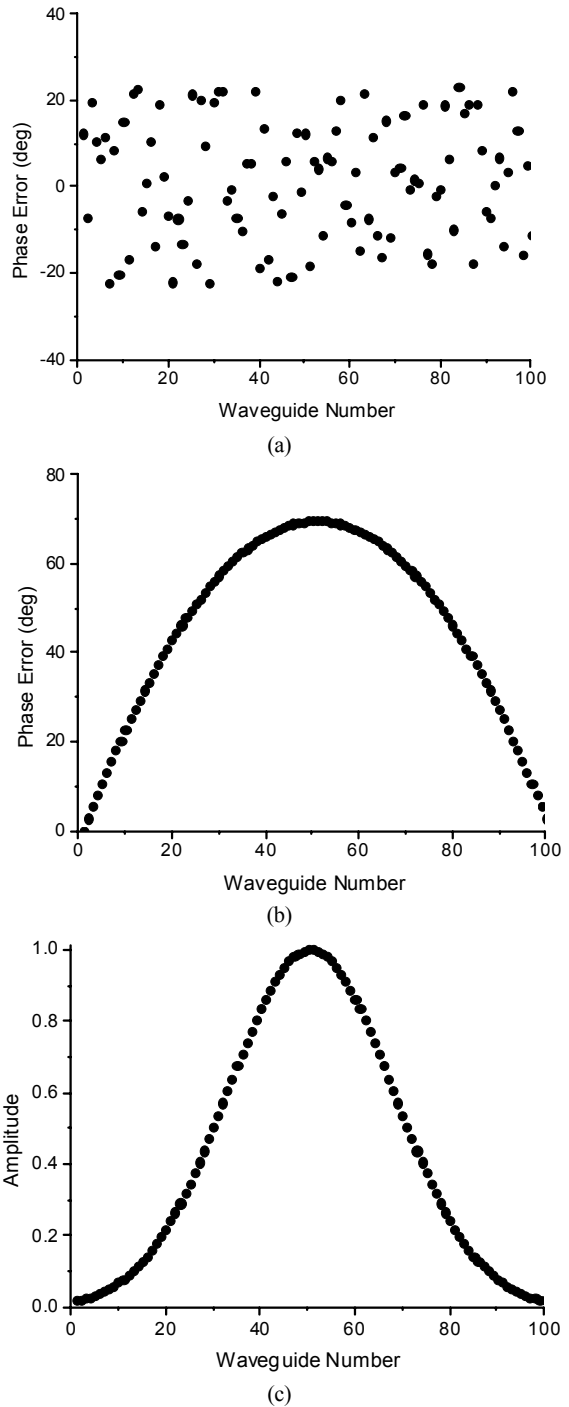


FIG. 3. (a) Random phase errors which are given initially to the waveguides of the AWG. (b) Continuous function-type phase error distribution (c) Normalized Gaussian amplitude distribution of width(FWHM) 40.

10,000 개의 간섭 신호 데이터를 사용하여 푸리에 변환하였다. 그림을 보면 푸리에 변환된 신호가 좁은 봉우리들로 이루어져 있음을 알 수 있는데 중심 부분을 확대한 작은 그림을 보면 이를 확인할 수 있다. 봉우리들의 개수는 약 100 개로 도파로 개수와 비슷하다. 푸리에 변환의 이론식에 해당하

는 식 (12)와 일치하는 결과라 할 수 있다.

그림 5의 실험치로부터 몬테카를로 최적화 과정을 통해 구한 위상 및 진폭의 결과를 그림 6에 나타냈다. 1200 개의 점에서 이론치를 실험치에 근접시키는 최적화 과정에 소요된 컴퓨터 작동 시간은 약 100 분이다. 그림에는 위상 및 진폭의 참값과의 차이만을 표시하였는데, 여기서 참값이란 그림 3에서와 같이 처음에 설정된 위상 및 진폭값들을 의미한다. 그림 (a)를 보면, 100 개의 도파로 중 양쪽 가장자리 20 개씩을 제외한 가운데 60 개에 대해서 1° 이내의 오차로 AWG의 위상 오차를 정확히 측정하였음을 알 수 있다. 양쪽 가장자리에서는 정확히 측정하지 못했는데 그 이유는 해당 도파로의 진폭이 작아서 몬테카를로 과정의 비용함수에 기여하는

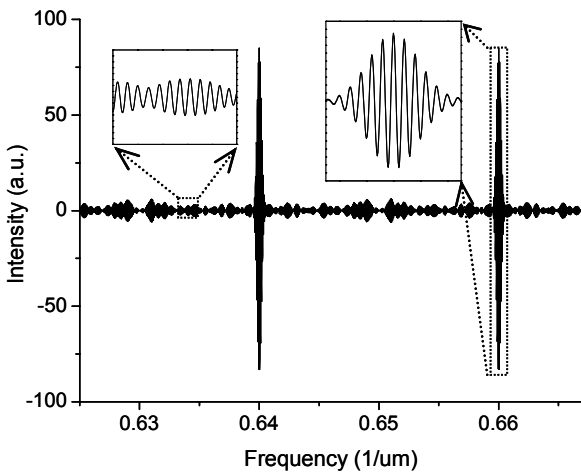


FIG. 4. The interferogram of the AWG interferometer as a function of the laser frequency(σ). ΔL of AWG is 50 μm . The phase errors and the amplitudes are the same as those of FIG. 3(a),(c), respectively. The minimum path difference of the AWG arm and the reference arm is 10 mm.

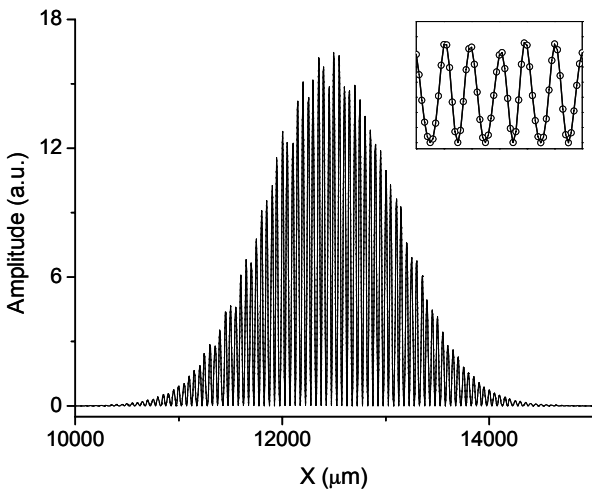


FIG. 5. The Fourier transform of the interferogram of Fig. 4. The inset is the enlargement of the central part. The symbol in the inset represents the final result of the Monte-Carlo optimization.

정도가 작기 때문으로 파악된다. 진폭이 작은 도파로에 대해 위상 측정이 부정확한 것은 기존의 모든 AWG 측정 방법에서 공통적으로 겪는 문제이며, 진폭이 작은 도파로가 AWG의 성능에 미치는 영향이 적으므로 무시할 수 있다. 20 번째 도파로의 진폭은 중심 도파로 최대 진폭의 약 20%에 해당하므로 진폭이 이보다 작은 도파로에 대해서는 위상 오차를 구하기 어렵다고 할 수 있다. 그림 (b)를 보면 모든 도파로의 진폭은 1.3% 이내의 오차로 매우 정확히 측정하였음을 알 수 있다.

그림 6에서와 같은 AWG의 위상 및 진폭을 식 (12)에 대입하여 구한 이론치를 그림 5에 가상의 실험치와 함께 나타냈다. 그림 5에서 작은 상자 안의 확대된 그림을 보면 실험치와 이론치가 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 최적화가 잘 되었다고 판단할 수 있다.

식 (12)에서 볼 수 있듯이 ΔL 이 클수록 푸리에 변환된 함수에서 sinc 함수들이 서로 분리되고 따라서 AWG의 위상 및 진폭을 구하기 용이하다. ΔL 과 진동수 변조 범위($\Delta\sigma$)와의 관계에 따른 측정 가능성을 알아보기 위해 다른 조건들은

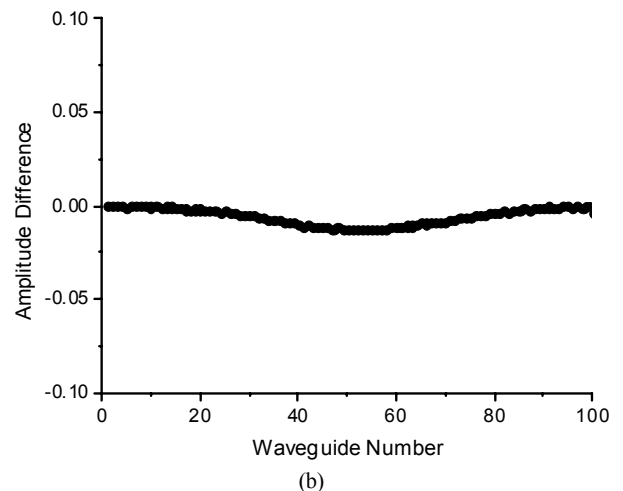
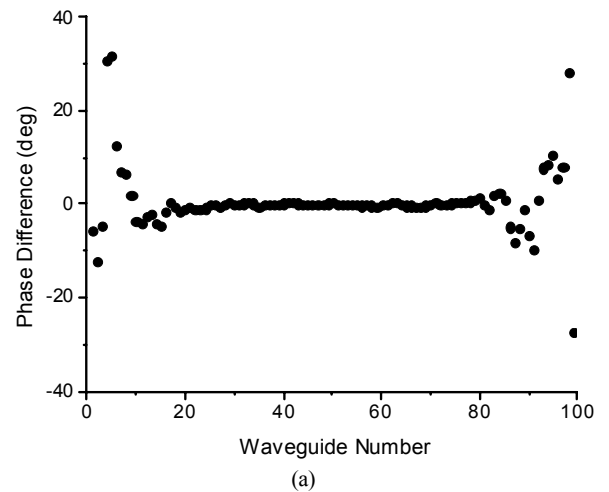


FIG. 6. The differences of the measured and given values of the phases(a) and amplitudes(b) when $\Delta L = 50 \mu\text{m}$.

고정하고 ΔL 의 값을 달리하며 위상 및 진폭을 측정하였다. 측정 결과 진폭에 대해서는 ΔL 에 따라 별 차이를 보이지 않았지만 위상에 대해서는 큰 차이를 보였다. 그 결과를 그림 7에서 볼 수 있다. 그림을 보면 ΔL 이 30 μm 일 때에는 측정치가 참값과 큰 차이를 보이지만 40 μm 이상일 때에는 그 차이가 작음을 알 수 있다. 즉, 간섭계 레이저의 파장 변조 범위가 1.5 μm 에서 1.6 μm 일 때, ΔL 이 30 μm 이면 AWG의 위상을 측정할 수 없지만 40 μm 이면 측정 가능함을 알 수 있다. ΔL 이 40 μm 일 때 AWG의 FSR은 0.025 μm^{-1} 이고, 레이저의 파장 변조 범위를 진동수 범위($\Delta\sigma$)로 환산하면 0.042 μm^{-1} 이므로 따라서 $\Delta\sigma > (1.7\text{FSR})$ 이면 우리의 방법으로 위상을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

일반적으로 몬테카를로 과정에서 초기 변수의 범위가 너무 크면 전체 최적 상태(global optimum)로 수렴하지 못하고 국부적인 최적 상태(local optimum)에 빠질 수 있다. AWG에 대해서도 초기 설정 위상 오차가 너무 크면 정확한 값을 측정하지 못할 수 있다. 측정 가능한 위상 오차 범위를 알기 위해 초기 위상 오차를 더 큰 폭의 무작위 값들로 설정하고 앞서와 같은 방법으로 측정하였다. ΔL 은 50 μm 이며 다른 조건은 앞서와 같다. 그 결과를 그림 8에서 볼 수 있다. 상자 안의 각도들은 초기에 설정된 무작위 위상 오차의 최대 절대값이다. 즉, '50°'는 각 도파로들의 위상 오차가 $\pm 50^\circ$ 이 내에 분포함을 의미한다. 그림을 보면 위상 오차가 75° 이상일 때 위상을 측정하기 어렵지만 50° 이내의 오차는 우리의 방법으로 위상을 정확히 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

ΔL 과 위상 오차 폭에 따른 경향성을 알아보기 위해 AWG 중앙 60 개의 도파로에 대해 측정값과 참값의 차이의 절대값을 평균해 보았다. 그림 9에 그러한 평균 편차를 나타냈다. ΔL 이 40 μm 이상일 때, 그리고 위상차 최대폭이 50° 이하일 때 5° 이하의 평균 편차를 보임을 알 수 있다. 한 가지 특이한 것은 ΔL 이 70 μm 일 때의 평균 편차가 40~50 μm 일 때보다 오히려 크다는 것이다. 푸리에 공간에서 sinc 함수들의 간

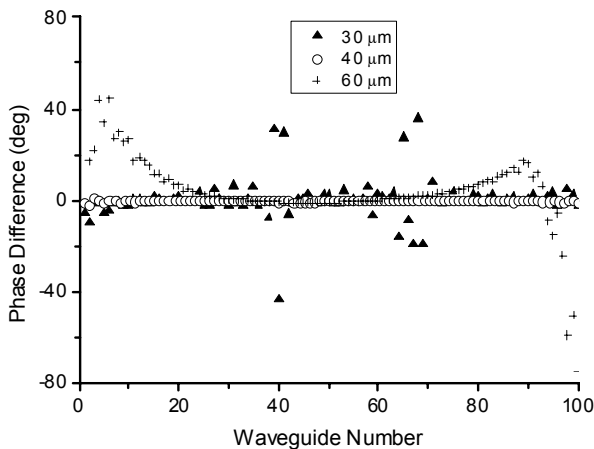


FIG. 7. The differences of the measured and given values of the phases for various ΔL . The other parameters are the same as those in Fig. 6.

격이 커졌을 때 그 중첩된 함수가 좀 더 복잡한 모양이 되어 최적화가 덜 진행될 수 있다고 생각하고 있으나 정확한 원인을 찾기 위해 현재 연구중이다.

그림 10은 AWG 중앙 60 개의 도파로에서 측정값과 참값의 차이의 최대값을 구한 결과이다. 이 역시 ΔL 이 40 μm 이상일 때, 그리고 위상차 최대폭이 50° 이하일 때 최대 편차도 매우 적음을 보여준다.

이제까지의 모든 결과는 AWG 각 도파로의 위상 오차를 무작위로 설정한 경우이다. 위상 오차가 연속적인 함수꼴일 때 측정 가능성을 알아보기 위해 위상 오차를 그림 3(b)와 같이 이차함수로 설정하고 같은 과정으로 측정한 결과를 그림 11에 나타냈다. 이 경우에도 역시 중앙 60 여개의 도파로에 대해 비교적 정확히 위상 오차를 측정할 수 있음을 알 수 있다.

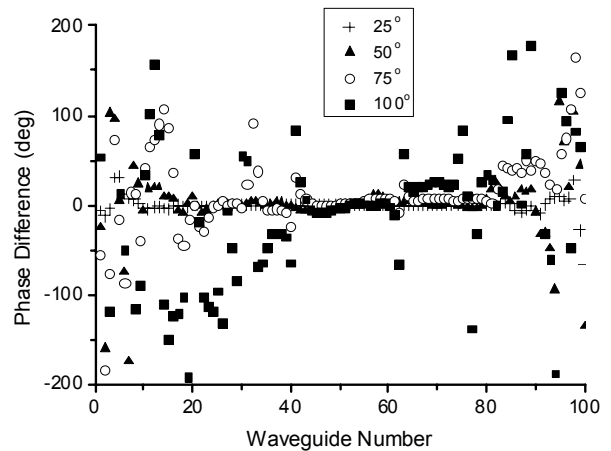


FIG. 8. The differences of the measured and given values of the phases. The numbers in the box mean the limit of the randomly given phases. ΔL is 50 μm and the other conditions are the same as before.

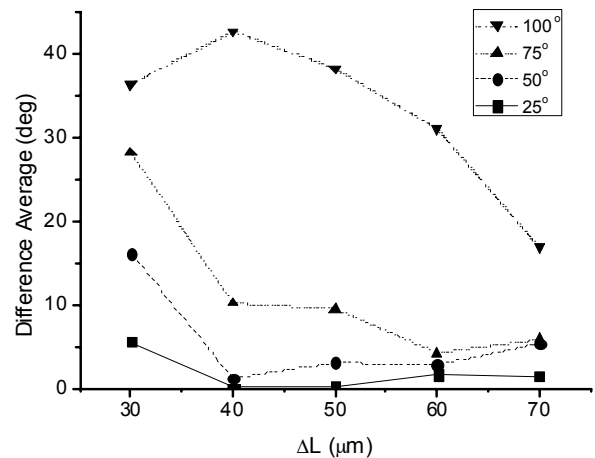


FIG. 9. The average of the absolute values of the differences between the measured and given values of the phases for 60 waveguides in the central part of AWG. The horizontal axis is for ΔL and the number in the box is the same as those in Fig. 8.

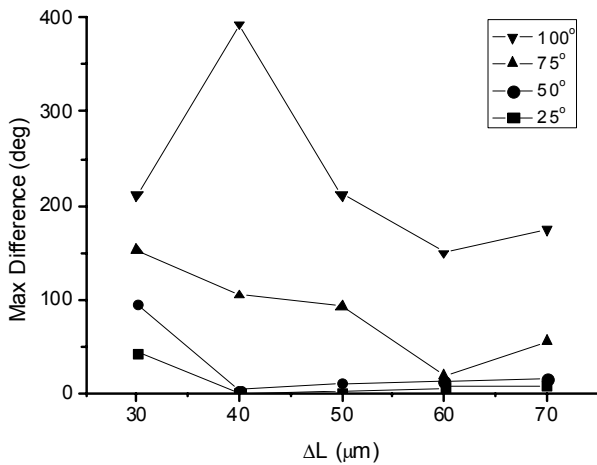


FIG. 10. The maximum values of the differences between the measured and given values of the phases for 60 waveguides in the central part of AWG. All the conditions are the same as those in Fig. 8.

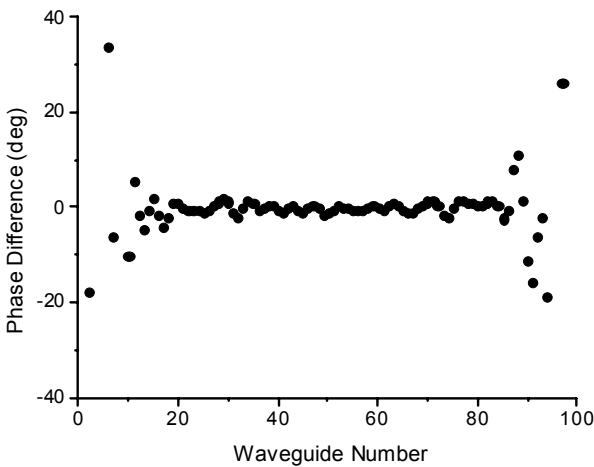


FIG. 11. The differences of the measured and given values of the phases when the phase errors are given initially by the second order polynomial as Fig. 3(b).

V. 결 론

간섭 신호의 푸리에 공간에서 몬테카를로 최적화 과정을 통해 AWG의 위상 및 진폭을 측정하는 방법을 제안하고 모의실험을 통해 이를 검증하였다. 간섭계의 파장을 1500 nm 부터 1600 nm까지 변조한다고 할 때 AWG의 도파로 경로차가 40 μm 이상이면 그 위상과 진폭을 정확하게 측정할 수 있었다. 또한 AWG 각 도파로의 위상 오차가 ±50° 이내이면 측정할 있었다. 각 도파로의 위상 오차 분포를 무작위로 하거나 연속적인 함수 형태로 설정한 경우 모두 측정 가능하였

지만 진폭이 최대값의 20% 이하인 도파로에 대해서는 위상을 측정하기 곤란하였다. 측정 가능한 범위에서 측정값과 초기 설정값과의 차이의 평균은 위상에 대해서는 3° 이하, 진폭은 1% 이하였다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행되었습니다.

References

1. M. K. Smit and C. van Dam, "Phasar-based WDM-devices: principles, design and applications," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **2**, 236-250 (1996).
2. E. C. Sim, F. M. Abbou, and A. R. Faidz, "System degradation due to phase error induced crosstalk in WDM optical networks employing arrayed waveguide grating multi/demultiplexer," *Opt. Quantum Electron.* **39**, 553-560 (2007).
3. K. Takada, Y. Takada, A. Yokoda, and S. Satoh, "Metal mask fabrication with an inkjet printer for AWG phase trimming using a photosensitive refractive index change," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 813-815 (2005).
4. W. Jiang, N. K. Fontaine, F. M. Soares, J. H. Baek, K. Okamoto, and S. J. B. Yoo, "Dynamic phase error compensation for high-resolution InP arrayed-waveguide grating using electro-optic effect," in *Proc. LEOS 2008* (Sorrento, Italy, Sep. 2008), pp. 53-54.
5. K. Takada, H. Yamada, and Y. Inoue, "Optical low coherence method for characterizing silica-based arrayed-waveguide gratings multiplexers," *J. Lightwave Technol.* **14**, 1677-1689 (1996).
6. Y. K. Song, N. C. Heo, and Y. Chung, "Low coherence interferometer for measurement of path length errors in arrayed-waveguide grating," *J. Opt. Soc. Korea* **15**, 539-546 (2004).
7. J. A. Lazaro, R. Wessel, J. Koppenborg, G. Dudziak, and I. J. Blewett, "Inverse Fourier transform method for characterizing arrayed-waveguide grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15**, 93-95 (2003).
8. K. Takada and K. Okamoto, "Frequency-domain measurement of phase error distribution in narrow-channel arrayed waveguide grating," *Electron. Lett.* **36**, 160-161 (2000).
9. K. Takada, T. Yokota, and T. Horose, "Increased sampling rate with Holbert transformation for AWG phase error measurement in frequency domain," *Electron. Lett.* **44**, 1484-1485 (2008).
10. J. D. Gaskil, *Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics* (John Wiley & Sons, New York, USA, 1978) p. 181.