

Design and Analysis of a Receiver-Transmitter Optical System for a Displacement-Measuring Laser Interferometer

Seok-Jae Yun and Cheon-Seog Rim[†]

*Department of Computer, Communications, and Unmanned Technology, Hannam University,
70, Hannam-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34430, Korea*

(Received February 6, 2017; Revised manuscript February 22, 2017; Accepted February 27, 2017)

We present a new type of receiver-transmitter optical system that can be adapted to the sensor head of a displacement-measuring interferometer. The interferometer is utilized to control positioning error and repetition accuracy of a wafer, down to the order of 1 nm, in a semiconductor manufacturing process. Currently, according to the tendency of scale-up of wafers, an interferometer is demanded to measure a wider range of displacement. To solve this technical problem, we suggest a new type of receiver-transmitter optical system consisting of a GRIN lens-Collimating lens-Afocal lens system, compared to conventional receiver-transmitter using a single collimating lens. By adapting this new technological optical structure, we can improve coupling efficiency up to about 100 times that of a single conventional collimating lens.

Keywords: Receiver-Transmitter optical system, GRIN lens, Collimating lens, Afocal optical system

OCIS codes: (080.0080) Geometric optics; (080.3620) Lens system design; (080.2740) Geometric optical design; (080.4295) Nonimaging optical systems

위치변위 레이저 간섭계용 송수신 광학계의 설계 및 분석

윤석재 · 임천석[†]

한남대학교 컴퓨터통신무인기술학과
☎ 34430 대전광역시 대덕구 한남로 70

(2017년 2월 6일 받음, 2017년 2월 22일 수정본 받음, 2017년 2월 27일 게재 확정)

초정밀도를 요구하는 반도체 소자 공정에서 웨이퍼의 위치와 반복정밀도를 파장의 수백분의 일로 오차가 거의 없는 상태에서 제어하기 위해 위치변위 레이저 간섭계가 필요하다. 특히 제조공정에서는 생산단가의 인하압박으로 인해 웨이퍼의 대형화가 시도되고 있고 이에 따라 넓은 변위량을 측정하면서 나노미터 급의 위치 정밀도를 지닌 레이저 간섭계가 더욱 절실하게 요구된다. 이런 기술적인 문제를 해결하기 위해서 간섭계에 사용되는 송수신 광학계에도 특별한 광학적인 고안이 필요하게 된다. 본 논문에서는, 송수신 광학부로서 단순하게 콜리메이팅 렌즈만을 사용하는 기존의 방식 대신에, GRIN 렌즈-콜리메이팅 렌즈-무초점 광학계로 구성되는 새로운 형식의 조금 복잡한 형태의 광학구조를 제안하였고 이를 통해 반사된 후 되돌아와 간섭계로 결합되는 광신호의 효율을 약 100배 정도 높일 수 있었다.

Keywords: 송수신 광학계, GRIN 렌즈, 콜리메이팅 렌즈, 무초점 광학계

OCIS codes: (080.0080) Geometric optics; (080.3620) Lens system design; (080.2740) Geometric optical design; (080.4295) Nonimaging optical systems

I 서 론

위치변위 레이저 간섭계는 수 나노에서 수십 나노미터 거리를 측정하는데 사용된다. 원리적으로, 레이저 간섭계는 레

이저광을 측정대상에 조사하고 이를 반사시켜 측정대상의 이동거리, 각도, 변위 등에 대한 정보를 포함한 반사광을 광검출기에서 감지하고, 그 이동한 거리를 계측하는 구조로 되어 있다. 산업적으로, 위치변위 레이저 간섭계는 나노 스케

[†]E-mail: csrim@hnu.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

일의 정밀도를 유지하면서 수 미터까지의 넓은 변위를 측정할 수 있는 시스템으로서 초정밀 공작기계, 반도체 및 디스플레이 산업, 그리고 생명공학 분야에 널리 응용된다. 최근 반도체 소자 크기의 증가에 따라 웨이퍼의 대형화가 시도되고 있고, 이에 대한 대응방안으로 나노미터 급의 정밀도를 지니면서 넓은 변위량을 측정할 수 있는 레이저 간섭계가 반도체 생산공정에서 많이 요구된다¹⁻³.

레이저 광원에서 발생한 광을 두 갈래로 나누고, 어느 한 쪽 광 경로에 지연 시간을 주어 다시 모이도록 하면 두 광의 경로 차이에 의하여 간섭무늬가 발생한다. 레이저를 이용한 광 간섭계가 사용되는 이유는 레이저의 가간섭(coherence) 길이가 길어 광 간섭무늬를 쉽게 관측할 수 있고 또 간섭무늬는 레이저 파장의 정수배로 나타나기 때문에 광 파장에 해당하는 매우 미소한 변화까지도 측정 가능하기 때문이다. 실제로 변위측정에 사용되는 레이저 간섭계는 헤테로다인 간섭계로서 제만효과에 의해 발생하는 두 개의 유사 주파수 성분을 활용하는 방식이고, He-Ne 레이저에서 이 주파수 성분들은 서로 직교하는 편광면을 갖는 직선편광으로 약 1.8 MHz의 주파수 차를 갖는다. 이들 두 주파수의 광 성분들은 참조신호와 측정용으로 활용되고 한 쪽은 반사, 다른 쪽은 투과시켜 분리시킨 후 다시 합성하는 방식으로 위치변위를 측정한다⁴⁻⁶.

이와 같은 간섭계를 노광 장비에 구성하되, 간섭계의 이동 반사경을 노광 장비의 스테이지에 장착하여 스테이지와 함께 움직이도록 하면, 광 디텍터에서 관측되는 간섭무늬는 스테이지의 위치 변화에 따라 변화하므로 이를 전기적 신호로 판독하여 스테이지의 위치 변화를 판독할 수 있다. 그러나 레이저 간섭계는 매우 민감하여 외부의 영향에 의해서도 그 간섭무늬가 변화할 수 있다. 즉, 스테이지의 위치변화뿐만 아니라 공기의 대류 또는 복사에 의한 요동에 의해서 공기의 굴절률이 변화되고 (이로 인해) 광 경로가 바뀌어 간섭무늬에 노이즈가 발생할 수 있다. 최근에는 간섭무늬로 판독하는 순수한 의미의 레이저 간섭계보다 더욱 작은 분해능을 갖고 환경요인에 의한 영향도 적게 받는 정전용량센서 레이저간섭계가 많이 사용된다. 하지만, 정전용량센서는 최대 측정범위가 수 마이크로미터에 한정되고 넓은 변위를 측정하는데 제한이 있는 등 실용성에 문제점이 많다. 또한, 측정대상이 되는 이동 반사경에서 반사되어 되돌아오는 광은 이동 반사경의 틸팅에 의해 수신효율이 급감하게 되는 문제점도 존재한다^{7,8}.

본 논문은 정전용량센서 레이저간섭계에서 발생하는 이동 반사경의 틸팅에 의한 수신효율의 급감문제를 해결하고자 출발한 연구이다. 본 연구는 이 문제를 해결하기 위해 종래와 같이 송수신 광학부로서 콜리메이팅 렌즈만을 사용하는 방식을 취하지 않고 새로운 방식의 광학시스템을 구성하였다. 즉, 본 연구에서는 GRIN 렌즈-콜리메이팅 렌즈-무초점 광학계로 구성되는 종래와는 완전히 차별화된 새로운 형식의 광학구조를 제시한다. 이 구성은 본 저자들에 의해 특허로도 출원되었다. 결론적으로 본 연구의 새로운 광학구조에 의해 간섭계로 커플링되는 광 수신효율은 기존보다 약 100

배 정도 증대가 됨이 확인되었다.

II. 위치변위 레이저 간섭계의 광 수신효율 증폭을 위한 송수신 광학계의 구성

본 연구에서는 위치변위 레이저 간섭계의 송수신 광학부로서 기존의 콜리메이팅 렌즈만을 사용하는 단순한 형태와는 달리 GRIN 렌즈-콜리메이팅 렌즈-무초점 광학계로 구성된 조금 복잡한 형태의 새로운 광학구조를 도입한다. 비교를 위해, 먼저 송수신 광학부로서 기존의 콜리메이팅 렌즈만을 사용할 때 발생하는 광신호의 수신 결합효율문제에 대해 설명한다.

그림 1은^[1] 광섬유를 사용하는 위치변위 레이저간섭계의 도식적인 그림을 보여주고 있다. 그림 1에서는 센서헤드부분과 콜리메이팅 렌즈 부분이 나타나 있다. 그림 2는 그림 1의 콜리메이팅 렌즈부분을 확대하여 그려놓은 것인데, 이동 반사경의 틸팅에 의해 광섬유에서 δ 만큼의 횡위치변위가 발생하고 있음을 보여주고 있다. 이동 반사경 α 만큼의 틸팅에 의해 반사광은 2α 만큼 각변위가 일어나고 결과적으로 광섬유에서는 δ 만큼 횡위치변위가 발생한다. 좀 더 자세히 설명하면, 직경 D 의 레이저 빔이 이동 반사경에 입사되었을 때 콜리메이팅 렌즈로 되돌아오는 빔은 렌즈 면에서 H 값만큼의 위치이동이 발생하고 이로 인해 광섬유 단면에서 δ 만큼의 횡위치변위가 나타나게 된다. 이들의 관계에 대해서는 식

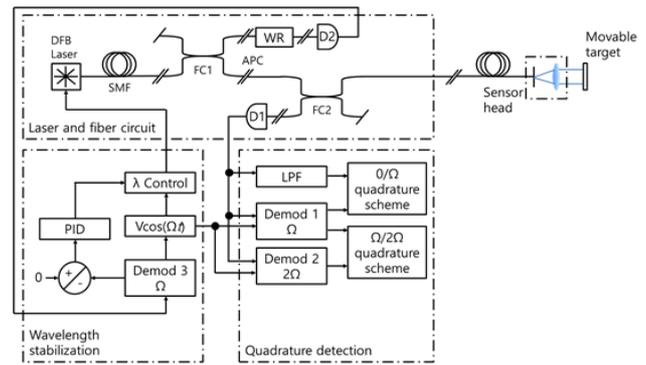


Fig. 1. Structure of laser interferometer.

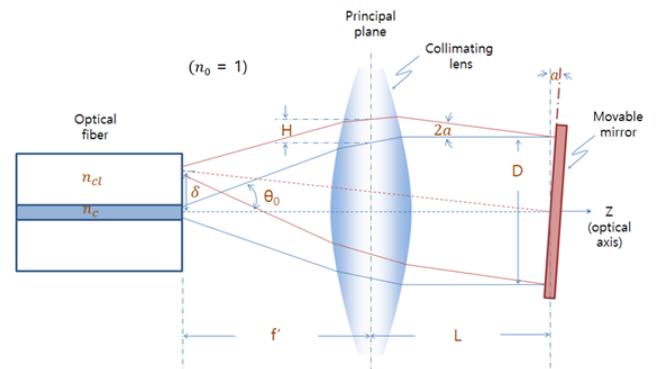


Fig. 2. Collimating lens of displacement measurement system at Fig. 1.

(1)에서 식 (4)에 나타내었다. 이 현상을 수차적인 관점에서 본다면, 식 (3)에 의해서 코마수차가 발생하고 광섬유 단면에서는 식 (4)의 횡위치변위 뿐만 아니라 코마수차에 의한 결상 빔의 직경 변화도 동반하게 된다. 즉, 이로 인해 광섬유로 커플링되는 간섭신호의 효율은 반사경의 위치 L 값이 커짐에 따라 δ 값에 의해서 횡위치변위뿐만 아니라 코마수차에 의해서도 급격히 감소하게 된다^{9,10}.

$$\theta_0 = NA_{fiber} = n_0 \sin \theta_0 = \sqrt{n_c^2 - n_d^2} \quad (1)$$

$$D = f' \tan(\theta)_0 = f' \tan(\sin^{-1} \sqrt{n_c^2 - n_d^2}) \quad (2)$$

$$H = L \tan(2\alpha) \quad (3)$$

$$\delta = (2\alpha)f' \quad (4)$$

이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 기존의 콜리메이팅 렌즈 방식과는 다른 새로운 형태의 광학구조가 도입되어야 한다. 본 논문에서는 송수신 광학부로서 콜리메이팅 렌즈만을 사용하는 기존방식보다 훨씬 더 복잡한 형태의 광학구조를 도입함으로써 이 문제의 해결을 시도하고자 한다. 그림 3에 본 논문에서 새로운 광학구조로서 시도되는 전체광학시스템 중 첫 번째 파트인 GRIN 렌즈와 그의 광선궤적이 나타나 있다.

그림 3의 GRIN 렌즈는 렌즈 중심으로부터 외각으로 갈수록 단면의 동심원을 기준으로 대칭적으로 굴절률이 변화하여 광의 궤적을 조절한다. 본 논문에서 사용한 GRIN 렌즈의 굴절률 변화에 대한 표현은 식 (5)로 주어진다¹¹.

$$N(r) = N_0(1 - \frac{A}{2}r^2) \quad (5)$$

여기서, N_0 는 렌즈 중심의 굴절률 값이고, A 는 굴절률 변화에 대한 GRIN 렌즈의 매개상수 값이다. 렌즈의 중심에서 반경 방향으로 갈수록 r^2 에 비례하여 굴절률이 변화함을 알 수 있다.

본 논문에서 전체광학시스템의 첫 번째 파트로서 GRIN 렌즈를 도입한 이유는 그림 1에서처럼 위치변위 레이저간섭계의 센싱부에 광섬유가 사용되기 때문에 GRIN 렌즈를 접목

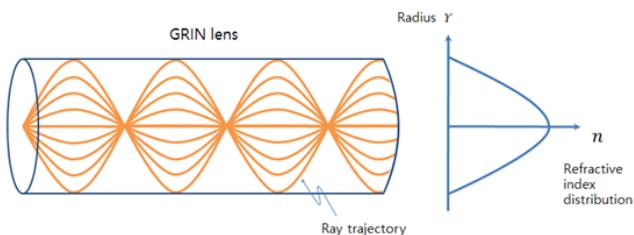


Fig. 3. Description of GRIN lens.

시키면 쉽게 동축을 맞출 수 있는 이점이 있기 때문이다. 그림 4에서는 GRIN 렌즈와 광섬유의 코어 간에 10배의 확대 배율을 가질 수 있는 광선관계를 보여주고 있다. 그림 5에서는 광섬유와 GRIN 렌즈 또 이와 결합된 콜리메이팅 렌즈 및 웨이퍼에 장착된 미러 간의 광선관계를 ZEMAX를 활용하여 나타내고 있다. 그림 5의 이동 반사경에 의해서 반사되어 되 돌아오는 광은 GRIN 렌즈에 의해서 10배의 축소배율로 결상되기 때문에 쉽게 광섬유 코어로 결합될 수 있다.

그림 6은 전체광학계 중 세 번째 파트인 무초점 광학계를 보여주고 있다. 여기서 도입되는 무초점 광학계는 망원경 타입이고 잘 알려진 바와 같이 망원경은 대물렌즈(f_1)와 대안렌즈(f_2) 간의 초점비로서 확대배율이 결정되고 확대배율은 각배율로 정의된다. 결과적으로, 10배의 확대배율을 갖는 무초점 광학계를 도입하여 GRIN 렌즈-콜리메이팅 렌즈-무초점 광학계로 구성되는 전체 광학구조를 완성하면 그림 7

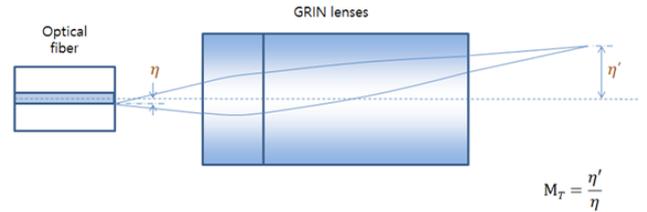


Fig. 4. 10x GRIN lenses.



Fig. 5. GRIN lens system with collimating lens attached to displacement measurement system.

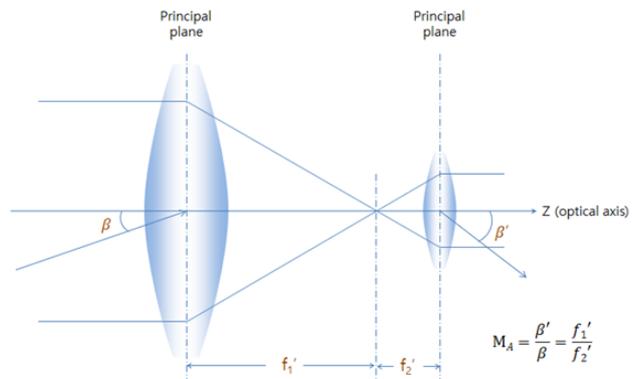


Fig. 6. The layout of afocal lens system.



Fig. 7. The whole structure of receiver-transmitter optical system composed of GRIN lens-Collimating lens-Afocal system.

과 같은 광선관계로 나타내어 진다. 그림 7에서 보듯이, 이동 반사경에 의해 반사되어 오는 빔은 GRIN 렌즈에 의해서 10배로 축소되고 무초점 광학계에 의해서도 역시 10배로 축소되기 때문에 최종적으로는 100배 축소되는 효과를 가진다 ($M_{TOTAL} = M_T \times M_A = 10 \times 10 = 100$). 그러면, 그림 2와 같은 상황에서 발생하는 이동 반사경의 틸팅 효과는 결국 100배 축소되는 효과가 나타나게 되고 결과적으로 광섬유 단면에서의 광 수신 결합효율을 획기적으로 증대시킬 수 있다. 광 수신의 결합효율이 증대되면 위치변위에 대한 수신범위도 더불어 같은 비율로 증가하게 되기 때문에 위치변위 레이저 간섭계에서 웨이퍼의 허용위치범위도 길어지게 된다.

III. 위치변위 레이저 간섭계의 광 수신효율 증폭을 위한 송수신 광학계의 분석

앞의 II 장에서 광 수신효율 증폭을 위해 위치변위 레이저 간섭계에 적용되는 새로운 형태의 송수신 광학계에 대해 논의를 진행하였다. 그리고 제안된 송수신 광학계는 광섬유와 GRIN 렌즈가 동축으로 서로 연결되어 있기 때문에 반사된 광 신호를 광섬유로 도파시키기 위해서는 광섬유가 수용할 수 있는 최대 NA보다 작은 각도로 광신호가 입사하여야 한다. 본 장의 설계와 시뮬레이션을 위해서 ZEMAX 설계프로그램을 사용하였고 더불어 ZEMAX의 매크로 프로그래밍 기능도 활용하였다¹²⁾.

비교를 위해, 먼저, 그림 2와 같이 콜리메이팅 렌즈만 사용하는 기존방식에 대한 결합효율(CE)을 그림 8에 나타낸다. 그림 8에서 보듯이 이동 반사경의 틸팅 각이 거의 제로에 가까울 때에만 결합효율 값이 존재하고 나머지 틸팅 각에서는 결합효율이 바로 제로가 되어버린다. 이것은 기존방식은 이동 반사경의 틸팅에 매우 민감하여 거의 틸팅이 발생하지 않아야만 신호가 수신되어짐을 알 수 있다.

그림 9는 광섬유와 콜리메이팅 렌즈 사이에 GRIN 렌즈 세트 추가한 그림 5의 광학구조로부터 얻은 결과이다. 광섬유로 결합이 되는 틸팅 각의 범위는 그림 8과 달리 거의 제로가 아니고 약 0.025도로서 그림 8과 비교하면 허용 가능한 틸팅 각의 범위가 약 10배도 정도 증가한 것으로 나타난다. 그림 10은 그림 9에서 얻은 결과보다 수신각도가 10 배 더 증가하였는데, 이는 그림 7의 GRIN 렌즈-콜리메이팅 렌즈-무초점 광학계로 구성되는 광학구조에 대한 결과이다. 즉, 그림 8의 콜리메이팅 렌즈로만 구성되는 기존의 송수신 광학계보다 결합효율(CE)이 약 100 배 정도 향상되었다는 것이다. 그러면 이를 틸팅 각은 고정되어 있고 위치변위가 바뀌는 경우로도 다르게 표현할 수 있는데, 틸팅 각이 고정되는 경우 허용 가능한 수신범위는 기존방식인 그림 8보다 약 100배 정도로 늘어난다고 할 수 있다. 왜냐하면 틸팅 각과 위치변위는 식 (3)에서처럼 탄젠트의 관계이기 때문이다.

그림 11부터 26은 GRIN 렌즈-콜리메이팅 렌즈-무초점 광학계로 구성되는 그림 7의 시스템에 대해 제작을 고려하여 공차계산을 미리해본 것이다. 먼저, 그림 11부터 그림 15에

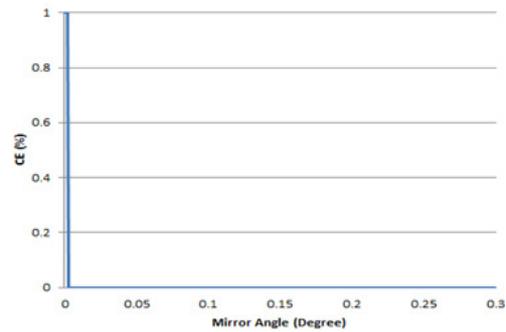


Fig. 8. Maximum measurement angle of movable mirror from Fig. 2, where CE means coupling efficiency.

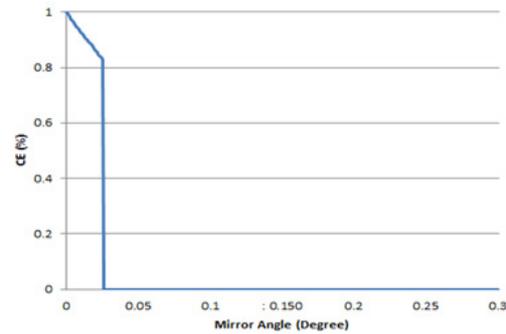


Fig. 9. Maximum measurement angle of movable mirror from Fig. 5, where CE means coupling efficiency.

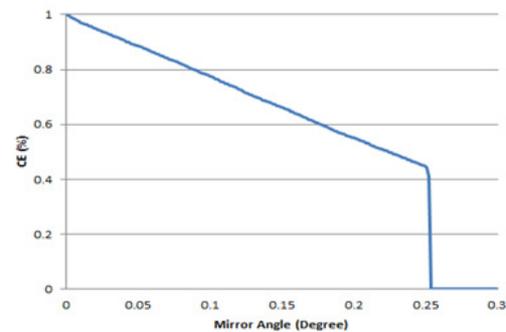


Fig. 10. Maximum measurement angle of movable mirror from Fig. 7, where CE means coupling efficiency.

서는 GRIN 렌즈의 공차에 따른 결합효율과 허용 가능한 수신각도를 보여주고 있다. 그림 11은 GRIN 렌즈와 콜리메이팅 렌즈 사이의 거리가 ±로 변화함에 따라 커플링 효율<a>과 허용 가능한 수신각도의 변화량을 보여준다. 거리가 가까워지면 결합효율이 낮아지므로 공차(Tolerance)의 방향은 +쪽이 유리하다. 그림 12는 GRIN 렌즈 세트의 첫 번째 렌즈의 중심 굴절률이 변화할 때 결합효율<a>과 허용 가능한 수신각도가 얼마나 변화하는지를 보여준다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 굴절률에 관한 공차는 커플링 효율의 손실이 없는 -쪽이 유리하게 나타난다. 그림 13은 GRIN 렌즈 세트의 첫 번째 렌즈의 두께가 ±로 변화할 때 결합효율<a>과 허용 가능한 수신각도가 얼마나 변화하는지를 보여준다.

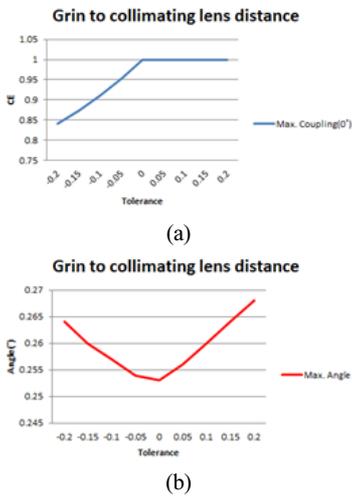


Fig. 11. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of distance between GRIN lenses and collimating lens.

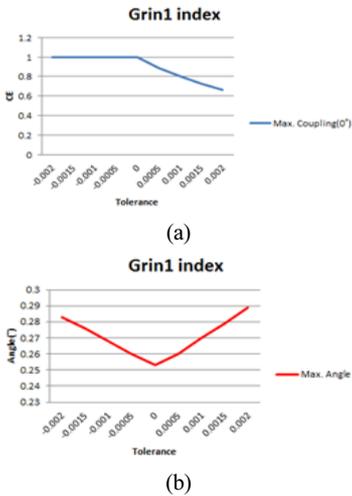


Fig. 12. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of index of 1st GRIN lens.

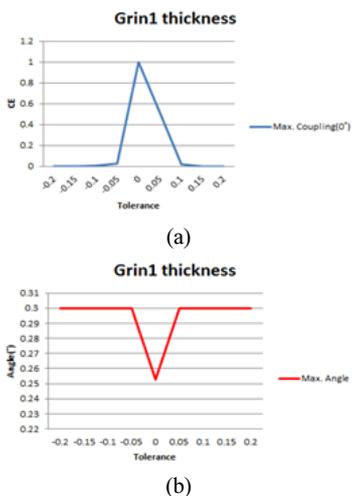


Fig. 13. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of thickness of 1st GRIN lens.

GRIN 렌즈의 두께 변화에 따라 결합효율특성이 매우 민감하게 나타나므로 실제 제작 시 GRIN 렌즈의 두께가 매우 중요함을 알 수 있다. 마찬가지로 그림 14와 그림 15는 GRIN 렌즈 세트의 두 번째 렌즈의 중심 굴절률과 두께가 변화할 때 결합효율<a>과 허용 가능한 수신각도가 얼마나 변화하는지를 보여준다. 그림들로부터 알 수 있듯이, 두 번째 렌즈의 굴절률도 작아지는 것이 커지는 것보다는 유리하고, 두께도 두꺼워지는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다. 이어서, 무초점 광학계의 변화에 따른 결합효율과 허용 가능한 수신각도의 변화를 보고자 한다.

그림 16부터 그림 20은 무초점 광학계의 두 개의 렌즈 중 첫 번째 렌즈의 각 항목들이 변화함에 따라서 결합효율<a>과 허용 가능한 수신각도가 어떻게 변화하는지 보여준다. 그림 16은 첫 번째 렌즈의 굴절률(refractive index)의 변화, 그림 17은 분산(dispersion), 그림 18은 곡률 반경(radius of curvature), 그림 19는 코닉 상수(conic constant), 그림 20은 렌즈 두께(thickness)의 변화에 따른 공차추이를 보여주고 있다.

그림 21부터 그림 25는 무초점 광학계의 두 개의 렌즈 중 두 번째 렌즈의 각 공차항목들이 변화함에 따라서 결합효율<a>과 허용 가능한 수신각도가 어떻게 변화하는지 보여준다. 그림 21은 두 번째 렌즈의 굴절률(refractive index)의 변화, 그림 22는 분산(dispersion), 그림 23은 곡률 반경(radius of curvature), 그림 24는 코닉 상수(conic constant), 그림 25는 렌즈 두께(thickness)의 변화에 따른 공차추이를 보여주고 있다. 그리고 그림 26은 두 렌즈 사이의 거리가 ±로 변화함에 따라 결합효율<a>과 허용 가능한 수신각도가 얼마나 변화하는지를 보여준다. 결론적으로 각 설계변수들의 공차추이에 따른 결합효율<a>과 허용 가능한 수신각도의 성능 변화를 살펴보았는데, 이는 실제 송수신 광학계의 제작에 있어서 매우 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

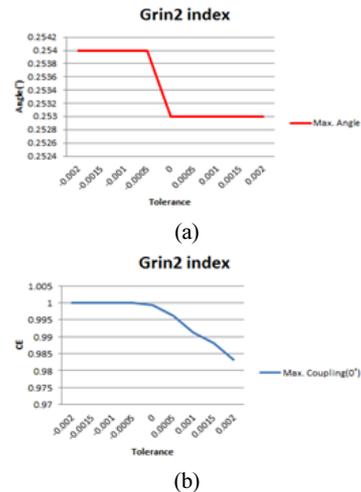


Fig. 14. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of index of 2nd GRIN lens.

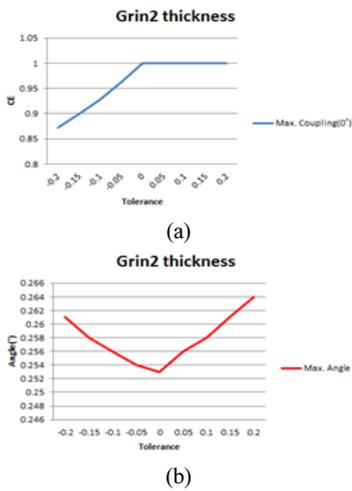


Fig. 15. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of thickness of 2nd GRIN lens.

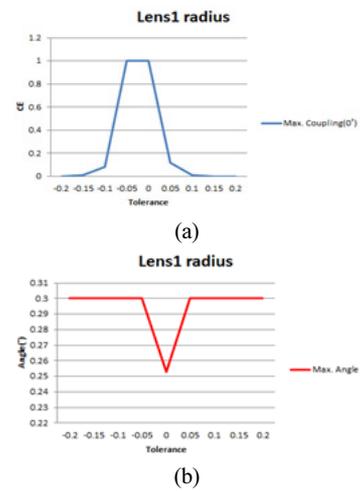


Fig. 18. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of radius of 1st afocal lens.

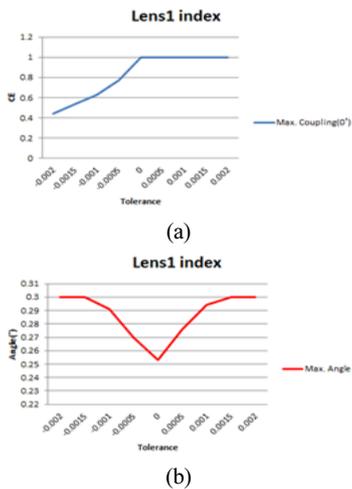


Fig. 16. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of index of 1st afocal lens.

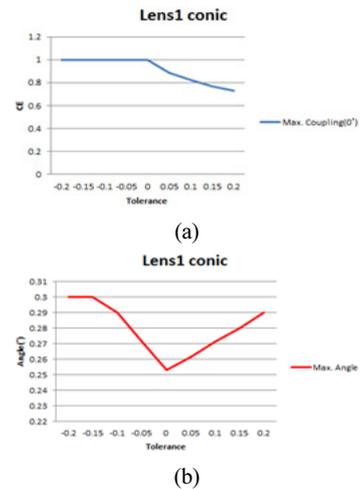


Fig. 19. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of conic constant of 1st afocal lens.

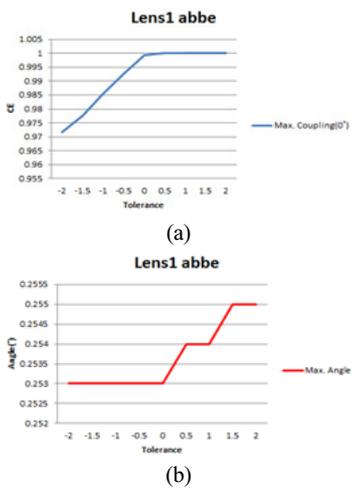


Fig. 17. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of Abbe value of 1st afocal lens.

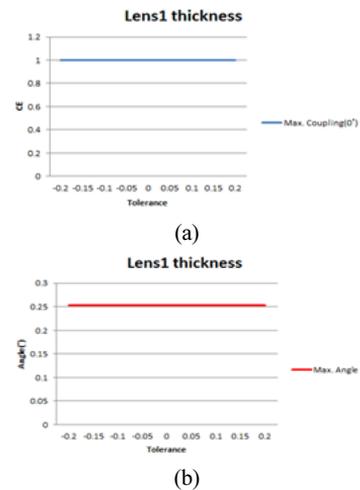


Fig. 20. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of thickness of 1st afocal lens.

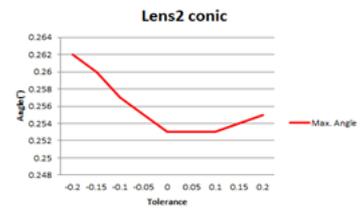


(a)

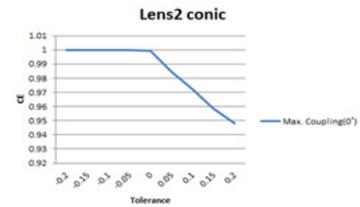


(b)

Fig. 21. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of index of 2nd afocal lens.



(a)

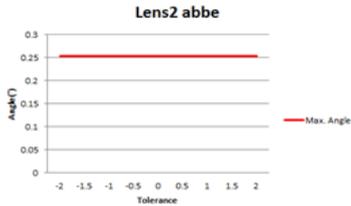


(b)

Fig. 24. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of conic constant of 2nd afocal lens.

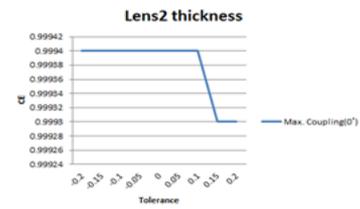


(a)

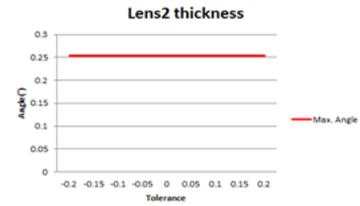


(b)

Fig. 22. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of Abbe value of 2nd afocal lens.

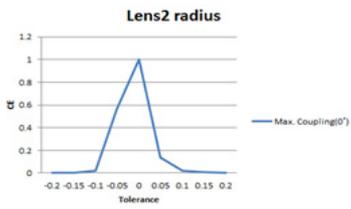


(a)

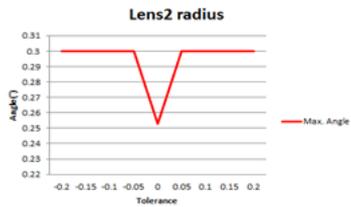


(b)

Fig. 25. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of thickness of 2nd afocal lens.

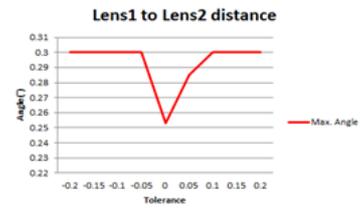


(a)

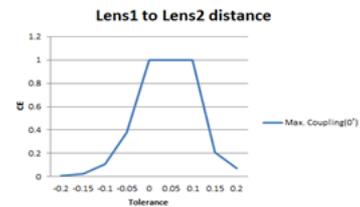


(b)

Fig. 23. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of radius of 2nd afocal lens.



(a)



(b)

Fig. 26. CE (Coupling Efficiency) vs. maximum angle due to the variation of distance between 1st and 2nd afocal lens.

IV. 결 론

본 논문에서는 위치변위 레이저 간섭계의 송수신 광학부로서 간섭신호를 획득하는데 사용되는 기존의 콜리메이팅 렌즈 방식 대신에 GRIN 렌즈-콜리메이팅 렌즈-무초점 광학계로 구성되는 좀 더 복잡한 형태의 새로운 광학구조를 제안하였다. 광학구조의 설계와 분석을 위해서 ZEMAX 프로그램을 활용하였고, 이를 통해 이동 반사경의 틸팅 각에 따른 광섬유의 결합효율을 효과적으로 계산할 수 있었다. 송수신 광학계로서 콜리메이팅 렌즈만을 사용하는 기존의 방식은 이동 반사경의 틸팅에 의해 수신효율이 매우 급격히 감소하기 때문에 아주 작은 틸팅 각만 감지할 수 있음을 알 수 있었고, 제안한 광학구조는 이 보다 약 100배 정도 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 본 광학구조는 저자들에 의해 특허로도 출원되었다.

감사의 글

본 논문은 2016년도 한남대학교 교비학술연구비로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

1. K. Thurner, F. P. Quacquarelli, P.-F. Braun, C. D. Savio, and K. Karrai, "Fiber-based distance sensing interferometry," *Applied Optics* **54**, 3051-3063 (2015).
2. A. J. Fleming, "A review of nanometer resolution position sensors: operation and performance," *Sens. Actuators A* **190**,

- 106-126 (2013).
3. J. R. Lawall, "Fabry-perot metrology for displacements up to 50 mm," *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 2786-2798 (2005).
4. D. T. Smith, J. R. Pratt, and L. P. Howard, "A fiber-optic interferometer with subpicometer resolution for dc and low frequency displacement measurement," *Rev. Sci. Instrum.* **80**, 035105 (2009).
5. K. Karrai and P.-F. Braun, "Device and method for acquiring position with a confocal Fabry-Perot interferometer," U.S. Patent Application No. US 2011211199 A1 (1 September, 2011).
6. K. Thurner, P.-F. Braun, and K. Karrai, "Fabry-perot interferometry for long range displacement sensing," *Rev. Sci. Instrum.* **84**, 095005 (2013).
7. D. Rugar, H. J. Mamin, and P. Guethner, "Improved fiber-optic interferometer for atomic force microscopy," *Appl. Phys. Lett.* **55**, 2588-2590 (1989).
8. Y.-C. Wang, L.-H. Shyu, and C.-P. Chang, "The comparison of environmental effects on Michelson and Fabry-Perot interferometers utilized for the displacement measurement," *Sensors* **10**, 2577-2586 (2010).
9. C.-S. Rim, "Optical structural design using gaussian optics for multiscale gigapixel camera," *Korean Journal of Optics and Photonics* **24**, 311-317 (2013).
10. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Pergamon Press, Oxford, UK, 1999), Chapter 3.
11. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering* (McGraw-Hill Inc., NY, USA, 2001), Chapter 5.
12. Zemax optical design software, Version Zemax 12 R2 SE, Radiant Zemax, LLC.