

위상천이간섭계를 위한 다채널 주파수 스캐닝 레이저 The Multi-channel Frequency Scanning Laser for Phase Shift Interferometry

*장로마¹, #김재완², 김종안², 강주식², 엄태봉², 김재은¹, 박해용¹
*R. Jang¹, #J. W. Kim (jaewan@kriss.re.kr)², J.-A. Kim², C.-S. Kang², T. Eom², J.-E. Kim¹, H. Y. Park¹
¹ 한국과학기술원 물리학과, ² 한국표준과학연구원 길이시간 센터

Key words : Scanning laser, phase shift interferometry

1. 서론

평판 디스플레이 시장에서 고해상도, 대면적화가 진행되면서 넓은 면적에 분포한 미세 구조물의 형상 측정에 대한 관심이 높아지고 있다. 넓게 분포한 미세 구조물의 형상을 측정하기 위해서는 일반적인 미세 구조 형상 측정에서 필요한 나노미터 이하의 정밀도뿐만 아니라 측정 속도가 고려해야 하는 중요한 요소이다. 특히, 생산과정에서 직접 미세 구조물의 형상을 측정하기 위해서는 비접촉 측정이 가능한 빠른 측정 장비가 절실히 필요하다.

표면의 미세 구조물 형상을 비접촉식으로 측정하는 장비에는 백색광주사간섭법(White-light Scanning Interferometry, WSI)¹이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 현재 반도체나 TFT-LCD의 패널 생산 공정의 검사장비 등에 사용되고 있다. WSI 방법은 측정 영역이 넓다는 장점이 있지만 기계적인 스캐닝을 필요로 하기 때문에 정밀도와 측정 속도를 함께 향상시키는 데는 한계가 있다.

우리는 차세대 디스플레이 공정에 적용할 수 있는 고속 측정을 구현하기 위해 위상천이간섭법(Phase Shift Interferometry, PSI)²을 기반으로 형상을 측정하는 광간섭기술을 개발하고 있다. 고속 측정을 구현하기 위해서는 속도 제한의 원인인 기계적인 구동부를 없애고 레이저 주파수를 변조하는 방식으로 대체할 필요가 있다. 개발하려는 광간섭기술의 목표를 달성하기 위해서는 주파수 간격이 일정한 4 개 이상의 정확한 주파수 채널(상대 안정도 10⁻⁸ 이내)을 제공하며 전체 주파수 채널을 50 Hz 이상의 속도로 스캔할 수 있는 레이저가 광원으로 필요하다. 본 고에서는 이런 특성을 갖는 다채널 주파수 스캐닝 레이저의 원리를 설명하고 실험 결과를 보여주고자 한다.

2. 다채널 주파수 스캐닝 레이저

위상천이간섭계의 광원으로 사용하기 위해 다채널 주파수 스캐닝 레이저를 개발하였다. 다채널 주파수 스캐닝 레이저란 안정화된 특정한 주파수 각각이 채널이 되어, 필요로 하는 주파수 채널을 순차적으로 빠르고 안정적으로 구현할 수 있는 레이저이다. 이를 구현하기 위해서는 각 채널에서 안정화된 주파수 발진이 가능해야 하고, 한 채널에서 다른 채널로 빠르게 주파수를 이송할 수 있어야 한다. 이는 위상천이 간섭계의 광원으로 활용될 수 있다. 패브리 페로 공진기(Fabry-Perot Cavity, FPC)는 자유 스펙트럼 영역(Free Spectral Range, FSR)만큼 일정한 간격의 주파수 기준을 제공한다. 그러므로 FPC의 공진모드에 순차적으로 레이저 주파수를 안정시키는 방법을 이용한 위상천이 간섭계를 구현한 연구도 Bitou 등이 보고하였다.³ Bitou의 방법은 전기적인 되먹임 방법으로 하나의 공진모드에 주파수를 안정화하고 영상을 얻은 후 안정을 깨어 다음 공진모드에 주파수를 안정화하는 과정을 거쳐야 하므로 구현이 어려울 뿐만 아니라 고속측정에는 적합하지 않다. 우리는 각 채널에서 주파수를 안정화하기 위해 Fig. 1 과 같이 공초점 패브리 페로 공진기(Confocal Fabry-Perot Cavity, CFPC)의 공진모드에서 레이저로 되반사된 빛이 레이저의 주파수를 잠그는 현상(Injection locking)⁴을 이용하였다. 주파수의 이송은 전기적인 방식으로 빠르게 주파수 변조가 가능하고 가격경쟁력 또한

높은 LD를 광원으로 채택하여 고속측정이 가능한 주파수 다채널 스캐닝 레이저를 구현하였다. 이렇게 구현된 레이저는 각 채널에서 서터를 열어 위상천이 간섭계의 광원으로 사용할 수 있다. 실험에 사용한 레이저 다이오드(Hitachi HL6344G)의 발진 파장은 635 nm이고 출력은 10 mW이다. 전류 조절 장치에는 전류를 일정한 변화율로 빠르게 변조할 수 있는 장치를 연결하여 주파수를 고속으로 스캔할 수 있다. LD에서 나온 빛은 타원형이므로 공간 여과기를 통과시켜 빔의 모양이 원형 형태의 가우시안 빔이 되게 하여 횡모드가 발진하지 않도록 하면서 FPC에 모드 매칭(mode matching)이 되도록 하였다. FPC는 FSR가 5 GHz이고 예리도(Finesse)가 70 이며 온도 변화와 같은 환경변화에 대해서도 장기적으로 10⁻⁸이상의 주파수 기준을 제공할 수 있어야 하므로 열팽창계수가 아주 낮은 유리(Ultra-low-expansion glass, ULE®) 제작하였다. 열팽창계수를 고려하면 FPC의 온도를 0.1 °C 이내로 안정화하면 10⁻⁸ 이내로 공진 주파수가 안정된다. 이는 기하학적으로 안정된 구조에서 온도를 0.1 °C 이내로 유지시켜 주면서 같은 전류를 흘려준다면 장치를 꾸민 이후에 반복도 있게 주파수가 10⁻⁸ 이내의 불확도를 가지는 주파수의 공진모드를 보장할 수 있다. FPC에 공진된 모드만 레이저로 되먹임 되도록 만들기 위해 FPC의 입사면에서 반사된 빛은 레이저로 돌아가지 않도록 Fig. 1 과 같은 경로의 고차모드로 정렬하였다. 이 같은 방법으로 고안된 다채널 주파수 스캐닝 레이저는 Fig. 2 에 나타난 개략도와 같이 LD의 전류를 변조하여 주파수는 스캔할 때, FPC에 의한 인젝션 록킹으로 FPC의 공진주파수 근처의 일정구간에서는 전류를 변조 하더라도 주파수가 거의 변하지 않는 채널이 형성된다. 한 채널에서 다음 채널까지는 LD의 전류를 스캔하여 위상이동을 할 수 있다.

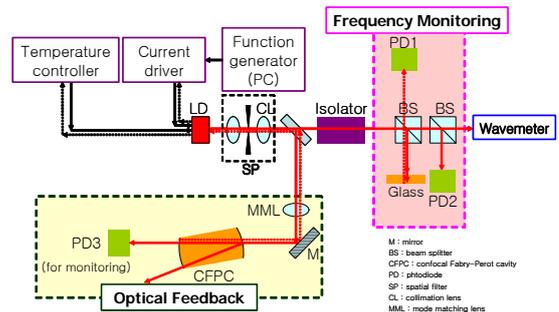


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

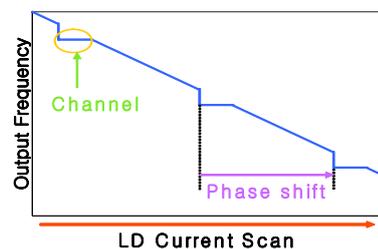


Fig. 2 Schematic diagram of the multi-channel frequency scanning laser

3. 성능 평가

고속 스캔을 하면서 발진된 주파수의 변화를 확인하기 위해 광학단절기(optical isolator) 다음에 코팅을 하지 않은 평면 유리를 놓고 유리의 양면에서 반사된 빛의 간섭신호를 FPC 통과 신호와 함께 관찰하였다. 유리판의 간섭신호로 LD의 주파수 변화를 정성적으로 모니터링 할 수 있다. 모드 호핑(mode hopping)이 없는 구간에서 전류를 한 방향으로 스캔해 주면 인젝션 록킹이 되지 않았을 때는 주파수가 거의 선형적으로 변화하기 때문에 유리판의 간섭신호는 사인파 형태로 나타난다. 하지만 인젝션 록킹이 된 구간에서는 주파수가 거의 변하지 않기 때문에 통과 신호가 거의 일정하게 유지된다. 유리판의 FSR가 20 GHz가 되도록 하여 반주기에 해당하는 10 GHz 안에 CFPC의 4개의 채널이 들어올 수 있도록 두께가 5 mm인 유리를 사용하였다. 기준 공진기인 공초점 FPC에 TEM01 모드로 정렬하였기 때문에 FSR의 1/2의 간격으로 채널이 생성된다. 위상 천이 간섭계의 광원으로 사용하기 위한 광원이므로 서로 다른 위상을 갖는 4개 채널이 생성되도록 LD의 주파수 10 GHz 범위로 스캔하였다. 주파수의 변화를 확인하기 위해 FPC 공진기 통과 신호와 유리판의 간섭신호를 동시에 측정할 결과가 Fig. 3과 같다. FSR/2인 2.5 GHz 간격으로 채널이 형성되고 형성된 채널에선 주파수 잠금에 의해 주파수 변화가 거의 없는 것이 확인된다. 이와 같이 10 GHz를 100 Hz 속도로 스캔 하면서 Fig. 3과 같은 곡선을 확인했다. 정량적인 측정을 위해 파장측정기(Angstrom WS Ultimate 30, HighFinesse 사)로 출력 주파수를 확인해 보았다. 파장측정기의 측정 속도의 한계로 인해 10.7 GHz의 주파수 변조 범위를 10 mHz 속도로 스캔하면서 주파수를 확인하였다. 그 결과는 Fig. 4와 같다. LD의 출력주파수는 전류를 스캔함에 따라 한 방향으로 변화되다가 공진기의 공진모드 근처에서는 인젝션 록킹에 의해 전류가 변해도 주파수가 거의 변하지 않음을 확인할 수 있었다. 인젝션 록킹이 되지 않았을 때 LD의 스캔 전류에 따른 주파수 변화율은 -10.7 GHz/mA 이고, 인젝션 록킹이 되면 각 채널의 주파수 변화율은 -3.3 GHz/mA으로 그 크기가 1/3 이하로 줄어든다.

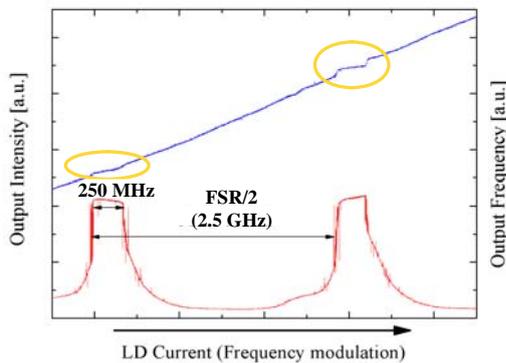


Fig. 3 The signal of FPC transmission and interferometer of two reflection waves on both surfaces of glass plate

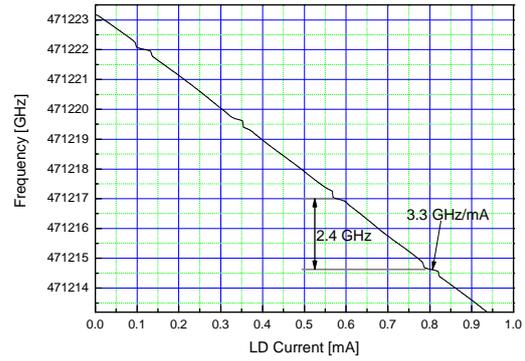


Fig. 4 LD output frequency according to scanning the LD current

4. 결론

표면의 미세 구조물 형상을 측정하기 위한 PSI의 광원을 개발하였다. FPC를 이용한 인젝션 록킹으로 일정한 간격의 주파수 채널을 얻을 수 있고 LD의 전류를 스캔하여 빠르게 채널 간 이송이 가능한 다채널 주파수 스캐닝 레이저를 고안하였다. 앞으로 CFPC의 예리도를 높게 제작하는 등, 각 채널에서의 주파수 변화율의 크기를 감소시키는 방향으로 연구를 진행하려 한다. 이와 같은 다채널 주파수 스캐닝 레이저는 고속 나노 형상 측정을 가능하게 하여 대면적 표면 형상 측정에 활용될 수 있다.

후기

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 과학재단이 지원하는 나노원천기술개발사업 중 하나로 수행되었음 (2007-02721).

참고문헌

1. Akiko Harasaki, Joanna Schimit, and James C. Wyant, "Improved vertical-scanning interferometry", Appl. Opt. 39, 2107-2115, 2000.
2. Yeou-Yen Cheng and James C. Wyant, "Multiple-wavelength phase-shifting interferometry", Appl. Opt. 24, 804-807, 1985.
3. Y. Bitou, H. Inaba, L. Hong F-, T. Takatsuji and A. Onae, "Phase-shifting interferometry with equal phase steps by use of a frequency-tunable diode laser and a Fabry-Perot cavity", Appl. Opt. 44, 5403-5407, 2005.
4. B. Dahamani, L. Hollberg, and R. Drullinger, "Frequency stabilization of semiconductor lasers by resonant optical feedback", Opt. Lett. 12, 876-878, 1987.