광 간섭 계측

일반적으로 광 간섭 계측은 비접촉, 고감도, 면계측, 내전자(耐電磁) 노이즈 등 다른 계측 방법에는 보이지 않는 우수한 장점을 가지고 있는 반면, 공기 흔들림이나 외부 진동 등의 외란에 약하여 광학 조정이 번거로우며 측정 범위가 좁다는 문제점도 있어, 아직까지는 산업적으로 충분히 보급되고 있지 않은 것이 현실이다. 여기서는 옵토 메카트로닉스 기술로서의 광 간섭 계측 기술이 상기 문제점을 극복하면서, 앞으로 어떻게 발전해 나갈 것인지를 예측하여 기술 로드맵의 작성을 시도하였다. 기술 로드맵은 반도체 산업에서는 본격적인 것으로 정평이 나있지만, 광 간섭 계측 기술에 대한 것은 거의 없다. 따라서, 여기서 채택한 기술과 그 미래에 대해서는 필자의 경험과 주관이 상당히 많이 개입되어 있음을 미리 말해 둔다.

편집자 주

본 고에서는 옵토 메카트로닉스 기술로서 중요하다고 여겨지는 간섭 계측 기술 로드맵을 계측 대상 종류별로 Ⅰ평면 계측, Ⅱ비구면 계측, Ⅲ자외 광학 부품 계측, Ⅳ동적 계측 4종류를 작성하기로 하였다.

1. 평면 계측

평면 계측, 즉 평면 거울의 표면 형상 계측은 종래로부터 간섭 계측에서 가장 기본적으로 중요하며, 그 중요도는 앞으로도 변함이 없을 것이다. 대상으로는 각종 평면 반사경(광 경로 변경, 빔 스플리터, 레이저 공진기 미러 등), 옵티컬 플랫 등의 표준을 들 수 있고, 응용으로는 반도체 산업에서의 실리콘 웨이퍼를 들 수 있다. 웨이퍼에서는 반도체 산업의 로드맵에도 기재되어 있는 바와 같이[1] 앞으로 그 직경이 커지는 경향이 있으며, 그 평면도를 간섭 계측하는 기술은 앞으로도 중요한 부분이 될 것이다. 반도체 로드맵에서는 2013년까지 300mmΦ가 되고, 2016년에 450mm가 되어 앞으로 더욱 커질 것으로 예상된다. 계측 정밀도는 웨이퍼 상으로의 축소 노광의 초점 심도가 ±0.5㎛인 점에 근거하여[2], 0.5㎛p-v보다 높은 정밀도가 필요해질 것이다. 이는 웨이퍼 면적이 커지더라도 바뀌지 않을 것이다. 최적의 정밀도는 어느 정도 큰 (예를 들면 100mmΦ) 평면을 구성하고 있는 분자 또는 원자 한 개 분량이 되는데, 대략 그 정도로 계측되면, 현재로서는 AFM이나 STM 등의 차분 주사 프로브 현미경의 수비 범위가 된다. 현재 일반적인 평면계 측정용 간섭계로서 피조형이 널리 사용되고 있으며, PZT 등의 참조면을 파장의 몇 분의 1을 기계적으로 이동시킴으로써 계측 정밀도를 높이는 무늬 주사 기구가 장착된 고정밀도 간섭 시스템이 세계 각국에서 시판되고 있다[3].

그러나, 피조 간섭계에서는 계측 대상의 면적이 커지면 참조면도 커져야 되고, 그 중량도 반드시 무거워지게 된다. 그러면 PZT에 의한 참조 거울의 주사가 어려워지고, 그렇게 되면 광원의 파장을 주사하는 간섭계가 필요해진다. 이러한 배경에서 최근에는 파장 주사형 피조 간섭계가 시판되고 있으나, 기계적인 파장 주사를 하지 않고 파장 주사 범위를 크게 하는 등의 과제가 남아 있다. 450mmΦ 이상이 되면, 다른 원리를 가진 새로운 간섭계가 출현될 것이다. 측정 면적이 과도하게 커지면 간섭계를 구성하는 광학 부품인 참조면이나 콜리메이트 렌즈가 너무 커져 피조형으로는 대응할 수 없게 된다. 대응책의 하나로 포인트 계측이 있는데, 광 프로브 헤드(광 간섭 프로브도 포함)를 주사하는 3차원 좌표 측정기 등을 생각할 수 있다. 포인트 계측보다도 효율이 좋은 것은 피조 간섭 헤드 주사와 같이 어떤 면적을 재면서 패치 워크와 같이 연결해 가는 방식이다. 그러나 이것은 주사의 직선성 오차, 특히 회전 오차로 인해 감도에 영향을 미치는 문제점이 있다. 따라서, 개인적으로는, 어떤 크기의 면적을 동시에 재면서 패치 워크와 같이 연결해 가면서 회전 오차 등 주사 직선성 오차에 의해 감도에 영향이 미치지 않는, 횡 쉬어 간섭 헤드를 주사시키는 간섭계가 유망하다고 생각한다[4]. 횡 쉬어(sheer) 간섭계는 계측 파면을 서로 떨어뜨려 간섭시키면 파면의 차이만큼(또는 미분) 간섭 무늬로 나타난다. 이 간섭 무늬는 피조 간섭계와 같이 직접 파면의 등고선을 나타내지 않으므로 직감적으로 알기 어려워 무늬 해석이 필요한데, 장치가 매우 간단(예를 들면 평행 평면판 한 장)하고 광학 조정이 거의 불필요하며, 공통 광 경로이기 때문에 외란에 대하여 강한 특징을 모두 갖는다. 또한, 간섭계가 약간 기울어져도 무늬에 변화가 없으므로, 이 간섭계를 차분 주사하여 넓은 면적의 계측에 효과적일 것으로 생각된다.

피조 간섭계와 같은 참조면과 비교함으로써 평면을 계측하는 방식에서는 참조면의 교정이 필요하다. 현재 세 개의 평면을 사용하여 교정하는 방법[5]이나 액면을 이용하는 방법 등이 있으나, 둘 다 결코 사용이 용이하지 않으므로 새로운 교정 방법이 요구된다.

또한 면적이 커지면 그 유지 방법이나 환경에 대한 영향에 문제점이 발생하는데, 유지 방법이나 온도 등에 따라 형상이 바뀌게 된다.

2. 비구면 계측

구면에 대해서는 현재 시판되고 있는 피조 간섭계로 거의 달성가능하다. 계측 대상의 면적이 커져도 오목면 거울이라면 반사 파면이 집광되므로, 작은 면적에서도 계측이 가능하다. 볼록면에 대해서는 어려운데, 이에 대해서는 후술하기로 한다. 현재 또는 앞으로 중요한 계측 대상은 비구면이다. 비구면은 2차 곡면과 다차 곡면으로 크게 나뉜다. 2차 곡면은 문자 그대로 그 형상이 2차 곡면으로 나타나는 것으로 포물면 거울, 타원면 거울, 쌍곡면 거울의 3종류가 있으며, 각각 평행 파면을 구면파로, 발산 구면파를 수렴(convergence) 구면파로, 구면파를 다른 곡률의 구면

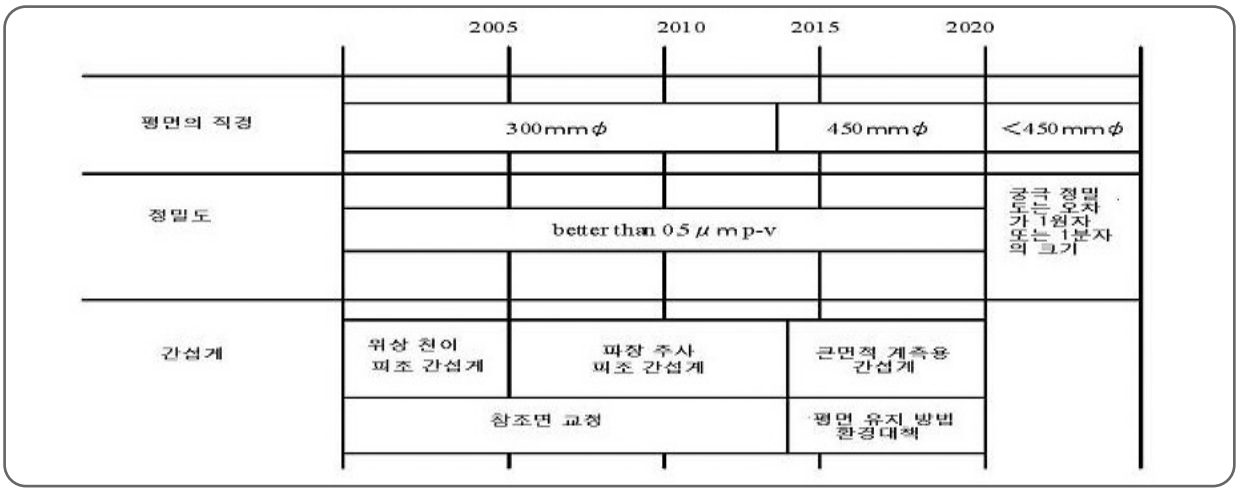

그림 1. 광간섭 계측 기술 로드맵 I (평면 계측)

파로 수차 없이 변환(또는 그 반대의 변환도)시킬 수 있다. 이것을 구면 거울로 행하고자 하면 수차가 발생한다. 이들 2차 곡면에 관해서는 현재도 계측이 가능[6]하며, 예를 들면 보조 광학 소자를 사용하여 피조 간섭계로도 계측할 수 있다. 중요한 것은 3차 이상의 비구면에서 점대칭(슈미트판)인 것이나 비점 대상인 곡면(예를 들면 X선 반사를 위한 트로이달면 등)이 있다. 가장 실용적인 방법은, 오차가 매우 작은 프로토타입을 만들어 일반적인 간섭계(트와이트먼 그린 간섭계 등)로 실제의 검사면과 비교하는 것이다. 또는 프로토타입으로 Null 렌즈, CGH(계산기 생성 홀로그램)를 사용할 수도 있다. 일반적으로는 시간은 걸리지만 간섭 프로브를 사용한 삼차원 좌표 측정기를 사용하면 비접촉으로 다차의 면을 계측할 수 있다. 한편 오목면에 비해 볼록면에 대해서는 그 계측이 상당히 어렵다. 앞에서도 설명한 바와 같이 피조 간섭계로 볼록 구면을 잴 경우, 곡률 반경에도 영향을 받지만, 일반적으로 그 측정 가능한 면적이 매우 좁아진다. 이는 오목면에서 반사된 파면은 크게 발산되기 때문이다. 일반적으로 간섭계는 완만한 형상 계측에 강한데 반해, 가파른 형상에는 약하다. 극단적인 예로, 깊은 구멍 등에서 부분 반사광이 되돌아오지 않는 가파른 형상은 잴 수 없다.

가파른 형상 중 하나가 단차이다. 단차를 일반적인 간섭계로 측정하고자 하면, 불연속인 간섭 무늬가 되어 무늬 차수를 판별할 수 없게 된다. 이는 백색광 등 간섭도가 작은 광을 사용한 간섭계로 계측할 수 있도록 되어 있다. 단차가 있더라도 간섭 무늬를 판별할 수 있기 때문이다.

앞으로의 과제로서 복잡 형상, 자유 곡면, 높은 영상비를 갖는 면 등을 들 수 있다.

3. 자외 광학 부품 계측

반도체 산업 기술 로드맵으로는, 스테퍼가 그리는 선 폭을 조밀하게 함으로써 회로의 집적도를 상승시키기 위하여 광원의 단파장화를 들 수 있다. 구체적으로는, ArF(193nm), KrF(248nm), VUV(157nm), EUV(13.4nm), X선 (〈= 1nm), 전자선, F2(157nm)이다. 계측에서도 단파장화는 간섭계의 눈금에 해당하는 파장이 작아지므로 정밀도가 높아짐을 의미한다. 실제로 시판되고 있는 피조 간섭계에서도 청색 광원을 사용한 것이 신제품으로 시판되었다. 아울러, 스테퍼에 이용되는 광학 부품이나 파면을 실제로 사용하는 파장으로 계측하고자 하는 요구가 크며, at-wavelength 계측 즉, 사용 파장 계측이 요구되고 있다. 가시광선에 가까운 자외광의 경우에는 석영 유리 등의 종래의 재료로 만들어진 광학 부품을 사용할 수 있으나, 보다 짧은 자외광은 흡수 때문에 재료가 CaF2이나 MgF2로 한정되므로 렌즈 등의 광학 부품을 제작하기가 어렵다. 게다가 간섭계용의 고정밀도 광학 부품을 제작

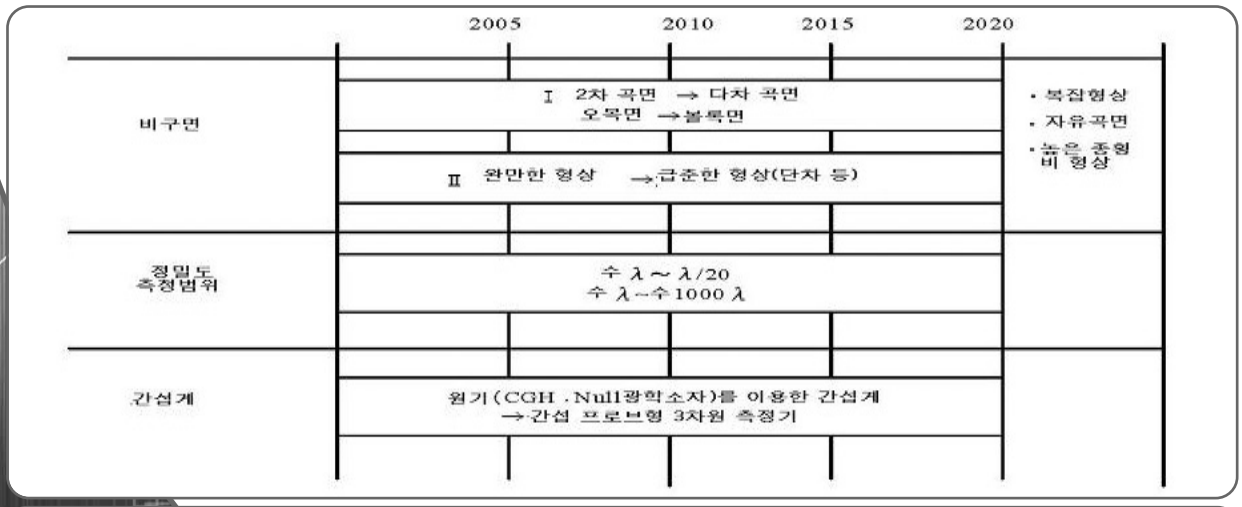

그림 2. 광간섭 계측 기술 로드맵 Ⅱ (비구면 계측)

하기는 더욱 어렵기 때문에, 현재의 at-wavelength 간섭계는 종래의 간섭계 중에서 매우 간단한 구성인 것으로 한정되어 있다. 그 중 하나가 at-wavelength 점 회절 간섭계이다[7]. 자외광을 광 파이버에 통과시키고, 그 단면에서 출사되는 자외광 파면이 구면파인 것을 이용하여 파면이나 면 형상을 계측하는 간단한 것이다. 앞으로는 파장이 1nm보다 작은 단파장 자외광용의 고정밀도 광학 부품이 제작될 것이며, 다양한 단파장 자외광 간섭계가 개발될 것이다.

자외광과 동시에 파장이 1nm 이하인 X선의 리소그래피도 로드맵에 기재되어 있으며, 이를 위한 광학 부품(반사경용 토로이달면이나 집광용 존 플레이트 등)이 개발되고 있어 그 계측도 중요시되고 있다.

4. 동적 계측

지금까지 설명한 측정 대상은 형상 등 정지된 것이었으나, 간섭 계측은 움직이고 있는 대상에도 강하다. 구체적으로는 변위, 변형, 진동 등 생산 라인으로서 흐르고 있는 제품 검사, 생물 등이며, 모두 중요한 계측 대상이다. 변위는 지만 효과(Zeeman Effect)를 이용한 2파장 레이저를 사용한 헤테로다인 간섭에 의해 계측되며, 그 측정 시스템은 이미 시판되고 있다. 변형이나 진동은 종래에는 홀로그래피 간섭이나 스펙클 간섭에 의해 계측되었으나, 종래 가장 많이 사용된 홀로그래피용 사진 건판의 제조가 최근 중지되고, 전자적인 간섭계(TV 홀로그래피 또는 ESPI)가 시판되어 보급되고 있다. 앞으로도 이러한 방향이 주류를 이룰 것이다. 변형의 경우, 종래에는 계측 범위가 좁은 것이 단점이었으나, ESPI를 사용하면 큰 변형도 잴 수 있음을 알 수 있다[8]. 또 진동 계측에서는 정상 진동에서 계측이 더욱 어려운 과도 진동으로 대상을 넓혀야 한다. 광원은 고휘도이며 세로 및 가로 모드의 단일 펄스 레이저 광원이 필요한데, 생산 현장에서 사용하기 위해서는 컴팩트하면서 저렴한 것이 필요하다. 표면 검사의 경우, 넓은 면적에 걸쳐 더 작은 흠집까지 라인 상에서 검사할 수 있을 것이 요구된다. 검사 대상의 면은 조면이지만, 개인적으로는 멀티패스의 광학계에서 감도가 배가된 사입사 간섭계(용어 1) 등이 효과적일 것이다. 장파장(탄산 가스 레이저에 의한 10.6 미크론의 파장)을 사용하면 거친 면도 가시광선에서의 거울면과 같도록 계측할 수 있을 것이다.

라인 흐름 중에서 검사는 인라인으로부터 온라인으로, 나아가 인프로세스로 고도화된다. 초정밀 가공 선반 상에 존 플레이트 간섭계를 탑재하여 인프로세스 계측하는 시도가 이루어지고 있으며, 앞으로 이러한 방식이 개량을 거듭할 것이다.[9] 이 경우, 간섭 계측의 단점인 내환경성이나 조정의 용이함이 중요해지고, 공통 간섭계(용어 2) 등의 연구가 필요해진다.

최근 현저하게 진보된 라이프 사이언스의 연구는 향후 점점 더 활발해질 것으로 예측되며, 이로 인해 생물이나 생체 계측이 진행될 것으로 예상된다. 생물에서는 현재 현미경으로의 간섭 계측이나 낮은 코히런스 간섭을 이용한 광

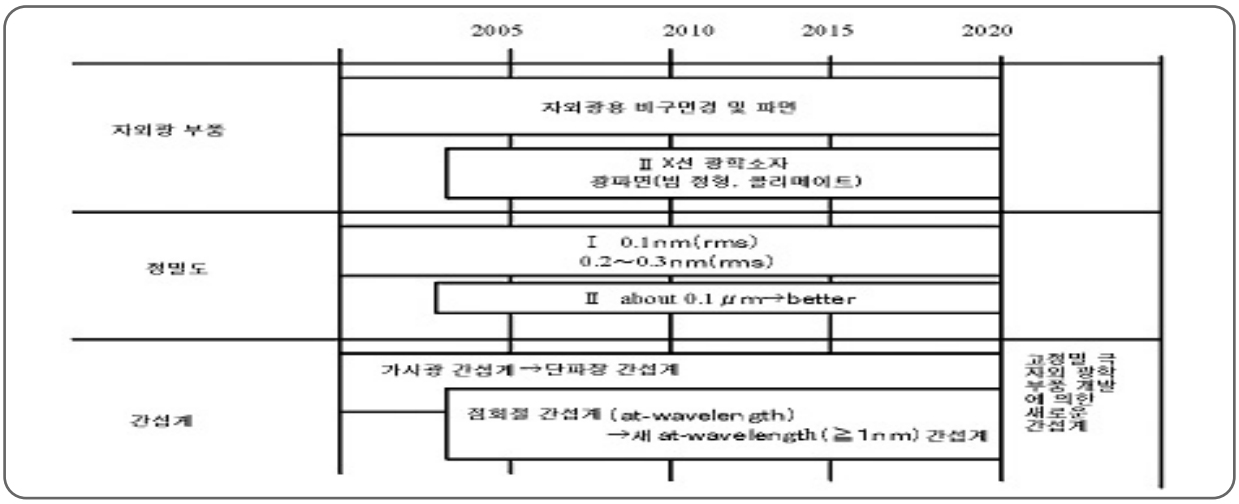

그림 3. 광간섭 계측 기술 로드맵 Ⅲ (자외 광학 부품 계측)

CT 기법이 개발되고 있다. 동적 계측은 2차원 상뿐만 아니라 3차원 상의 시간적 변화에 대응할 수 있는 관측이 발전되어 갈 것이다. 일반적으로 고속 현상을 2차원 또는 3차원적으로 파악하여 경시 변화되는 모습을 관측하는 것은 앞으로 아득히 먼 미래의 기술이 될 것이다.

이상으로 간섭 계측의 미래 기술에 대하여 예측하였다. 간섭 계측은 계측 수단으로서의 잠재 능력이 높으며, 지금부터 새로운 광원이나 광학 기능 소자 등의 관련 기술 발전에 의해 점점 더 고도화되어 산업계의 요구에 부응해 나갈 것이다.

⊙ 용 어

1) 경입사 간섭계 : 계측면에 대하여 경사진 방향으로부터 조명하고 그 반사면을 참조면과 간섭시키면, 작은 광학계에서 넓은 범위를 계측할 수 있다. 이 경우 계측 대상은 거친 면일 수도 있다. 경입사에 의해 간섭계의 감도가 떨어지지만, 멀티패스의 광학계를 병용하면 감도를 높게 유지할 수 있다.

2) 공통 광 경로 간섭계 : 트와이만 간섭계나 마하젠더 간섭계는 서로 간섭하는 계측 파면과 참조 파면이 각각 다른 광 경로가 아닌, 거의 공통의 광 경로를 지나기 때문에, 공기의 흔들림이나 외부 진동에 강한 간섭계이다. 그와 동시에 간섭계 자체도 컴팩트해진다. 현재 시판되는 간섭계로서 가장 많이 보급되어 있는 피조 간섭계도 평면 계측시에는 거의 공통 광 경로가 된다. 공통 광 경로 간섭계의 일종인 산란판 간섭계는 참조면을 계측면(오목면 거울)의 일부로 하고 있으며, 이러한 간섭계는 특히 외부 진동에 강하다.

〈참고 문헌〉

1) (사)일본 반도체 제조 장치 협회 : "반도체 제조 장치 기술 로드맵 2001년도" p46(2002년 4월)

2) 일본 광학 측정기 공업회 "고정밀도 평면의 트레이서빌리티 구축을 위한 1996년도 평면도 부회 보고서" p3(1997년 11월)

3) 상기 p26-p30

4) M. P. Rimmer and J. C. Wyant : Appl. Opt. 14, pp142-149(1975)

5) M. V. R. K. Marty : Optical Shop Testing, edited by D. Malacara, John Wiley and Sons p41(1978)

6) 텐진바야시 고지 : 정밀 공학회지 56 p2316-p2320(1990)

7) 오타키 가쓰라 : 광학 31 p538-544

8) 텐진바야시 고지 : 기계 기술 연구소 소간행물 47 p47-p53(1993)

9) T. Nomura et. al. : Precision Engineering 16 p290-295(1994)

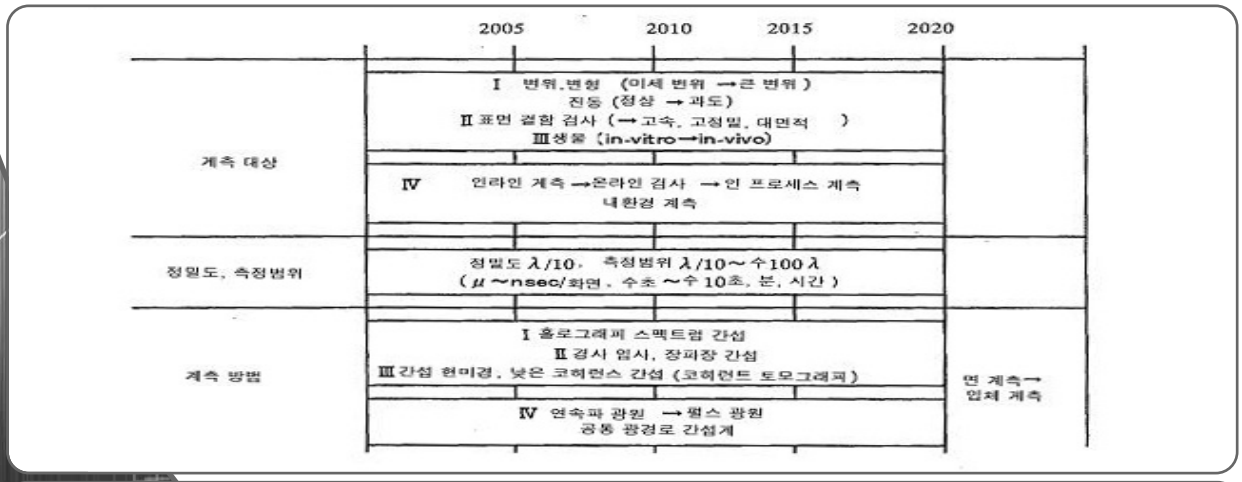

그림 4. 광간섭 계측 기술 로드맵 Ⅳ (동적 계측)