

타원편광분석 기술의 끝없는 변모

타원편광분석 기술은 '100여년 된 신기술'로서 그 기술 및 응용 면에서의 발전은 지금도 지속되고 있다. 이 글에서는 일 반적인 원리와 응용, 그리고 발전 방향에 대해 알아보기로 한다.

안 일 신 / 한양대학교 응용물리학과, 교수

e-mail : ilsin@hanyang.ac.kr

현대 과학과 기술에 있어서 빛은 매우 다양하게 사 용이 되고 있다. 정보를 저장하고 전달하는 능동적 매개체로서의 역할을 하기도 하며 또한 광노광이나 laser ablation에 있어서와 같이 각종 디바이스 제작을 위한 공정 tool로 사용되기도 한다. 그와는 달리, 역사가 오래 되긴 하였지만 빛의 다양한 성질 을 이용하는 광분석도 여전히 주요한 위치를 차지하 고 있다. 타원편광분석기술(ellipsometry)은 이 와 같은 광분석 기술의 하나로 우리에게는 자유전자 이론으로 더 유명한 P. Drude에 의해 1887년에 개발이 되었고 현재의 명칭은 1945년 A. Rochen이 제안하였다. 빛을 사용하여 물질을 분석 할 때 크게 세 가지 특성을 이용하고 있다. 첫째, 밝 기의 변화를 보는 경우와, 둘째, 간섭현상을 보는 경 우, 셋째, 편광현상을 보는 경우이다. 물론 이 현상들 이 섞여 있지만 타원편광분석기(ellipsometer)의 경우 주로 편광현상을 이용하고 있다. 빛은 전자기파 로서 전기장이란 벡터량을 가지고 있다. 즉, 빛의 진 행 방향에 수직인 방향으로 전기장이 진동을 하는 횡 파이며, 편광은 진동하는 전기장의 방향이 일정한 한 무리의 빛을 지칭한다. 일반 광원에서 발생하는 빛은 그 전기장의 진동 방향이 마구 섞여 있어 무편광상태 로 볼 수 있다. 사람의 눈은 빛의 밝기만을 인식하나 별의 경우 햇빛의 산란에 의해 발생하는 편광상태를 인지함으로써 하늘에 그려지는 편광무늬를 보고 먼 거리에서도 집을 찾아오는 것으로 알려져 있다 (Nature, Vol 323, 128~131, 1986). 하지만 사람도 편광을 많이 이용하고 있는데 일찍이는 편 광 선글라스의 사용이 그러하고, 최근에는 액정디스

플레이가 그 대표적인 예라고 할 수 있다. 선글라스 를 착용하는 사람들을 연상해 보면, 파일럿, 항해사, 운전기사 등이 떠오른다. 그 멋스러운 모습이 인상적 일지 모르지만 사실은 실용적 이유로 착용을 한다. 이들의 공통점은 반사하는 물체가 수평으로 놓인 환 경에서 일하는 사람들이라는 것이다. 파일럿의 경우 활주로와 하늘, 그리고 비행기 앞 동체가 그러하고 항해사의 경우 바다의 수면이나 갑판이 그러하며 운 전기사의 경우 도로와 주변의 차 표면들이 그러하다. 이런 수평방향으로 놓인 면으로부터 비스듬히 반사 되는 빛은 매우 밝으며 그 편광방향이 대부분 수평방 향이다. 따라서 편광 선글라스에 있어 편광판의 투과 방향이 수직이 되게 끼움으로써 눈부심을 방지할 수 있다. 더욱이 이 수평 반사되는 상당량이 차창이나 물의 걸 표면에서 발생하므로 이를 제거함에 따라 운 전자의 경우 앞 차의 안을 볼 수 있고, 낚시꾼의 경우 물 속을 들여다 볼 수 있게 된다. 그냥 색깔만 멋진 선글라스는 특정 파장 영역의 밝기만을 줄이므로 이 런 효과가 없으며, 또한 수직으로 서 있는 반사체가 많은 곳에서 일하는 사람들은 편광 선글라스의 투과 방향이 수평이 되게 돌려 끼우지 않으면 오히려 불편 을 겪게 된다. 그리고 반사각도가 너무 크거나 작은 경우 또는 반사체가 금속일 경우에는 편광 선글라스 는 그 기능을 잃게 된다. 이는 물질마다 편광에 대한 반사 특성이 다르기 때문인데 타원편광분석기술에서 는 바로 이 점을 이용하고 있다. 빛이 시편의 표면에 비스듬히 입사할 경우 반사 또는 투과 후에 그 편광 상태가 주로 타원편광으로 변하는데 타원편광분석기 술에서는 이 타원의 모양과 기술기 때로는 그 크기를

56



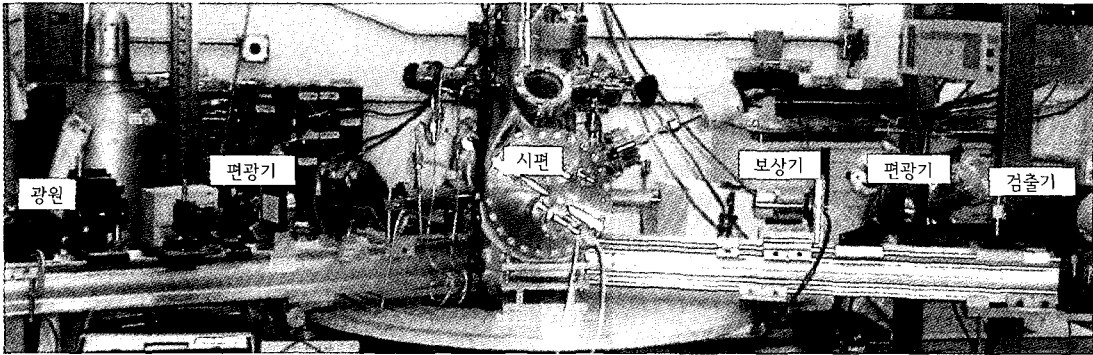


그림 1 박막 증착용 챔버에 장착된 타원편광분석기 사진. 광원으로 제논과 중수소 방전램프를 사용하고 있고 검출기로는 분광기와 다중채널검출기를 사용하고 있다. 사진의 모델은 보상기가 회전하는 구조로 일반적인 측정변수인 (Δ, Ψ) 보다 많은 네 개의 Stokes 변수를 측정할 수 있다.

분석함으로써 시편이 지닌 특성을 찾아내게 된다. 따라서, ‘ellipsometry’란 명칭도 바로 ‘타원’에서 유래하게 된 것이다. 적절하지는 않지만 이런 이유로서 일부에서는 이 장비를 ‘타원해석기’ 등으로 부르기도 한다.

타원편광분석 기술의 원리

우리는 편광 선글라스에 방향성이 있다는 것을 알고 있다. 이는 편광 선글라스를 끼고 전자시계나 컴퓨터의 액정화면을 얼굴을 옆으로 기울이면서 쳐다보면 화면이 검게 되는 것으로 쉽게 시험해 볼 수가 있다. 그러면 왜 편광 선글라스의 투과 방향(즉, 전기장의 진동방향)이 수직이 되게 끼워 넣었을까? 이는 앞에서 언급했듯이 빛이 표면에 비스듬히 입사할 경우 일반적으로 그 반사에 있어 수평으로 편광된 빛이 많이 반사가 되고, 표면에 수직인 방향으로 편광된 빛에 대한 반사는 일반적으로 약하기 때문이다. 따라서 타원편광분석기는 이 두 방향의 편광에 대한 반사량의 비를 측정하게 되는데 이에 관련된 변수를 (Ψ) 라고 한다. 또한 수평, 수직 방향으로 편광된 두 빛이 반사되어 나올 때 파동으로서 서로 위상차를 보이게 되는데 이 변수를 (Δ) 라고 한다. 타원편광분석 기술에서는 이 두 측정된 변수 (Δ, Ψ) 를 분석함으로써 그 표면이 가진 광특성(미세구조적 특성 포함)을 알아 낼 수가 있게 된다. 특히, 위상변화 값 (Δ) 는 표

면 구조에 매우 민감하여 표면에 단일 원자층이 형성되는 것도 쉽게 감지할 수 있게 된다. 아직도 몇 nm도 안 되는 산화막의 두께를 손쉽게 측정할 수 있는 방법으로는 타원편광분석법 밖에 없기 때문에 초박막 연구에 여전히 각광을 받고 있다. 타원편광분석기의 일반적인 구조는 그림 1에서 보듯이 입사각을 변화시킬 수 있도록 양팔 광학대의 구조로 되어 있으며, 빛이 입사하는 쪽에서부터 ‘광원-편광발생기-시편-편광분석기-검출기’의 구조로 되어 있다. 편광발생기 또는 편광분석기에서는 회전 또는 광변조를 통하여 시간적으로 그 편광상태를 바꾸게 되고 그 반응을 검출기로 측정함으로써 두 변수 (Δ, Ψ) 가 측정되고 이를 이론적 모델로 분석함으로써 시편의 특성을 찾아내게 된다.

타원편광분석 기술의 응용

타원편광분석기술은 타원편광분석기를 구성하고 있는 광부품의 종류 및 배열, 변조 방법, 그리고 응용분야 및 분석방법 등에 따라서 매우 다양하게 개발되어 있는데 (수백 종 이상), 각각 그 특성이 매우 다른 것이 또한 이 기술의 특징이기도 하다. 종류에 관계없이 일반적으로는 투과 또는 반투과성 박막의 두께나 광특성을 측정하는 데 많이 사용되어 왔다. 그런데 최근에 와서 이들 고전적 측정치에 대한 중요성이 더욱 커지고 있는데, 그 이유는 첫째, 앞에서 언급했듯이 첨단기술의 상당부분이 빛과 관련이 있고

둘째, 디바이스의 크기가 작아짐에 따라 더 엄격한 공정치가 요구되기 때문이다. 예를 들어, 고집적화로 인하여 트랜지스터의 게이트 산화막의 크기가 작아짐에 따라 두께는 nm 단위로 얇아져야 하고 반면 굴절률이 커져야 한다. 즉, 정확한 두께 측정과 함께 새로운 광특성을 가진 물질을 개발 연구하는 것이 매우 중요한 사항이 된다. 또한 고집적화를 위해서는 광노광 공정에 있어서 해상도를 향상시켜야 하는데 이를 위해서는 사용하는 파장을 점차 더 짧은 자외선 영역으로 가야 한다. 그러므로 이에 따르는 대부분의 공정물질을 새로 개발해야 하는데 그 물질의 여러 특징 중 특히 해당 파장에서의 광특성이 매우 중요하게 된다. 이와 같은 고전적 물리량인 두께나 광특성의 측정 말고도 표면 흡착, depth profile, 표면온도, 물질 구성비, 액정 고분자의 기울기 측정까지 다양한 물리량을 연구하는 데 사용이 되고 있다. 특히, 측정 속도를 현저히 향상시킴에 따라 실시간 측정이 가능하여 확산 반응 연구뿐만 아니라 공정 feedback용으로 사용하며, 넓은 파장 영역을 확보함으로써 마이크로웨이브에서 진공자외선까지의 다양한 광반응을 연구하고 또한 마이크로 광학계와 연결하여 imaging용으로 개발이 되고 있다. 하지만 현재 가장 많이 사용이 되고 있는 분야는 여전히 반도체 관련 metrology 분야인데, 노광공정, 박막공정, 식각공정에 있어 두께나 광특성 모니터링용으로 뿐만 아니라 패터닝 크기 측정을 위한 scatterometry 분야까지 이용이 되고 있다. 이 경우 매우 복잡한 분석기술이 가미된 타원편광분석 기술과 주기적인 패턴 측정을 위한 시편 이송 스테이지 및 로봇 기술, 그리고 반복적인 위치 제어를 위한 패턴인식 기술 등이 연계가 된 복합기술로 소개가 되고 있다. 따라서 순수 타원편광분석기의 시장 규모는 별도로 예측하기 어려우나 대형 LCD나 PDP 패널의 균질도 검사를 위한 mapping 장비로서의 응용까지 고려하면 연 수십억 달러 이상은 될 것으로 추정된다. 또한 나노기술과 바이오테크놀로지에 대한 관심이 커감에 따라 이들 분야에의 응용도 상당히 기대가 된다. (제44권 제10호 테마기획 참조)

타원편광분석 기술의 발전 방향

이 기술의 발전은 그간 개최된 학회에서의 발표 자료를 통해서도 쉽게 알 수 있다. 가장 최근의 학회는 제3회 국제 분광타원편광분석기술 학회(ICSE3)로 2003년에 개최 되었고 약 200편의 연구결과가 발표되었다. 현재 수백 종의 타원편광분석기술이 사용이 되고 있는데 일반적인 발전 경향은 파장영역의 확장, 측정 속도의 개선, 측정변수의 일반화, 특수목적용 개발 등으로 나눌 수가 있겠다. 속도의 개선은 실시간 측정 및 분석을 통하여 실시간으로 공정변수를 조절하게 할 수 있게 된다. 또한 광노광 공정용 파장이 deep UV(DUV), 진공자외선(VUV), 극자외선(EUV)로 점차 작아짐에 따라 해당 파장영역에서 작동이 가능한 타원편광분석기 개발에도 많은 투자를 하고 있다. 또한 앞에서 언급한 고굴절률 물질을 연구하기 위해서는 그 특성의 변화가 확연한 DUV나 VUV 영역에서의 연구가 효과적이다. 파장이 짧아지면 단순히 광원만 바뀌면 되는 것이 아니기 때문에 큰 어려움이 있다. 현재 본 연구실에서 개발 중인 VUV 타원편광분석기를 예를 들자면, 우선 모든 광학계를 파장 150nm 이하 영역까지의 진공자외선이 통과 또는 반사하는 물질로 바꾸어야 하는데, 이 영역에서 투과하는 렌즈나 광학창은 고순도의 MgF_2 , CaF_2 등의 재질로 제작이 되어야 하는데, 우선 이들 물질은 고가이며 또한 산소에 의한 빛의 흡수를 막기 위해 ppm 이하의 무산소 환경을 조성하여야 한다. 이를 위해서는 진공을 사용하든지 고순도의 안정된 질소 환경을 만들어줘야 하는데 이 질소 purge 과정은 매우 까다롭기 때문에 VUV 광노광에서도 큰 난제로 삼고 있다. 또한 게이트 산화막의 두께 및 광특성을 디바이스 구조를 형성한 후에 측정해야 할 필요성이 커짐에 따라 공간 분해능이 수십 um 이하로 좋아져야 한다. 이 경우 빔 크기의 소형화도 해결해야 하지만, 정밀측정을 위하여 분광측정을 실현하여야 하기 때문에 collimation 및 focusing을 위해서는 색수차가 없도록 전부 거울로 된 광학 시스템을 개발하여야 한다. 아울러, 현재는 고전적인 두 변수 (Δ , Ψ)를 주로 측정과 분석에 사용하고 있지만 scattering이나 비등방성 등 시

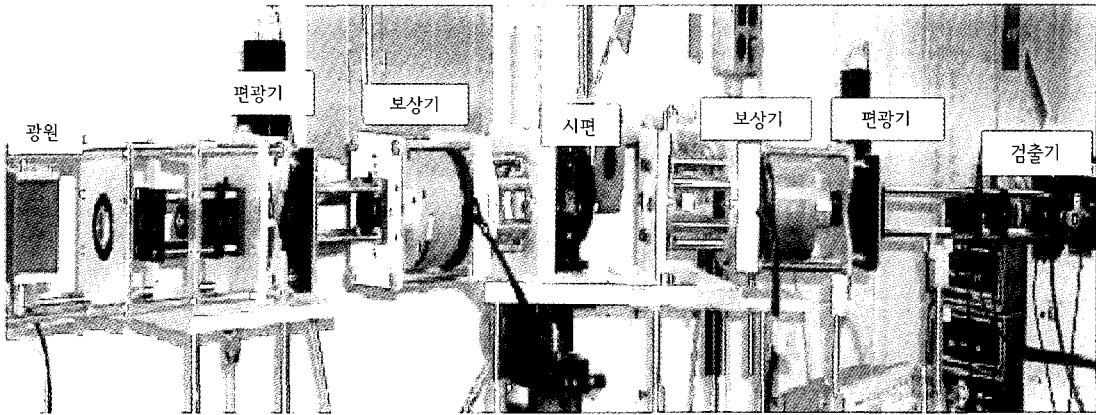


그림 2 사진의 모델은 시편 좌우의 보상기의 특징비로 회전하는 구조로 일반적인 측정변수인 (Δ, Ψ) 보다 많은 16개의 Mueller matrix 요소 스펙트럼을 실시간으로 측정할 수 있다.

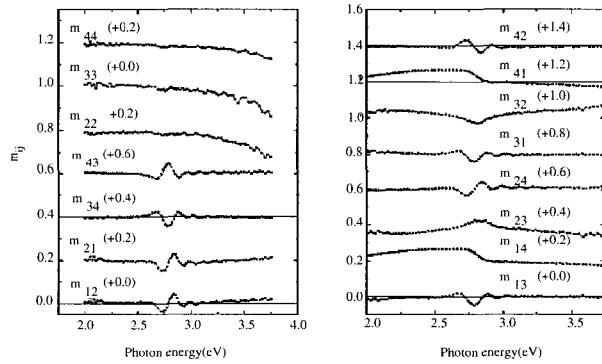
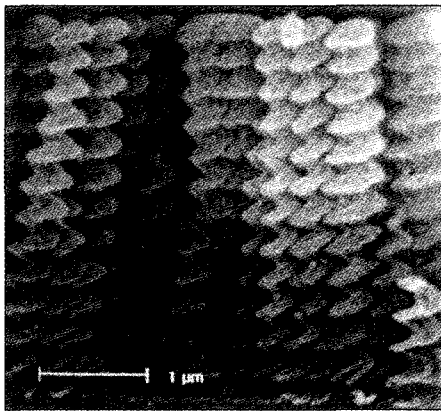


그림 3 (왼쪽) 나선형 미세구조를 가진 박막의 단면 사진과 (오른쪽) 해당 박막을 측정한 Mueller matrix 요소 스펙트럼 (Thin Solid Films, Vol. 455/456, 571, 2004)

편에 대한 더 일반적인 광학정보를 확보하기 위한 다 변수 타원편광분석기술 개발에도 많은 연구를 하고 있다. 물론 이 경우 장비 그 자체뿐만 아니라 분석기술까지 함께 개발되어야 한다. 그림 2의 경우는 16개의 Mueller matrix 정보를 측정해낼 수 있는 아주 복잡한 타원편광분석기를 보여주고 있다. 그림 3은 나선형 구조의 박막과 그림 2의 장비로 측정한 Mueller matrix 스펙트럼을 보여주고 있다. 이를 분석하면 두께나 비등방적인 광특성 외에도 나선구조의 피치라든지 접촉각 등을 알아낼 수 있게 된다.

즉, 이와 같은 인공적인 미세구조물과 그 광특성은 서로 밀접한 관계를 가지고 있는데, 광노광 공정에서 line-and-space 패턴 크기 측정이라든가 새

로운 광특성 창출을 위한 photonic crystal 분야로의 응용을 위한 새로운 타원편광분석기술이 기대되고 있다. 그림 4는 실리카 구로 형성시킨 photonic crystal의 표면구조와 그 retardance 스펙트럼을 보여 주고 있다. 이 경우, 일반 타원편광분석기로는 측정이 매우 어렵기 때문에 시편-보상기 복합 회전형 타원편광분석 기술을 새로이 개발하여 측정 분석하였다.

결국, 타원편광분석 기술은 지난 100여 년에 걸쳐 꾸준히 발전을 하여 왔음에도 불구하고 주변 기술의 발달과 함께 새로운 응용분야의 도래에 부응하기 위하여 항상 차세대 기술로서 자리를 잡고 변모를 하고 있다.

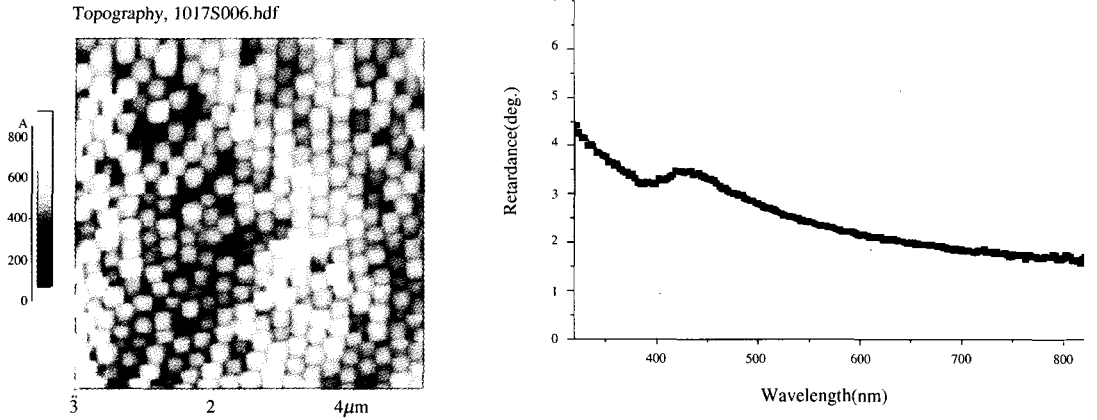


그림 4 (왼쪽) 실리카 구로 형성시킨 photonic crystal의 AFM 사진과 (오른쪽) retardance 스펙트럼. Photonic bandgap (400nm) 근처에 특이한 변화를 보여주고 있다.

맺음말

타원편광분석기술은 매우 다양한 원리로 작동하며 또한 매우 다양한 분야에 사용이 되고 있다. 즉, 정체된 기술이 아니라 끊임없이 발전이 요구되는 기술이다. 현재 반도체를 위주로 한 응용에서 한 걸음 더 나아가 나노공정 분야나 바이오 관련 분석분야로의 응용이 크게 기대가 되고 있다. 이를 위해서는 초미세 광학계의 사용과 함께 새로운 원리로 작동하는 편광타원분석기의 개발이 필요하며, 아울러 기계적인 부분에 있어서도 미세제어의 기술과의 융합이 불가피하다. 또한 빔의 크기가 미세화됨에 따라 검출

기에 도달하는 광량이 줄어들게 되는데 이를 보완하기 위해서는 반응도의 향상된 검출기의 개발과 함께 잡음제거를 위한 기술이 필요하게 된다. 아울러 안정된 광원의 개발 또한 매우 중요한 과제로 남게 된다. 즉, 새로운 응용분야에 부응하기 위하여 타원편광분석기술이 발전되기도 하고 전자와 기계 분야 등 주변 복합적인 기술이 발전함에 따라 이를 이용하는 새로운 기능의 타원편광분석기가 개발되기도 하는 것이다. 끝으로, 부가가치가 매우 큼에도 불구하고 대부분 해외 기술에 의존하고 있는 분석기기 분야에 이제는 많은 관심이 모여졌으면 하는 바람이다.

기계용어해설

바이오디젤(Biodiesel)

바이오디젤이란 식물성오일이나 동물성지방과 같은 회복가능한 자원인 자연자원으로 만들어 졌기 때문에 환경적으로 유익하며 미생물을 안전하게 분해하고 회복성이 좋은 연료로서 화석연료보다 대기오염이 적은 것이 특징이다. 또한 기존의 디젤연료보다 높은 세탄가를 나타내므로 완전연소에 의한 연소효율을 증대시킬 수 있으며 연료의 순환성이 디젤연료보다 우수하다.