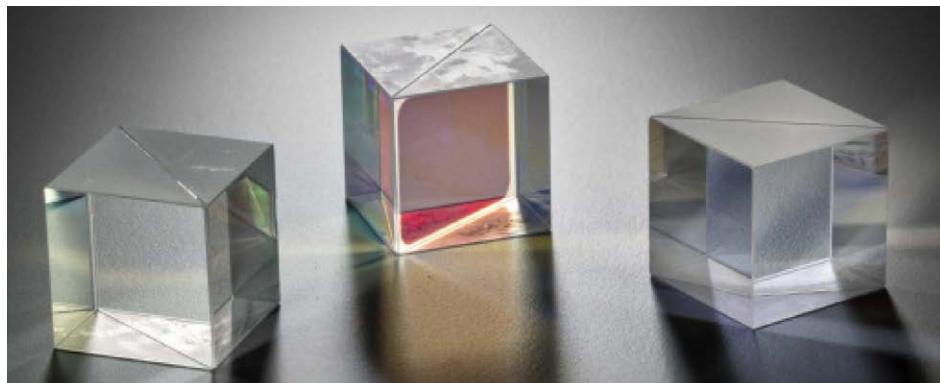


빔 분배기 및 쿼터 웨이브 미러의 품질 관리

다층 광학 코팅의 다각도 UV-Vis-NIR 측정



저자

David Death
Farinaz Haq
Agilent Technologies,
Australia

서론

광학 코팅과 코팅 기술은 설계, 생산, 특성 규명 면에서 다년간 발전해왔습니다. 오늘날 광학 코팅은 연구 및 우주 광학 장치 응용에서부터 소비재 및 소비재 산업에까지 널리 사용됩니다. 이 기술이 사용되는 다양한 응용 분야에는 안경, 건축 및 자동차 유리, 조명 시스템, 디스플레이, 광학 필터, 특수 거울, 광섬유, 통신 및 의료 광학 등이 포함됩니다. 광학 코팅의 성능은 코팅과 기판 재료의 사양에 달려 있습니다.

고품질 다층 광학 코팅의 설계와 생산에는 완제품 구성 요소뿐만 아니라, 박막층 재료의 광학 상수에 대한 정확한 측정도 필요합니다. 이런 측정은 때로 매우 복잡해질 수 있는 다층 코팅의 세심한 설계를 가능케 합니다. 또한 생산 과정 및 최종 단계에서의 측정은 광학 코팅의 역공학에 사용되어 설계 생산 과정에 대한 피드백을 제공할 수 있습니다(1). 역공학의 주 목적은 개별 층 파라미터에서의 시스템적 오류 및 임의적 오류를 감지해 내는

것입니다. 이는 층 관리를 개선하고 광학 코팅 증착을 최적화하는데 도움이 됩니다.

광학 코팅의 믿을 수 있는 역공학이 가능한지는 반사와 투과의 정확한 측정이 가능한가에 절대적으로 달려 있습니다. 역사적으로 이러한 측정은 수직 입사 투과(T) 및/또는 근접 수직 입사 반사(R) 데이터로 제한되었습니다. 쉽게 예상 가능하듯, 다층 역공학의 경우는 코팅층의 증가로 인해 불확실성이 증가합니다. 일반적으로 더 많은 측정 데이터를 이용하면 역공학의 불확실성을 최소화하는 것이 가능합니다. 모두 입사각(AOI) 범위에서 이루어지는 T와 R 측정은 박막 재료의 특성 규명과 다층 코팅의 특성 규명에서 중요한 가치를 지닙니다. 대부분의 일반적인 역공학에서는 연구 대상 코팅과 관련된 수직 또는 유사 수직 입사 T 및 R 데이터에 대한 여러 번의 상세 분석이 이루어집니다. 이러한 접근은 실험적으로 간단하지만, 근접 수직 T 및 R 데이터 세트의 가용 정보가 제한적이라는 점과 이러한 데이터 세트 내 측정 오류 가능성 때문에 신뢰성 낮은 결과를 얻게 될 수 있습니다(1). 특히 광대역 반사기의 반사 데이터 또는 광대역 반사 방지(AR) 코팅의 투과 데이터는 적은 정보의 데이터 세트 사례라고 볼 수 있습니다. 역사적으로 단순한 수직 입사 T 측정은 다양한 종류의 분광 광도계를 이용해 가능했으며, 근접 수직 입사 R 측정 역시 적합한 반사 액세서리를 장착한 동일 기기로 가능했습니다.

이 응용 자료에서는 고유한 자동 이중 빔 UV-VIS-NIR 다각도 분광 광도계인 Cary 7000 범용 측정 분광 광도계(UMS)를 사용한 새로운 형태의 다각도 분광 광도 측정 방법에 대해 시연합니다. 실험에서 얻은 다각도 스펙트럼 광도계 데이터 세트 덕분에 가능한 역공학적 분석과 함께, 스펙트럼 빔 분배기와 2개의 43개층 쿼터 웨이브 스택 미러를 생성하기 위해 사용된 서로 다른 기판의 다층 코팅 측정 사례가 제시됩니다.

실험

시료

3개의 서로 다른 코팅 측정 결과는 Amotchkina 외 다수의 연구(2)에 요약되어 있습니다. 첫 번째 코팅인 BS-AR-Suprasil은 45°의 기울어진 AOI를 위해 특별히 설계된 빔 분배기입니다. 52개 층 반사기가 1mm 두께의 Suprasil 기판 위에 입혀졌습니다. 정면 코팅 사양은 935nm~945nm에서 98%를 초과하는 T, 967nm~971nm에서 98%를 초과하는 R의 스펙트럼 투과

프로파일을 요구합니다. 또한 10층 광대역 AR 코팅이 뒤쪽 표면에 입혀졌습니다. 광학 코팅은 일반적으로 높은 굴절률과 낮은 굴절률의 재료를 다양한 두께로 교차 코팅하게 됩니다. 높은 굴절률 재료가 사용된 이 첫 번째 시료는 Niobium Pentoxide (Nb_2O_5), 낮은 굴절률 재료는 실리카(SiO_2)이며, 코팅 작업은 Leybold Optics GmbH Helios 마그네트론 스퍼터링 시스템을 사용해 진행되었습니다.

2번째와 3번째 시료는 모두 높은 반사율의 장치이며, 800nm 반사기로 설계된 43개층 쿼터 웨이브 스택으로 구성되어 있습니다. 코팅은 6.35mm 두께의 용융실리카, 1.0mm 두께의 B260 유리 등 2가지의 서로 다른 기판 유형 위에 입혀졌습니다. 시료명은 HR800-FusedSilica와 HR800-Glass입니다. 이 코팅에 사용된 높은 굴절률의 재료는 Hafnia(HfO_2), 낮은 굴절률 재료는 실리카(SiO_2)입니다. 코팅은 Leybold Optics GmbH SYRUSPro 710 코팅 머신의 전자빔 증착을 사용해 입혀졌습니다.

기기

완료된 코팅의 반사율과 투과율은 고도로 자동화된 가변 각도 절대 정반사 및 투과 UV-Vis-NIR 분광 광도계인 Cary 7000 UMS를 사용해 수집했습니다. Cary 7000 UMS는 그림 1에서 볼 수 있듯, 사용자에게 시료 AOI 및 검출기 각도 위치 모두에 대해 자동화된 독립적 모터 제어를 제공합니다. 시료 AOI와 검출기 위치 모두에 대한 독립적인 제어 기능으로 빠르고 정확한 무인 다층 광학 코팅 측정이 가능합니다.

전통적으로 반사율과 투과율 측정은 각기 다른 분광 광도계 액세서리를 사용해 이루어졌습니다. 이로 인해 시료의 여러 위치에서 반사율과 투과율을 측정됩니다. 코팅 증착 절차는 잘 관리되더라도 완벽하지 않으며 막의 코팅은 균일하지 않은 두께로 입혀집니다. 따라서 반사율과 투과율 측정 결과는 코팅 두께가 달라지는 표면 지점에 따라 값이 다르게 나타날 수 있습니다. 이제 Cary 7000 UMS의 개발로 R에서 T 측정 모드로 변경할 때 시료 이동 없이 시료 표면의 동일 지점에서 R과 T를 측정할 수 있습니다. 또한 시료를 180° 회전시켜 정적 투과 측정을 정방향 또는 역방향으로 수행할 수 있습니다. 이와 비슷하게 반사 측정에서의 AOI는 시료 법선을 기준으로 어느쪽인가에 따라 달라질 수 있으며, 검출기는 \pm AOI에서의 R 측정을 위해 이동될 수 있습니다. 두 경우 모두 분광 광도계의 시료를 제거 및 교체하거나 다른 액세서리로 변경하지 않고 동일한 지점에서 R과 T를 모두 측정할 수 있습니다.

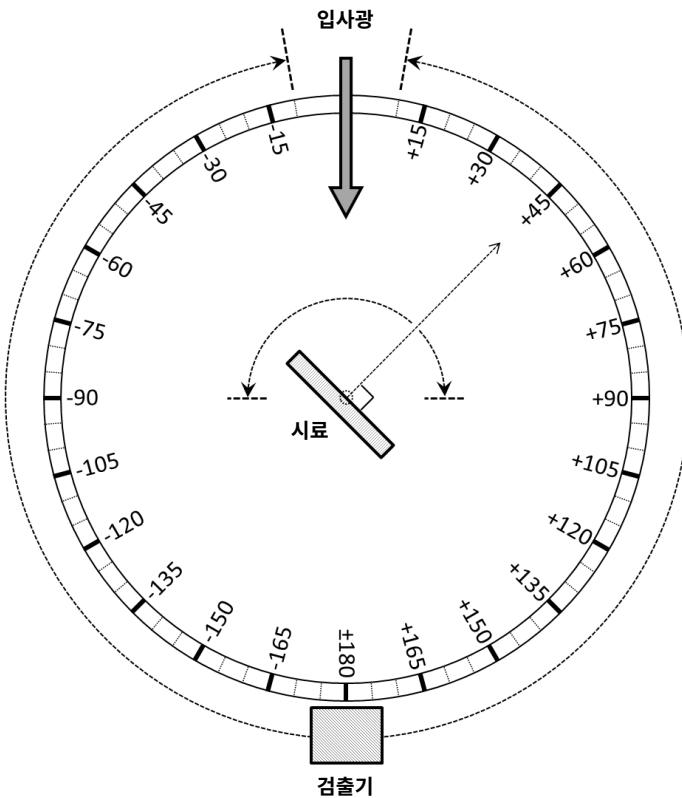


그림 1. 시료에 대한 AOI 및 검출기 위치는 0.02° 분해능으로 각각 개별 설정이 가능합니다. 시료에 대한 AOI 범위는 -85°~AOI~85°입니다. 검출기는 -10°~10° 범위의 각도로 놓을 수 있습니다. 결과적으로 Cary 7000은 5°~|AOI|~85° 범위의 R과 0°~|AOI|~85° 범위의 T를 측정할 수 있습니다.

결과 및 토의

각 증착 단계에서의 작은 층 두께 변화와 다른 코팅 조건에서 사용되는 재료의 광학 특성의 변화는 광학 코팅의 전반적인 성능이 원래 설계 의도를 충족하지 못하게 되는 결과를 초래합니다. 광학 코팅의 설계와 분석은 각 층의 물리적 두께와 코팅 재료의 광학 상수에 대한 정확한 지식에 의존하는 정교한 컴퓨터 소프트웨어 패키지를 사용해 이루어집니다. 설명된 3회의 코팅은 측정된 투과율과 반사율 데이터를 기초로 다층 코팅 설계, 성능 예측, 광학 재료 특성 규명, 코팅 역공학을 수행하는 모듈 구성의 소프트웨어 패키지인 Optilayer를 사용해 설계되었습니다.

일부 최신 코팅 장비에는 코팅이 증착되는 과정에서 수직 입사를 모니터링하는 설비가 갖춰져 있습니다(3-4). 수직 입사에 대해 진행되는 이러한 현장 측정은, 입혀진 코팅의 최종 설계 경사 입사 성능을 예측하는 기초로 사용됩니다. Optilayer를 사용한 현장 데이터 상세 분석은 일반적으로 초기에 설계된 반사율과 투과율 영역 위치와의 대략적인 일치 결과를 보여줍니다. 그러나 현장 수직 입사 측정은 실제로 완료된 코팅의 R과 T 측정의 경사각에 대한 진정한 대체값이 아닙니다. Amotchina 외 다수가 수행한 연구에서는 Cary 7000 UMS를 사용한 측정이 어떻게 증착된 코팅의 역공학과, 이로 인해 현장 측정을 사용한 코팅 과정에서 원래 코팅 설계 의도와 근접하도록 미세 조절이 가능한지 설명합니다.

Nb₂O₅ 및 SiO₂의 광학 속성이 잘 알려져 있기 때문에, BSAR-Suprasil 빔 분배기의 사례에서 주요 불확실성은 개별 층의 두께로 인한 것임을 알 수 있습니다. 이 연구에서는 Cary 7000 UMS를 사용하여 코팅 후 시료를 측정했습니다. 빔 분배기의 코팅 사양은 45° AOI에서 사용되었습니다. Cary 7000 UMS를 사용함으로써 시료 표면의 동일 패치에서 다양한 AOI의 R과 T 값을 모두 측정하는 것이 가능했습니다. 데이터 세트(더 많은 AOI)의 측정 횟수를 높이면 코팅 역공학 결과로 인한 불확실성 수준을 낮출 수 있습니다. 또한 이 데이터와 분석을 사용하여 현장 측정 간 상관관계를 밝히고 증착 최적화 전략을 수립하는 것이 가능했습니다. 마지막으로 Cary 7000 UMS의 측정은 최적화 검증에 사용되었습니다.

그림 2는 최적화된 BSAR-Suprasil 빔 분배기(AOI 45°, 그림 2(a))의 측정된 스펙트럼 투과율과 예측치를 비교하고 있습니다. Cary 7000 UMS를 사용해 비편광 투과 측정을 수행했습니다. 이론적인 곡선(Optilayer)과 측정된 데이터 지점 간 스펙트럼 일치율은 매우 우수했습니다. 피크 높이 간 차이는 주로 측정 데이터 수집에 사용된 스펙트럼 대역으로 인한 것이었습니다. BSAR-Suprasil 시료의 추가 측정 역시 S 및 P 입사 편광 모두에 대해 30°의 AOI로 수행되었으며, 이 데이터는 그림 2(b)에 예측 스펙트럼 투과율과 함께 기재되어 있습니다. 이론과 측정치 간 일치율은 여기에서도 매우 우수하게 나타났습니다. 경사 AOI 45°와 30°에서 이루어진 측정치와 모델 예측 간의 놀라운 일치율은 현장 수직 입사 투과 측정에 기초한 코팅 증착 최적화에 사용된 역공학과 모델 미세 조정을 검증해줍니다.

측정된 2번째와 3번째 시료는 비스듬한 고반사율 장치를 위해 설계된 다층 쿼터 웨이브 스택 미러의 사례였습니다. 각 미러는 Hafnia(HfO₂ — 고반사율 재료)와 실리카(SiO₂ — 저반사율 재료)의

43개 쿼터 웨이브 교차층으로 구성되어 있습니다. 시료 간 사용된 기판의 유형과 두께 차이: HR800-FusedSilica — 6.35mm 두께 용융실리카; HR800-Glass — 1mm 두께 B260 유리. 이 코팅에서는 Hafnia의 광학적 특성과 각 층 두께의 불확실성을 모두 고려해야 합니다. 다시 한 번 강조하자면 미러는 입사각 AOI 45°의 비편광 입사광을 위해 설계되었습니다.

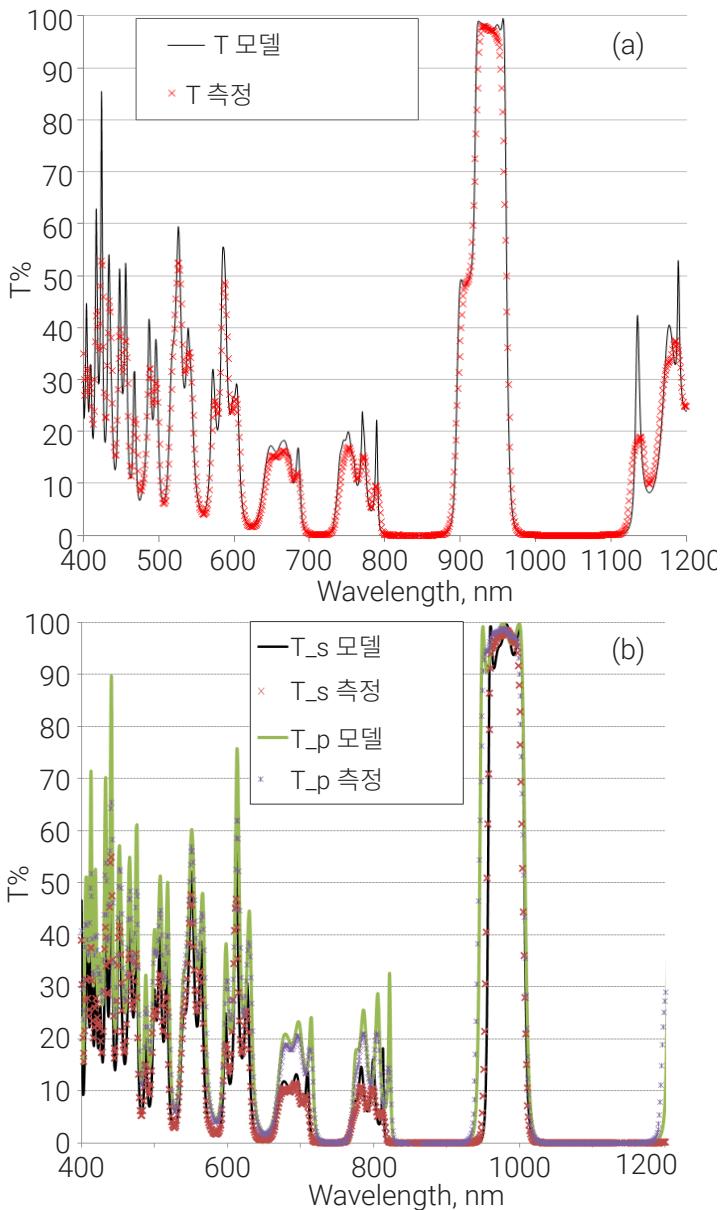


그림 2. 시료 BS-AR-Suprasil의 경사진 입사각의 실험 투과율 데이터와 모델 투과율 간 비교, (A) 45°에서 비편광, (b) 30°에서 s 및 p 편광.

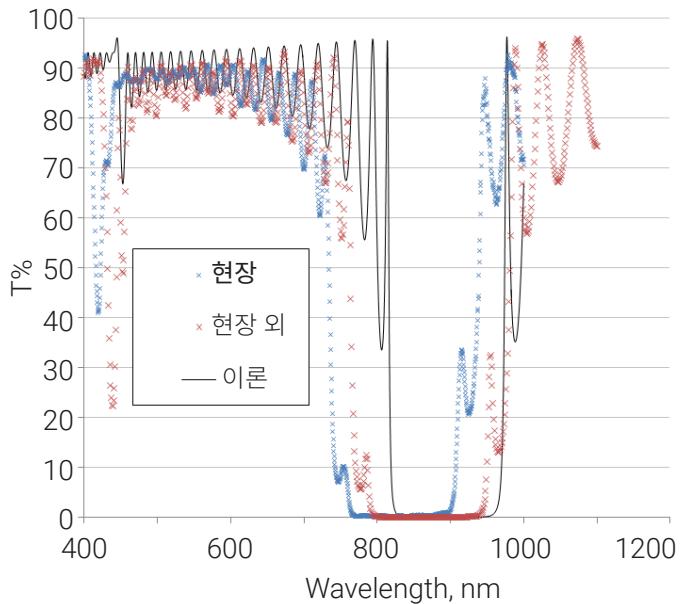


그림 3. 현장 수직 입사 투과율 데이터 비교, Cary 7000 UMS(현장 외) 측정과 HR800-Glass 시료의 이론적인 투과율.

첫 번째 시료에서 Cary 7000 UMS를 통한 이러한 측정은 최종 코팅 성능의 특성을 규명하고 코팅 전략을 최적화하고 역공학 분석의 결과를 검증하는데 사용되었습니다. 개발된 전략에는 작업 과정 중 조절을 위한 코팅 절차에서의 역공학 현장 수직 입사 측정이 포함되어 있습니다. 재료 및 층 두께 변이가 끼치는 영향의 예로, 그림 3은 Cary 7000 UMS를 사용하여 최적화되지 않은 코팅의 현장 및 최종 투과율을 측정하여 원하는 설계 사양을 비교하고 있습니다. 여기에서 볼 수 있듯이 3개 데이터 세트의 사양 편차는 명백합니다. 핵심적인 차이는 보다 짧은 파장을 향한 반사 대역의 변경 및 반사 대역 너비의 차이입니다.

보다 짧은 파장을 향한 반사 대역의 위치는 코팅 증착 시 개별 층 광학 두께를 낮은 값으로 평가했기 때문입니다. 이는 증착 층의 물리적 두께에서 오류가 발생했거나 층 재료의 광학적 특성(반사 지수 및 흡광 계수)과 관련된 불확실성 때문일 수 있습니다. 코팅 층의 기하학적 두께 오류는 증착 관리에 사용되는 석영 크리스탈 층 두께 모니터의 부정확한 검량 때문일 수 있습니다. 재료 특성에서의 오류는 이와 달리 증착 온도에 따른 미세한 굴절률 지수 변이 때문에 발생할 수 있습니다.

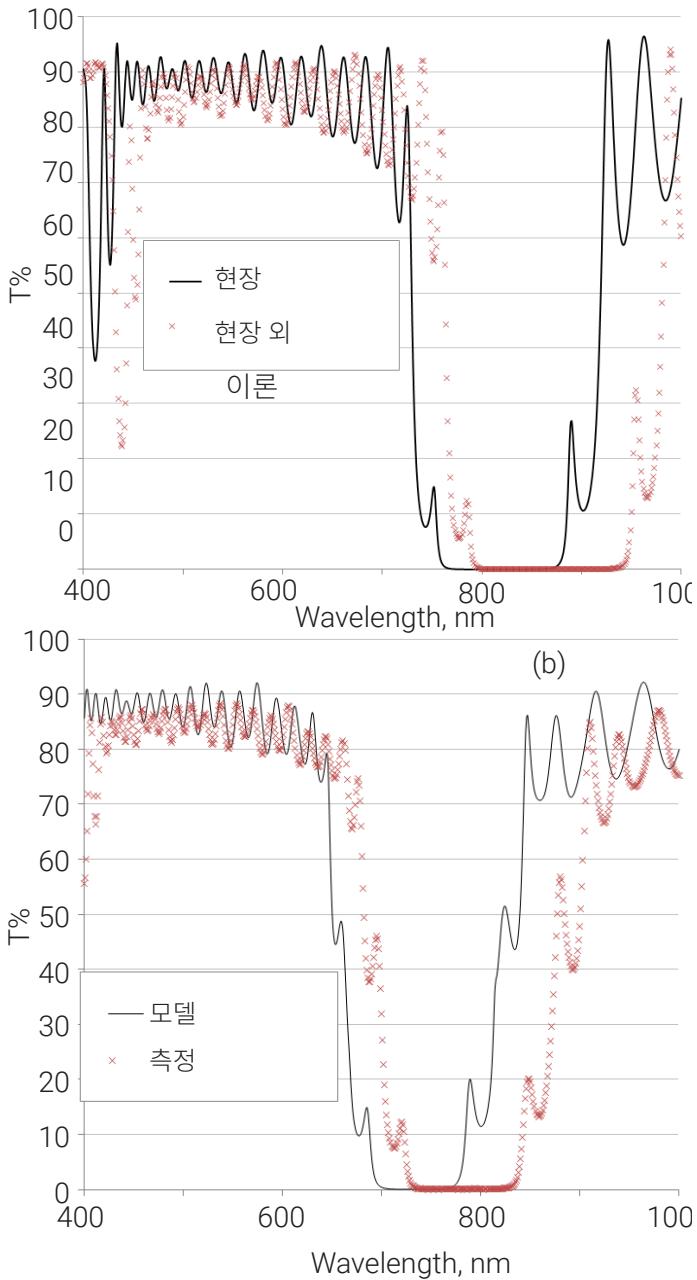


그림 4. HR800-FusedSilica 시료와 관련된 수직 입사(a) 및 $AOI=45^\circ$ (b) 실험 투과율 데이터와 중간 설계를 위한 모델 투과율의 비교.

HfO_2 는 증착 온도 함수로서 굴절률과 같은 변수를 나타내며, 여기에서 사용된 상대적으로 낮은 증착 온도($120^\circ C$)에서는 값에 어느 정도의 불확실성이 있습니다. 또한 쿼터 웨이브 미러 스택의 반사 대역 폭은 사용된 높은 굴절률 지수와 낮은 굴절률 지수의 비에 따라 달라집니다(5). 설계 사양에 기초할 경우 폭은 126nm 이어야 합니다. 수직 입사 현장 측정은 133nm 의 폭을, Cary 7000 UMS 측정은 143nm 의 폭을 나타냅니다. 광학적 특성 및 실리카 층의 작은 공극률과 관련된 불확실성을 고려 시, $Hfnia$ 층의 굴절률이 코팅 모델 설계 시 예상한 값보다 분명히 클 것입니다. 크게 나타난 것으로 보이는 굴절률은 HfO_2 층의 공극 구조로 설명할 수 있습니다. 진공 조건에서 HfO_2 층의 공극 구조는 빈 상태로 유지되며, 굴절률은 이에 따라 낮게 나타납니다. 코팅을 대기해 노출시키면 공극 구조가 수증기로 채워지며, 따라서 굴절률이 증가합니다. 이 절차는 진공 시프트(vacuum shift)로 널리 알려져 있습니다(6). 이 효과는 층 두께의 임의 오류를 허용하고 HfO_2 층 굴절률의 임의 오프셋을 허용함으로써 합리적이고 정확하게 설명할 수 있습니다(2).

그림 4는 수직 입사 및 경사 입사의 측정된 투과 곡선과 6.35nm 용융실리카 기판(HR800-FusedSilica)의 800nm 고반사 코팅에 대한 예측된 설계 곡선을 비교하여 보여줍니다. 파장 변경이 다시 한 번 관찰되었으나, 이번에는 보다 긴 파장을 향하고 있습니다. 고반사율 영역의 폭 역시 다릅니다. 이 코팅에서는 물리적 층 두께가 비교적 정확한 것으로 나타났습니다. 이 경우에 반사 대역의 위치 변경은 HfO_2 층에 대한 예측된 굴절률 값의 불확실성으로 인한 것이었습니다. HfO_2 층은 HfO_2 와 SiO_2 코팅 재료의 내부 확산으로 인해 불균질한 것으로 간주됩니다(1). 따라서 여러 HfO_2 층의 굴절률 무작위 변이는 모델에 포함되었으며, 수직 입사 및 경사(45°) 입사에 대해 다시 계산된 예측 투과율은 Cary 7000 UMS를 통한 측정값과 비교되었습니다.

모델 데이터에 의해 측정된 수직 입사의 최종 피팅은 그림 5(a)에 나와 있습니다. 측정값으로의 모델 피팅은 모델에 아직 개선의 여지가 있다는 점을 나타내는 합리적인 지표입니다. 모델은 증착된 코팅의 주요 특징을 모두 고려하고 있으나, 층별 재료 불균일성으로 인한 층의 변이 및 HfO_2 및 SiO_2 재료의 확산으로 인한 중간층 정의를 허용함으로써 더 개선될 수 있습니다. 이러한 정교화의 정도는 특정 입사각에서의 하나의 투과율 또는 반사율 측정 세트에만 기초할 수 없습니다. 독보적인 기능의 Cary 7000 UMS는 이와 같은 효과를 모델링하는 데 확실성을 갖추기 위해 필요한, 주어진 시료의 여러 각도에서 측정된 R과 T 데이터를 모두 제공합니다.

그림 5(b)는 코팅 모델과 45°에서 측정된 투과율 간 비교를 보여줍니다. 결과는 Cary 7000 UMS 측정치와 예측 곡선 간 우수한 일치율을 나타냅니다. Cary 7000 UMS를 사용해 0°~45° 범위의 AOI에서 5° 간격으로 모든 각도를 측정한 결과, 측정치와 모델 간 근접이 확인되었습니다.

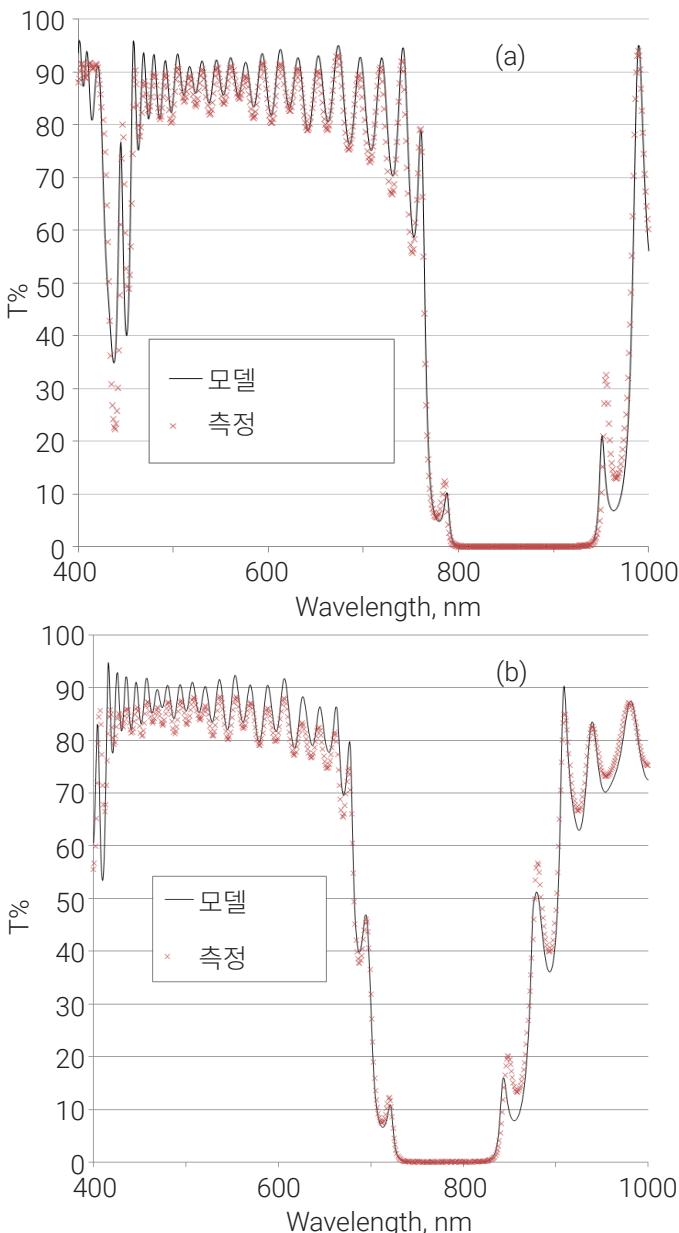


그림 5. 수직 입사(a)와 경사각 AOI=45°(b)의 모델 투과율별 HR800-FusedSilica 시료 관련 최종 피팅 실험 투과율 데이터.

그림 6은 파장 800nm에서 측정 및 계산을 거친 S 및 P 편광 투과율 간 잔여 차이를 보여줍니다. Cary 7000 UMS로 측정한 절대 투과율과 모델로 예측한 값 사이에는 우수한 일치율이 나타난 것을 볼 수 있습니다.

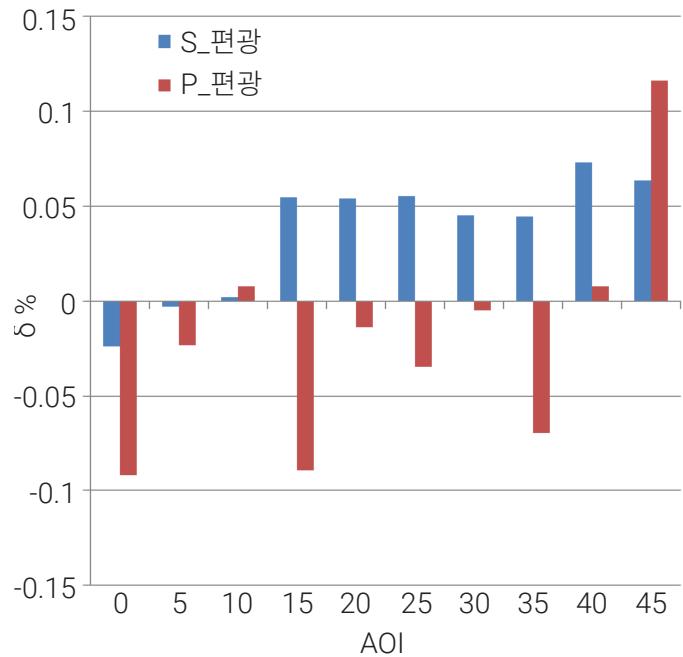


그림 6. HR800-FusedSilica 시료의 실험 투과 측정 데이터와 모델 투과 측정 데이터 간 잔여 차이, 파장 800nm vs AOI.

결론

Cary 7000 UMS는 복잡한 다층 광학 코팅의 측정과 특성 규명에 유용한 도구임이 나타났습니다. Cary 7000 UMS는 시료 회전과 검출기 위치에 대한 개별적인 자동 제어 기능을 제공함으로써, 시료 이동 없이 다양한 각도에서 투과율과 반사율 측정이 가능하도록 하는 독특한 기능을 발휘합니다. 자동 Polarizer는 S와 P 편광 측정이 모두 가능하도록 하며, 이는 모두 시료 표면의 정확한 동일 지점에 광을 입사시켜 이루어집니다. Cary 7000 UMS는 믿을 수 있고, 사용이 쉬우며, 정확한 데이터를 생성하는 무인 기능으로, 광학 코팅 환경의 QA/QC에 이상적인 제품입니다.

Amotchkina 외 다수는 다양한 각도에서 광학 코팅을 정확하게 측정하는 것은 복잡한 광학 코팅의 정확한 특성 규명, 제어, 최적화에 매우 중요하다는 것을 보여줍니다. 이러한 측정은 코팅 증착의 정교한 최적화 전략 적용을 검증하고 사용 가능하게 해주며, 특히 경사진 입사각에서의 응용을 위한 코팅 설계에 유용합니다. 해당 전략에는 종종 수직 입사를 통한 현장 측정이 포함되며, 이러한 측정 후 제한된 데이터세트로부터 코팅에 대한 역공학을 수행하게 됩니다. Cary 7000 UMS는 다양한 각도에서의 정확한 측정을 통해 최적화 및 검증을 가능하게 합니다.

참고 문헌

1. A.V. Tikhonravov, T.V. Amotchkina, M.K. Trubetskoy, R.J. Francis, V. Janicki, J. Sancho-Parramon, H. Zorc and V. Pervak, “Optical characterisation and reverse engineering based on multiangle spectroscopy,” *Appl. Opt.* 51(2), 245-254 (2012).
2. T.V. Amotchkina, M.K. Trubetskoy, A.V. Tikhonravov, S. Schlichting, H. Ehlers, D. Ristau, D. Death, R.J. Francis, and V. Pervak, “Quality control of oblique incidence optical coatings based on normal incidence measurement data,” *Optics Express*, 21,18, 21508–21522 (2013).
3. D. Ristau, H. Ehlers, S. Schlichting, and M. Lappschies, “State of the art in deterministic production of optical thin films,” *Proc. SPIE* 7101, 71010C, 71010C-14 (2008).
4. H.E. Ehlers, S.S. Schlichting, C.S. Schmitz and D.R. Ristau, “Adaptive manufacturing of high-precision optics based on virtual deposition and hybrid process control techniques,” *Chin. Opt. Lett.*, 8, 62–66 (2010).
5. S.A. Furman and A.V. Tikhonravov, “Basics of Optics of Multilayer Systems, Editions Frontieres, (1992).
6. O. Stenzel, S. Wilbrandt, S. Yulin, N. Kaiser, M. Held, A. Tunnermann, J. Biskupek, and U. Kaiser, “Plasma ion assisted deposition of hafnium dioxide using argon and xenon as process gases,” *Opt. Mater. Express*, 1(2), 278–292 (2011).

www.agilent.com/chem

DE.684305556

이 정보는 사전 고지 없이 변경될 수 있습니다.

© Agilent Technologies, Inc. 2020
2020년 4월 15일, 한국에서 발행
5994-4030KO

한국애질런트테크놀로지스(주)
대한민국 서울특별시 서초구 강남대로 369,
A+ 에셋타워 9층, 06621
전화: 82-80-004-5090 (고객지원센터)
팩스: 82-2-3452-2451
이메일: korea-inquiry_lsca@agilent.com

 **Agilent**
Trusted Answers