

# 레이저 코팅

코팅에는 매우 많은 종류가 있다. 또한 박막(Thin Film)의 경우, 기상법, 액상법, 졸겔법 또는 도금법 등의 퇴적 방식으로 제작되는 것과 산화, 확산 또는 이온 주입 등의 기판 침입 법으로 형성되는 것 등 매우 다양하다. 레이저용 코팅은 그 중 극히 일부에 지나지 않으며, 시장적으로도 틈새 분야이다. 그러나 레이저가 세상에 출현한 이래 40년의 시간이 지나는 동안 레이저 가공, 레이저 의료, 리소그래피 인쇄, 광 통신, 레이저 계측 등 광범위하게 레이저가 사용되었으며, 레이저용 코팅에 대한 수요가 증가되고 있는 것이 현실이다. 레이저용 코팅은 카메라나 안경으로 대표되는 광학 박막과 동일한 성격이지만, 레이저라는 일반적으로 에너지가 강한 광선에 사용되기 때문에, 레이저 손상을 고려하여 제작해야 한다.

편집자 주

## 1. 레이저용 코팅 시장

레이저 시장은 이화학(理化學)용을 제외하면, 대략 자외(스테퍼, 의학), 가시(미세 가공, 레이저 계측), 근적외(레이저 가공, 광 통신), 원적외(레이저 가공)로 분류된다.

절단 등으로 절대적 우위를 자랑하던 CO<sub>2</sub> 레이저(10.6 $\mu$ m)를 대신하여 YAG 레이저(1.06 $\mu$ m)가 진출했다. 파이버로 레이저 도광(導光)할 수 있는 YAG 레이저는 생산 플로우 문제에서 CO<sub>2</sub>보다 자유도가 있다. 또한 미세 가공에서 보면 YAG 레이저의 SHG(532nm), THG(355nm) 및 FHG(266nm)의 용도가 확대됨을 알 수 있다. 스테퍼는 KrF 레이저(248nm)에서 ArF 레이저(193nm), F<sub>2</sub> 레이저(157nm)로의 이행에 대한 연구 개발이 빠르게 진행되고 있다. 이러한 레이저의 변화에 대응하여 코팅 기술도 개발되어 왔으며, 수동적인 면이 매우 강하여 앞으로도 레이저 추세에 따라 변화해 갈 것이다.

## 2. 레이저용 코팅 기술

레이저용 코팅은 일반적으로 물리적 퇴적법 (PVD법)을 사용하여 성막된다. PVD법 중에서도 진공 증착법(저항 가열, 전자빔 증착), 이온 어시스트 증착법(IAD), 이온 빔 스퍼터링법(IBS)이 일반적인 성막 방법이다. 이러한 성막 방법들을 코팅 요구에 맞추어 구사하는데, 최근에는 막 자체의 성질 이외에 샤프함이나 위상을 제어하기 위한 "고정밀도의 막 두께 제어 정밀도", 대구경 기판이나 곡률이 큰 렌즈에 의례적으로 발생하는 "막 두께 불균일", 측정이 매우 어려운 "미세 결정의 정품 성능" 등의 요구가 강해져, 성막 방법을 선택함과 동시에 제어 및 측정 기술 향상이 요구된다. 이하에 성막 공정에 대해 몇 가지 특징을 기술함과 동시에 공정 개요도를 도시하기로 한다.

### 1) 진공 증착법(저항 가열)

저항 가열법은 보트라고 불리는 금속으로 성형된 용기 내에 증착 물질을 넣고 용해 또는 승화시켜 증발시키는 가장 간단한 방법이다(그림 1). 반사 방지용 코팅 물질의 대표인 불화 마그네슘( $MgF_2$ )은 이 방법으로 성막되는 경우가 많으며, 다양한 성막 방법이 개발된 현재로서도 저항 가열법이 증착의 기본이라고 할 수 있을 것이다. 그러나 저항 가열 방법에는 두 가지 문제점이 있는데, 하나는 용점 문제로 인해 증착 물질이 한정되는 것이고, 다른 하나는 증착 물질의 양에 대한 제약이 다른 증착 방법보다도 많다는 것이다. 이 두가지 문제점을 해결할 수 있는 증착 물질을 코팅하는 경우에는 저항 가열법을 사용해야 한다. 즉, 막 두께(막 층의 개수에도 기인함)가 얇고 용점이 낮은 불화물을 사용한 자외 레이저용의 반사 방지막에는 최적의 증착 방법이라고 할 수 있다.

최근,  $F_2$  레이저용 코팅(157nm)에서 가장 손실이 적은 코팅은 저항 가열에 의해 성막된 불화물이라고 보고된 바 있다.

### 2) 진공 증착법(전자 빔)

냉각(수냉)된 도가니에 증착 물질을 넣고, 전자 빔으로 용해 또는 승화시키는 방법이다(그림 2). 레이저용 미러의 대부분은 이 방법으로 성막되는 경우가 많다. 일반적으로 레이저 미러는  $TiO_2$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $ZrO_2$ ,  $HfO_2$  등의 고굴절률 물질과  $SiO_2$ ,  $MgF_2$  등의 저굴절률 물질을 중첩시킴으로써 형성된다. 여기서 예로 든 증착 물질 중에서  $MgF_2$ 는 저항 가열로 증착할 수 있으나, 그 이외의 것은 용점 문제 때문에 전자 빔에 의해서만 증착할 수 있다. 즉, 레이저용 코팅 막으로 사용되는 증착 물질인 산화물은 전자 빔 방법을 사용해야만 한다.

### 3) 이온 어시스트 증착법

이온 어시스트 증착법은 저항 가열이나 전자 빔으로 성막하는 과정에서 이온을 동시에 조사해 줌으로써 보다 치밀한 막 형성을 목적으로 사용되는 경우가 많다(그림 3). 일반적인 진공 증착법으로 얻어지는 코팅막은 다공성(porous)이기 때문에, 공기 중에서 수분을 흡착하여 경시 변화를 일으키기 쉽다. 또한 레이저 시스템에서는 막 및

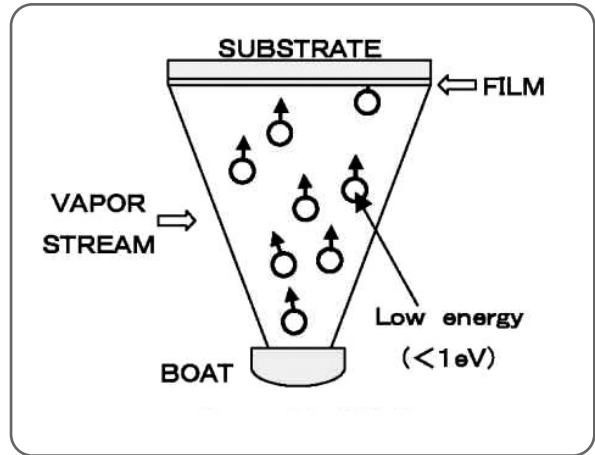


그림 1. 저항 가열법 개요도

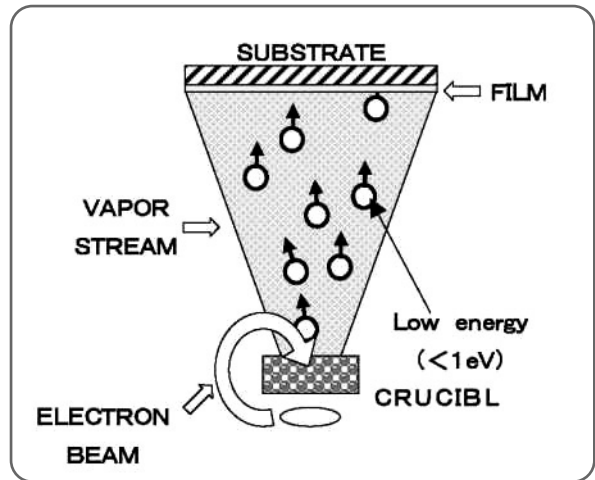


그림 2. 전자빔 방법 개요도

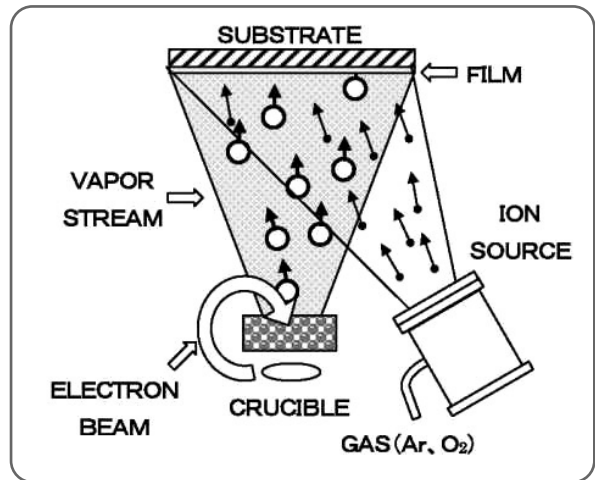


그림 3. 이온 어시스트 증착 방법 개요도

옵토 메카트로닉스 가공 기술 로드맵

막 표면의 부착물 흡수나 본체로부터 나오는 열에 의해 옵틱스의 온도가 상승된다. 이는 상기한 바와는 반대로 수분 발산이 일어나 특성 변화를 일으키게 된다.

이온 어시스트 증착법은 아르곤 이온이나 산소 이온을 때림으로써 막을 치밀하게 하여, 외부 환경 변화에 대해 안정된 막을 얻을 수 있는 반면, 막의 흡수 증가에 의한 레이저 내력(耐力)의 저하를 일으킨다. 레이저용 코팅의 제작에 있어서는 이러한 것들을 충분하게 고려한 후, 이온 어시스트의 조건을 최적화 하는 것이 필요하다.

4) 이온 빔 스퍼터링법

지금까지 설명한 성막 방법이 증착 물질을 용해하여 증발시키는 것에 반해, 이온 빔 스퍼터링법은 목표물에 이온 빔을 조사하여 증발시키는 방식이다(그림 4). 이 방법으로 얻어지는 막은 가장 치밀하면서도 비정질이므로, 산란에 의한 손실을 줄이기 위해서는 이 성막 방식을 채용하는 것이 가장 바람직하다.

이온 빔 스퍼터링법은 종래, 성막 레이트가 느리며 비효율적인 효율면에서 레이저 자이로(회전 나침반)용이나 저이득 공진기용 일부 레이저용 코팅에 채용하는 정도였으나, 현재는 개량이 많이 이루어져 전자 빔과 같은 수준의 비율을 얻을 수 있어, 광 통신용이나 일반적인 레이저용 코팅에도 사용되고 있다.

3. 각종 레이저용 코팅

레이저용 코팅 시장은 2000년도에 큰 성장을 이루었다. 이는 광 통신이나 휴대 전화 등의 전자 분야에 사용되는 마이크로 용접이나 레이저 마커용 광학 부품에 대한 수요가 급증한 것에 기인한다. 그러나 옵티컬 버블 붕괴라고도 할 정도로 2001년도에 들어서는 급감하기 시작했으며, 현재는 2000년도의 반

정도에 지나지 않는다.

이러한 정세 속에서 레이저 제조업체는 각자의 특징을 살리기 위하여 개발에 의욕적이면서도 광학 부품 제조업체에 대한 요구는 엄격하다. 가격은 말할 것도 없이 반비례하는 저비용화 방향이다. 동일한 레이저용 코팅이라도 용도에 따라 성막 방법을 바꾸면서 대응하는 것이 필요하다. 이하, 대표적인 레이저용 코팅에 대하여 설명한다.

1) 하이파워 YAG 레이저용 코팅

일반적으로 YAG 레이저 미러는  $TiO_2/SiO_2$ 이나  $ZrO_2/SiO_2$ 로 성막하는 것이 일반적이었으나, 레이저 출력에 향상됨에 따라  $TiO_2$ 막은 펄스 레이저에 견딜 수 없게 되어, 레이저용 코팅 분야에서는 사용되지 않게 되었다. 현재로서는 하이파워용 코팅은  $ZrO_2/SiO_2$ ,  $HfO_2/SiO_2$ 가 주류를 이루며, 파장 변환된 THG-YAG 레이저용 (355nm)이나 FHG-YAG 레이저용 (266nm)에서는  $HfO_2/SiO_2$ 을 채용하는 경우가 많다. 이들의 코팅에는 전자빔 증착법이 가장 많이 사용되고 있으나, 앞 절에서 설명한 바와 같이 막으로의 수분 흡착 및 발산에 의한 레이저 성능에 미치는 영향으로 인해, 고성능화(레이저 출력의 안정성이나 모니터링)가 요구되는 레이저에는 이온 어시스트 증착법을 사용한 코팅 사용이 증가하고 있다.

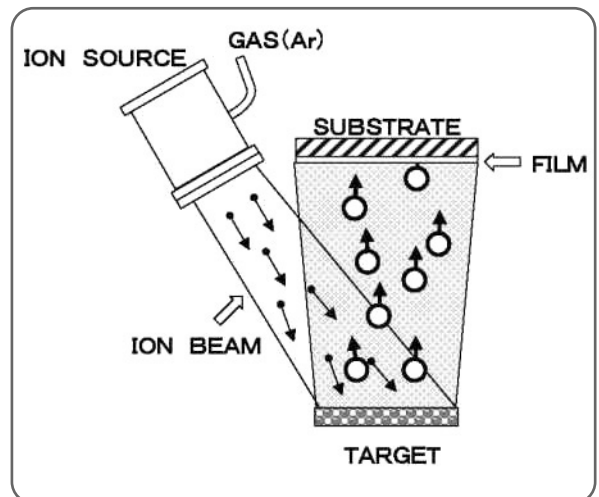


그림 4. 이온 빔 스퍼터링법 개요도

## 2) 저이득 YAG 레이저용 코팅

상기 하이파워 YAG 레이저용 코팅에서는 주로 레이저 손상의 문제로부터 흡수나 반사 손실이 문제가 됨에 반해, 저이득 YAG 레이저용 코팅에서는 모든 에너지 손실이 레이저 성능에 큰 영향을 끼친다. 이 때문에 흡수 및 반사 이외에 산란 손실이 중요한 요인이 되어, 코팅 공정도 하이파워용과는 많이 달라졌다. 산란은 막에만 기인하는 것이 아니며, 기판 표면의 조도나 클리닝도 중요한 요인이 되는데, 여기서는 막에 대해서만 생각하기로 한다. 진공 증착법으로 얻어진 미러는 손실 100ppm 정도가 한계이다. 이는 진공 증착막의 다결정화(입자 구조)에 의해 발생하는 막 표면의 조도가 산란 손실에 크게 기여하기 때문이며, 이러한 결정 성장은 운동 에너지가 낮은(1eV) 증착 입자가 기판 상에서 냉각되기 때문이다. 따라서, 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 입자 운동 에너지가 높고 (>20eV), 비결정인 막을 얻을 수 있는 이온 빔 스퍼터링법이 가장 최적의 성막 공정이라 생각할 수 있다. 이온 빔 스퍼터링에서는 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>을 목표물로 사용하여 미러 제작하는 경우가 많으며, TiO<sub>2</sub>막도 굴절률의 높이 때문에 중요한 물질이 된다.

〈그림 5〉에 레이저 미러의 AFM 사진을 게재하였으며, 이 분야에서의 코팅 공정은 이온 빔 스퍼터링법이 주류를 이룰 것으로 예상된다. 최근에는 광 통신 분야 등에서 이온 어시스트법으로도 손실이 적은 코팅이 얻어지고 있지만, 레이저 미러에 대해서는 이온 빔 스퍼터링법이 우위일

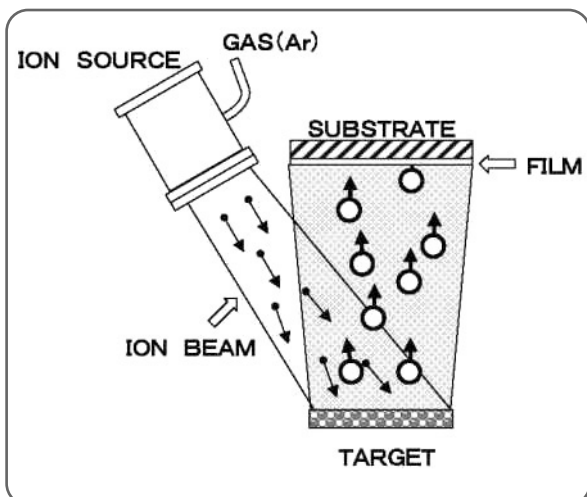


그림 5. Surface roughness of visible laser mirrors by EB and IBS process

것이다.

## 3) 엑시머 레이저용 코팅

엑시머 레이저는 리소그래피 인쇄, 의료, TFT 어닐링 시스템이나 프린터 노즐 구멍 천공 등에 사용되고 있으며 순조롭게 이어져 온 분야이다. 리소그래피 인쇄는 현재 KrF 레이저가 주류를 이루고 있으며, ArF 레이저 또한 F<sub>2</sub> 레이저로의 개발이 진행되고 있다. 의료 분야는 안과 치료에 ArF 레이저가 사용되고 있으며, TFT 어닐링은 XeCl 레이저의 수요가 늘고 있다.

어느 쪽이든 이 분야는 자외광이며, 코팅도 특수하다. 첫째, 자외선이기 때문에 성막 공정 이전에 막 물질이 한정된다. XeCl 레이저, KrF 레이저용 코팅의 막 물질로는 산화물에서는 SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 정도이며, 또한 ArF 레이저에서는 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 압축된다. 이 산화물도 흡수 문제 때문에 F<sub>2</sub> 레이저용에는 사용할 수 없으므로 반드시 불화물이 요구되며, MgF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, LaF<sub>3</sub>, GdF<sub>3</sub> 등의 코팅 공정의 최적화가 필요하게 된다.

현재 이들 레이저용 코팅의 대부분은 진공 증착법(저항 가열, 전자 빔)으로 성막되고 있으나, 최근에는 이온 빔 스퍼터링법을 이용한 F<sub>2</sub> 레이저용 불화물 코팅에 대한 연구도 개발되었다. 불화물 코팅의 경우, 이온을 사용하면 흡수량이 증가하는 문제점이 있으나, 막 자체의 치밀함이나 막의 표면 조도는 진공 증착법에 비해 훨씬 뛰어나며, 이 문제가 해결되면 이온 빔 스퍼터링법이 엑시머 레이저용 코팅의 주역이 될 가능성을 안고 있다.

## 4. 레이저용 코팅 로드맵

앞 절에서도 설명한 바와 같이 레이저용 코팅은 레이저의 추세에 좌우되는 수동적인 산업이므로, 레이저의 로드맵을 예상하여 그에 대한 코팅 요구를 생각해 보았다. 대략적으로 분류한 분야별 로드맵을 〈그림 6〉, 〈그림 7〉에 나타내었다.

### 1) 레이저 가공

레이저 가공의 대표적인 용도에는 용접 및 절단이 있다. 그러나 아직도 저항 용접에 뒤떨어지며, 초기 비용 및 가

옵토 메카트로닉스 가공 기술 로드맵

공 속도 등의 문제가 해결됨에 따라 자동차, 조선, 항공기, 건축 등의 산업 분야에서의 보급이 확대될 것임에 틀림 없다. 레이저 용접 및 절단은 CO<sub>2</sub> 레이저에서 파이버 전송이 가능한 고출력 YAG 레이저로 전환되고 있으며, 또한 가공 속도나 소형화 면에서 하이브리드(다파장)나 LD 다이렉

트가 확산될 것으로 예상된다. 기계화가 진행되는 과정에서 “소형화”는 필수 불가결한 과제이며, 에너지 밀도가 높아지면 코팅의 레이저 내성에 대한 요구가 강해지는 것은 당연하며, 하이브리드나 LD 다이렉트에 대해서는 파장의 합성 및 분배라는 코팅 정밀도가 요구된다.

PC, 휴대 전화, 광 통신 등의 용접 및 수리 등은 미세한 가공 정밀도가 요구되며, 레이저 품질이 요구된다. 레이저

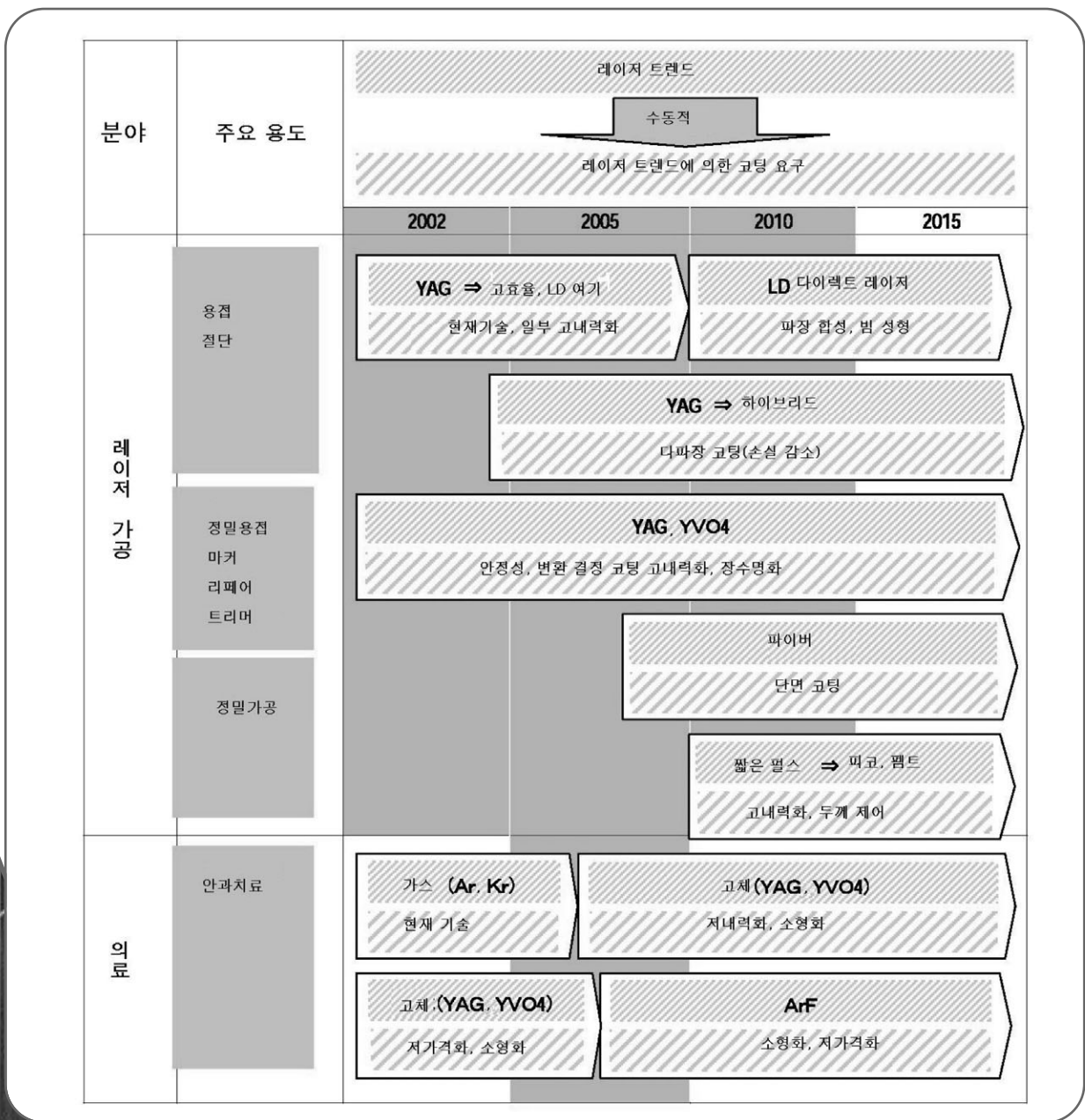


그림 6. 로드맵 1(레이저 가공, 의료)

출력 안정성이나 빔 품질 등은 코팅질에 크게 좌우되기 때문에, 레이저 내성 및 안정성이란 두 가지 면을 모두 갖는 광학 부품이 필요하다. 또한 가공물이나 정밀도에 의해 단파장화(IR⇒VISIBLE⇒UV)되는 경향도 강하며, 파장 변환 기술도 중요하다. 파장 변환을 위해서는 변환 결정이 필요하며, 일반적인 유리 코팅에 비해 레이저 내성 면에서 뒤떨어지는 변환 결정 코팅 기술을 향상시키는 것이 하나의 과제이다. 또한 가공물에 미치는 영향으로부터 단펄스 레이저 개발도 활발하게 이루어져, 레이저 내성이나 위상 제어를 바라는 코팅 요구가 높아지고 있다.

### 2) 의료

의료 분야에 대한 레이저의 응용은 해마다 증가하고 있다. 근시안 치료(ArF)나 응고제(coagulator)(Ar, YAG-SHG) 등 많이 보급되고 있으나, 의료비 면에서 일본에서의 수요는 서서히 증가하고 있다. 또, 치과 치료나 미용 등의 시장에서는 향후 크게 기대되는 분야로서, 보험 의료의 동향에 따라서는 급격한 증가도 있을 수 있다. 기술적으로는 포터블이나 저렴한 가격이라는 사용상의 용이함, 도입상의 용이함이 관건이며, 여기에 적당한 형태로 코팅 기술도 변화해 갈 것이다.

### 3) 반도체

스테퍼는 라인 폭의 변화에 따라 단파장화의 개발이 활발히 진행되고 있다. 레이저 전체로 보더라도 변화가 가장 크며 약 5년 단위로 바뀌어 갈 것이다. 이러한 변화에 따

라 코팅 기술의 난이도도 높아지고 있으며, 막의 저손실화, 장수명화가 과제이다. ArF 레이저 이후의 F<sub>2</sub> 레이저는 막 물질의 성질 때문에 사용 가능 범위의 제약이 많아 어떻게 극복할 것인가가 관건인데, 현재의 제조 방법과는 전혀 다른 방법도 나올 것으로 생각된다.

스테퍼 광원이 단파장화됨에 따라 계측용 시스템도 단파장화되고 있으며, 이 용도에 사용되는 레이저는 엑시머 레이저가 아닌 고품질의 고체 레이저이다. 이러한 경우의 코팅 요구에는 일반적인 유리 이외에 파장 변환 결정이 있고, UV화 이외에 다파장화라는 어려움도 표면화되기 시작한다.

실리콘의 어닐링은 XeCl 레이저에서 가공 속도가 빠른 YAG-SHG로 개발이 진행되고 있으나, 레이저 출력 등의 문제로 인해 XeCl 레이저가 주류를 이룰 것으로 예상되며, YAG-SHG의 출력이 상승되면서 빔 성형 기술이 향상되면 YAG-SHG로 변화해 갈 것이다. 이 경우에도 계측과 다름없는 파장 변환 결정에 대한 코팅이 중요해질 것이다.

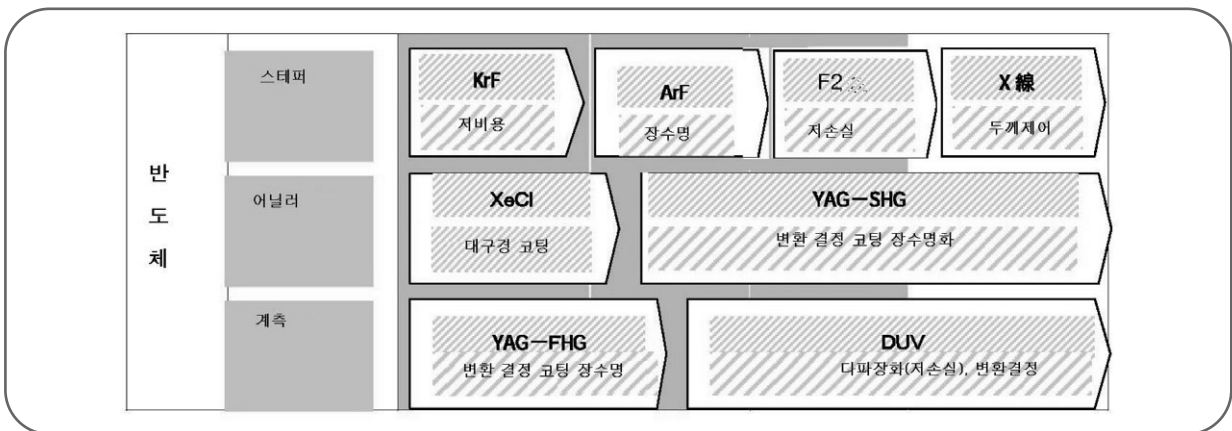


그림 7. 로드맵 2(반도체)