

레이저에 의한 재료가공

金 道 薰
(延世大 工大 副教授)

■ 차 례 ■

- | | |
|-------------------------|-------------------|
| 1. 개 요 | 6. 재료의 절단 |
| 2. 고에너지 레이저와 재료사이의 상호작용 | 7. 재료의 천공 |
| 3. 재료가공에 사용되는 레이저와 관련장비 | 8. 재료의 미소가공 |
| 4. 금속재료의 표면경화와 표면가공 | 9. 레이저에 의한 반도체아닐링 |
| 5. 금속재료의 용접 | 참고문헌 |

□ 개 요

Laser 는 1960년 초에 그 이론과 실용적인 장치가 개발된 이래 그 연구와 개발은 매우 급속하게 발전하였으며, 현재 광범위한 분야에 걸쳐서 공업적으로 이용되고 있다. 레이저의 공업적인 이용을 크게 나누면 레이저의 물리적 성질을 직접 이용하는 방법과 레이저에 의한 열을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다.

레이저에 의한 재료가공이란 후자에 속하는 것으로 레이저를 熱源으로 사용하여 재료의 물리적, 화학적 또는 내부조직의 변화를 주는 방법이다. 따라서 레이저에 의한 여러가지 재료가공은 재료에서 레이저빔을 흡수하여 얻게되는 열원의 특성에 직접 관련됨으로 여러가지 레이저의 성질과 가공시키려는 재료의 성질에 크게 좌우된다.

레이저빔은 레이저의 중요한 성질인 collimation 과 coherence 로 인하여 국부적인 구역에 매우 큰 에너지밀도를 주도록 렌즈로 집중시킬 수 있다. 따라서 가공하려는 부분에만 큰 에너지를 유지시킬 수 있어 많은 부분을 균일하게 가열시켜야 하는 통상적인 방법보다 가공이 빠르고 독특한 조직을 얻게 된다. 또한 부품의 내부에 열로 인하여 야기되는 응력,

뒤틀림 및 균열등을 없이 할 수 있어 부품의 손상을 최소한으로 할 수 있고 복잡한 부품의 가공도 가능하다. 레이저빔은 질량이 없는 전자파임으로 부품에 오염을 주지 않고 기계적인 작용을 주지 않아 작업 도중 부품에 진동을 주지 않는다. 그리고 레이저는 투명한 물체를 통과하여 전달됨으로 진공관 내부등 밀폐되어 있거나 전기 및 자장에 의하여 접근이 곤란한 지역도 멀리서 작업을 할 수 있다. 또한 레이저는 빠른 가공속도를 주는 외에 전자적으로 자동조절이 가능하여 생산성을 높힐 수 있다.

레이저에 의한 재료가공은 위에 기술된 여러가지 장점이 있으나, 비용이 많이 소요되어 통상적인 가공방법을 대신하기 위하여는 경제적인 면을 고려해야 한다. 그러나 전기, 전자공업 및 정밀제품 생산에서 통상적인 가공방법으로 품질등에 문제를 주는 정밀부품과 특수재료의 가공등에서는 레이저로 대처하여 사용하는 것이 바람직 하다.

현재 국제적인 추세로 볼때 종래의 방법을 레이저 가공으로 대체하여 나가는 작업장이 급속도로 확대되고 있으며, 또한 레이저에 의한 새로운 가공기술의 개발도 활발하다. 그리고 이러한 가공기술에서 레이저와 로봇트를 연계시켜 사용함은 물론 더욱 나아가 레이저-로봇트-컴퓨터로 연계된 새로운 재료가공 기술의 연구가 활발히 진행되고 있다. 여기서는

레이저와 재료사이의 상호작용을 간단히 검토하여 본 후 실제적인 재료가공의 몇가지를 분류하여 생각하여 보고져 한다.

② 고에너지 레이저와 재료사이의 상호작용

레이저에 의한 재료가공의 기본은 고에너지 레이저빔과 재료사이의 상호작용이다. 레이저빔이 재료에 조사되면 투과, 반사 및 흡수의 세부분으로 나뉘어진다. 그러나 재료가 금속인 경우에는 레이저빔이 투과하지 못함으로 반사되어 나가는 부분을 제외하고는 금속에 흡수된다.

레이저빔이 재료내에 흡수되어 표면하 깊이 x 에서 빔의 강도는 다음과 같다.

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$$

여기서 I_0 는 표면에서 흡수되는 레이저강도이고, α 는 금속의 흡수계수로서 $\alpha = 4\pi k / \lambda$ 로 주어진다. 따라서 레이저빔의 흡수는 조사되는 레이저의 파장에 따라 차이가 있으나, 대부분의 레이저 에너지는 금속표면에서 수백 Å 이내에서 흡수된다. 이때 흡수층의 두께를 skin depth 라고 하며, 그 크기는 대체로 다음과 같다.

$$d \cong \frac{\lambda}{2\pi k} \cong \text{수백 } \text{Å}$$

여기서 λ 는 조사되는 레이저빔의 파장이고, k 는 금속의 index of absorption이다.

금속에 대하여 흡수되는 부분을 emissivity 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = 1 - R_0$$

여기서 R_0 는 수직으로 입사될때 레이저의 반사도이다. 이 흡수된 레이저빔은 lattice phonon 과 전자와의 충돌에 의하여 $\sim 10^{-13}$ 초 내에 열로 바뀌므로 매우 급속하게 금속의 표면온도를 증가시킨다. 따라서 금속의 반사도는 레이저에 의한 재료가공에서 에너지 효율에 중요하다.

ϵ 와 R_0 는 광학상수 또는 complex refractive index (m)의 측정으로 부터 얻을 수 있다.

$$m = n - ik$$

수직된 방향으로 레이저가 입사되면 금속표면의 반사도와 emissivity는 다음과 같다.

$$R_0 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$$

$$\epsilon = \frac{4n}{(n+1)^2 + k^2}$$

보통 금속에 대하여 n 과 k 는 파장과 온도의 함수이다. λ 의 함수로서 $0.4 < \lambda < 1.0 \mu\text{m}$ 에서는 n 과 k 는 λ 에 따라 비교적 느리게 변하며 ϵ 는 크다. 반면에 파장이 길면 n 과 k 는 λ 에 따라 크게 변하며 ϵ 는 적다.

적외선구역에서 $\epsilon \propto (\sigma\lambda)^{-1/2}$ 이며, 여기서 σ 는 금속의 전기전도도이다. 따라서 일정한 레이저파장에 대하여서는 금속의 전기전도도가 저하될 수록 레이저흡수능이 커지게 된다. 즉 온도의 증가에 따라 금속의 전기전도도는 감소함으로 레이저 흡수능이 커지게 된다. Drude 자유전자론을 이용하면 거의 모든 금속은 광학파장에서 자유전자-플라즈마와 같이 행동함으로 광학상수의 온도의존성은 전자충돌 빈도의 온도의존성의 방법으로 이루어진다. 온도가 증가함에 따라 phonon의 밀도가 증가됨으로 자유전자-phonon 충돌빈도가 증가되어 금속의 광학적 성질에 영향을 미치게 된다. 금속에 레이저를 조사시키면 위에 기술한 바와 같이 금속의 온도가 증가되어 전기전도도를 감소시키거나, 또는 phonon의 밀도가 증가되어 자유전자-phonon 충돌빈도의 증가로 반사도가 감소되어 흡수능이 커지게 된다. 파장이 $10.6 \mu\text{m}$ (CO_2 레이저)의 경우에 온도의존성으로 계산된 ϵ 값은 다음과 같다.

$$\epsilon = 11.2 [R(1 + \gamma T)]^{1/2} - 62.9(1 + \gamma T) + 174 [R(1 + \gamma T)]^{3/2}$$

여기서 R 은 상온에서 금속의 저항도이고 γ 는 온도 T °C에 따른 저항도 변화의 계수이다. 금속의 흡수능이 커지면 더욱 많은 레이저가 열로 변환으로 금속의 온도는 시간에 따라 가속적으로 증가하게 된다.

레이저의 파장이 긴 경우에는 금속에서 흡수능이 적어 금속표면에 조사되는 레이저의 일부만이 금속의 가열에 이용될 수 있게 되는 반면에 파장이 적은 경우에는 흡수능이 커져 유리하게 된다. 예로서 철강재의 경우에 $1.06 \mu\text{m}$ (Nd:YAG 레이저)의 흡수능은 $10.6 \mu\text{m}$ (CO_2 레이저)의 경우보다 수배에 달한다.

레이저가 금속표면층에서 흡수되어 열에너지로 변화되는 깊이는 매우 적어 레이저를 표면열원으로 생각할 수 있다. 이 표면의 열은 열전달에 의하여 금속내부로 전파되어 가열구역을 형성함으로 재료가공에 이용되게 된다. 따라서 이 가열구역의 발달은 레이저의 특성 (레이저출력, 에너지밀도, 조사시간등)과 재료의 물리적성질 (레이저반사능, 열확산도, 용융점, 표면상태등) 및 레이저집속조건과 주사 속도등

에 의하여 재배된다. 레이저의 에너지가 증가됨에 따라 금속표면의 상태는 그림 1과 같이 여러가지 양상으로 변한다.

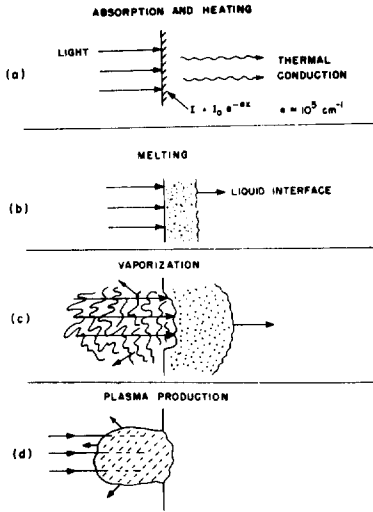


그림 1. 고출력 레이저가 재료표면에 조사될 때 발생하는 여러가지 현상

레이저밀도가 10^5 W/cm^2 이하로서 표면이 가열만 되는 경우에는 그림 (1-a)와 같이 금속내부로 열전달만이 이루어지게 된다. 그러나 금속표면의 레이저밀도가 $\sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 정도가 되면 그림 (1-b)와 같이 용융점에 도달되어 용융계면이 금속내부로 전달된다. 레이저밀도가 증가되어 $10^6 \sim 2.5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 에서는 그림 (1-c)에서 같이 용융계면이 내부로 전달됨과 함께 금속의 표면온도가 비등점 이상으로 되어 증발이 심하게 되며, 조사된 구역에 구멍이 형성되기 시작된다. 레이저 밀도가 더욱 증가되어 $\sim 2.5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 이상이 되면 그림 (1-d)에서 같이 증발등으로 금속에서 떨어져 나가는 물질량이 더욱 많아지고, 또한 레이저 에너지가 이들 증발되는 물질에 흡수되어 원자를 이온화시켜 플라즈마를 형성한다. 고온에서 플라즈마 농도가 증가되면 그 투명도를 감소시켜 레이저에 대하여 불투명하게 되며, 입사되는 레이저를 흡수 혹은 반사시켜 LSA (laser-supported absorption) wave 를 주게 되어 금속표면으로 부터 레이저를 차단시키게 된다. 따라서 이 LSA wave 가 발생되면 레이저 차단효과에 의하여 레이저의 효율을 떨어뜨린다.

부도체재료에서 전자파의 흡수는 자유전자의 결핍으로 그 파장에 크게 좌우된다. 적외선구역에서 레이저흡수는 결정격자의 진동, 유기물에서는 분자간 진동에 의하여 이루어진다. 이들 구역에서 흡수계수 α 는 보통 $\sim 10^4 / \text{cm}$ 정도이다. 가시광선구역에서는 흡수가 불순물 또는 강한 자외선흡수대의 후부로서 일어난다.

대부분 규산염계통재료들은 가시광선을 통과시키나, 파장이 $10 \mu\text{m}$ 근방에서는 많이 흡수함으로 요업재료와 유기물재료에서는 CO_2 레이저를 사용한다. 그러나 많은 반도체재료에서는 $1 \mu\text{m}$ 이하의 가시광선에는 불투명하나, 적외선에서는 비교적 투명하다. 따라서 반도체재료의 가공에서는 주로 Nd : YAG 레이저 또는 다른 짧은 파장의 레이저를 사용한다.

먼저 기술한 바와 같이 금속에서는 표면근방의 skin depth 에서 레이저를 흡수하나, 대부분의 부도체와 반도체에서는 보통의 skin depth 보다 훨씬 큰 감쇄구역(L)에서 레이저의 흡수가 일어난다. 적외선에서 $L \geq 10^{-4} \text{ cm}$ 임으로 부도체에서는 레이저에 의한 가열이 금속의 표면열원과 달리 체적효과를 고려해야 한다. 이것은 특히 박막의 두께가 L에 근사한 얇은 층의 가열에서는 중요하다.

3 재료가공에 사용되는 레이저와 관련 장비

레이저에 의한 재료가공에 이용되는 기구는 레이저빔에 의한 재료의 가열, 용융 및 증발에 의한다. 따라서 레이저에 의한 재료가공에서는 가공하려는 재료와 가공목적 및 방법에 따라 사용하는 레이저장치와 관련장비가 다르다.

(1). 레이저 장치

레이저의 파장, 출력, 빔의 시간적 및 공간적 모양 등이 가공하려는 재료의 가열에 영향을 미친다. 특히 레이저의 파장은 재료의 흡수능과 집중된 빔의 정확도에 영향을 미치며, 빔의 펄스시간 또는 빔의 조사시간은 재료에서 열의침투깊이에 중요하다. 그리고 가공에 요구되는 시간은 레이저의 출력과 펄스반복속도등에 의존하게 된다.

레이저에너지가 열에너지로 바뀌는 것은 순간적임으로 금속의 상변태가 없다면 t 시간 내에 열이 침투한 깊이는 대체로 다음과 같다.

$$x \cong (4kt)^{1/2}$$

여기서 k 는 금속의 열확산도 이다. 따라서 레이저 빔의 펄스시간이 짧으면 금속내부로 열전달 되는 거리가 적어 표면근방의 국부적인 부분은 고온으로 되고, 반대로 지속파와 같이 펄스시간이 길면 많은 열전달이 발생하게 된다. 그럼으로 전체의 에너지가 같은 경우에는 짧은 펄스의 높은 강도를 가진 레이저 (예, Q-switched laser)는 펄스시간이 길고 강도가 낮은 레이저보다 훨씬 높은 표면온도를 얻게 된다. 이에 반하여 낮은 강도의 지속파레이저는 더욱 균일한 온도분포와 금속내부로 깊은 열의 침투가 있게 된다. 따라서 효과적인 금속의 가열을 위하여서는 주어진 깊이에 열이 침투하는데 요하는 펄스시간으로 나타내는 열시간상수 (thermal time const-

ant)를 알아야 한다. 즉 두께가 얇은 금속 (≤ 0.1 mm)에 대하여서는 열시간 상수가 보통펄스의 레이저 (msec duration)보다 짧다. 그러나 두꺼운 금속 (> 1 mm)에서는 열확산도가 큰 금속에 대하여서도 열시간상수가 보통의 펄스레이저의 펄스시간보다 길다. 따라서 1 mm 이상의 금속에서는 펄스레이저로서 가공은 힘들게 된다. 반면에 지속파레이저를 금속표면에 조사시키면 열이 너무 많은 구역으로 확산하게 됨으로 국부적인 구역에 대한 집중적인 가열에 대한 효율은 떨어지게 된다.

현재 많은 종류의 레이저가 실용적으로 사용되고 있으나, 재료가공에 사용되는 고출력의 레이저는 대체로 표 1 과 같다.

표 1. 재료가공에 사용되는 레이저

Laser	Wave-length (μ m)	Operation mode	Pulse energy (J)		Pulse duration (sec)	Pulse rep. rate (pps)	Typical beam divergence (mrad)	Typical use	Remarks
			Typical	High					
Ruby	0.6943	Normal	5	120	5×10^{-4}	1/30	5	spot welding hole drilling	multipulse 사용에 비경제적
		Q-switched	1	15	1.5×10^{-9}	1/30	5	반도체 이닐링	"
Nd: Glass	1.06	Normal	10	300	10^{-3}	1/30	5	spot welding hole drilling	"
		Q-switched	2	50	2×10^{-8}	1/30	5	반도체 이닐링	"
Nd: YAG	1.06	continuous	10^W	1000^W	CW	-	5	금속의 표면경화, 용접 절단,	compact, low power에서 경제적
		Normal	1	100	10^{-3}	100	5	spot welding, marking hole drilling, trimming	compact, 경제적
		Q-switched	0.1	1	1.5×10^{-8}	upto 5×10^4	5	반도체 이닐링	"
CO ₂	10.6	continuous	300^W	6000^W	CW	-	2	금속의 표면경화, 재료의 절단, 용접	high power인 경우 장비가 커짐, 매우 경제적임.
		TEA	2	400	2×10^{-7}	upto 300	5	hole drilling, marking	장비가 크나 경제적임.
		High-voltage pulsed	0.75	0.75	5×10^{-4}	200	4	용접, 천공, scribing	"

(여기에 나타난 수치들은 대표적으로 사용되는 것으로 최고치를 나타내지 않음.)

여기서 보는 바와 같이 펄스형의 Ruby 레이저는 스폿트용접과 천공과 같이 큰 에너지의 펄스가 요망되는 곳에 사용되나 펄스반복속도가 너무 낮아 단점이 있다. 반면에 Nd : YAG 레이저와 CO₂ 레이저는 여러가지 형태로 동작이 가능하므로 다각적으로 사용할 수 있어 융통성이 크다. 따라서 대부분의 재료 가공에 사용되는 레이저장치는 Nd:YAG 레이저와 CO₂ 레이저에 근거한다.

매우 적은 부품의 정밀가공과 반도체재료의 가공에서는 레이저의 집속문제와 흡수능문제 등으로 Nd : YAG 레이저가 적당하다. 그러나 고출력에서는 사용되는 Kr 램프의 수명이 비교적 적어 수백 W수준에서는 동작비용이 비교적 크다. 반면에 수십 W수준에서는 지속파의 Nd : YAG 레이저가 많이 사용된다. Nd:YAG 레이저에서 반복되게 Q-switching 시키면 펄스시간이 ~백 nsec 정도이고, 펄스 반복속도가 매초당 수천회가 되며, 그 peak 출력은 수만 W가 된다. 따라서 이러한 형태로 작동하면 Nd:YAG 레이저는 바람직하다.

보통 큰 금속 및 비금속재료의 가공에서는 지속파의 CO₂ 레이저가 광범위하게 사용된다. 이 CO₂ 레이저는, 다른 레이저들이 입력되는 에너지에 비하여 발생되는 레이저가 1%이하의 효율인데 반하여 10% 이상의 효율을 가짐으로 경제적이다. 그리고 CO₂ 레이저의 펄스형 동작이 개발되어 큰 출력의 펄스를 매초당 수백회 반복할 수 있다. 이 반복펄스 형태의 작동은 금속에서 레이저 반사도가 크에도 단일펄스로서 금속표면에 높은 peak 출력을 준다. 일단 표면의 온도가 증가되면 레이저에너지의 흡수가 더욱 효과적이 됨으로 같은 평균출력의 cw CO₂ 레이

저 보다 더욱 효율적이다. 현재 상업적으로 많이 사용되는 cw CO₂ 레이저는 수백 W ~ 수 KW 이나, 10 KW 이상의 것도 있다.

레이저에 의한 재료가공시 여러가지가공방법에 따른 레이저의 에너지밀도와 조사시간의 범위는 대체로 그림 2와 같다.

(2). 광학부품과 기타장비

레이저가 재료가공에 이용되기 위하여는 레이저 이외에 여러가지 부속장치가 함께 적당히 조합되어 사용되어야 한다. 그림 3은 레이저에 의한 재료가공의 전반적인 시스템을 나타낸다. 이들 장치들은 서로 유기적으로 연결되어 있으며, 가공방법과 제품에 따라 차이가 있게 된다.

레이저빔은 보통 집속시켜야 함으로 렌즈등 광학부품의 적당한 선정이 요한다. Ruby 또는 Na:YAG 레이저의 경우에는 일반적인 광학부품을 사용할 수 있다. 그러나 광학유리는 파장이 2.7 μm 이상, quartz는 4.5 μm인 경우에는 투과시키지 못한다. 따라서 CO₂레이저를 위하여서는 Ge, CdTe, ZnSe 등의 부품이 사용된다.

레이저에 의한 재료가공에서 한가지 중요한 고려사항은 작업부품과 렌즈사이의 거리이며, 그 허용되는 거리는 가공작업과 레이저에너지에 의하여 큰 영향을 받는다. 얇은 박막의 가공작업에서는 수 W의 출력으로 수mm가 적당하나, CO₂레이저로 큰 부품에 대한 작업은 최소한 5cm 이상이 요망된다. 즉 작업부품과 렌즈 사이의 거리가 너무 적으면 용융 또는 증발되어 나오는 입자들이 렌즈를 손상시키게 됨으로 렌즈를 보호하여 주는 구조가 바람직 하다.

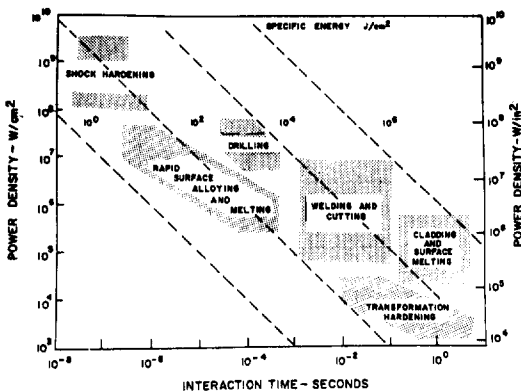
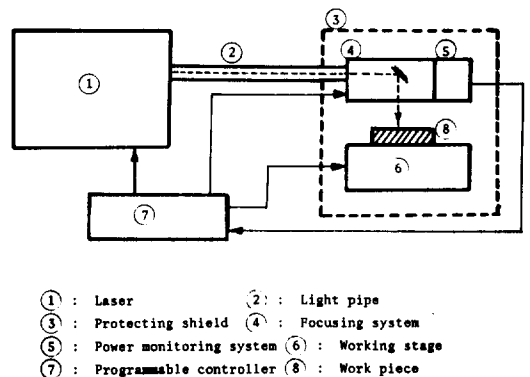


그림 2. 레이저와 재료사이의 상호작용에 의한 개략적인 가공범위



- ① : Laser
- ② : Light pipe
- ③ : Protecting shield
- ④ : Focusing system
- ⑤ : Power monitoring system
- ⑥ : Working stage
- ⑦ : Programmable controller
- ⑧ : Work piece

그림 3. 레이저에 의한 재료가공에 사용되는 자동화기구

레이저빔은 보통 TEM₀₀mode로서 간단하나 에너지분포가 Gaussian 형임으로 조사되는 부분에 일정한 에너지를 공급하지 못한다. 따라서 천공과 같은 경우를 제외하고는 용통성을 주기 위하여 레이저빔을 1차원 또는 2차원적으로 다양한 조사분포를 얻게 한다.

④ 금속재료의 표면경화와 표면가공

(1). 상변태에 의한 표면경화

레이저에 의한 재료가공에서 가장 적은 에너지가 요구되는 범주에 속한다. 이 방법의 기본은 금속표면 부근의 온도를 변태점 이상 용융점 이하로 가열 후 급냉에 의하여 금속의 상변태를 유발시켜 경화시키는 방법이다.

레이저를 금속에 조사시키면 표면근방의 온도가 급격히 상승되며, 레이저를 차단시키면 얇은 표면층에 축적된 열은 곧 내부로 전달되어 가열된 구역이 급속도로 냉각된다. 이러한 자체적인 쿨칭(self-quenching)이 점상적인 상변태를 억제하여 금속의 내부에는 변화가 없이 표면층의 경도를 증가시키게 된다. 레이저로 조사된 구역의 표면온도는 \sqrt{t} 에 비례하고, 금속내로 열이 침투하여 들어가는 거리도 \sqrt{t} 에 비례한다. 따라서 표면온도와 침투깊이는 금속의 표면상태 및 흡수피막과 함께 레이저빔의 밀도와 주사속도를 조절하여 적당히 얻을 수 있다. 이 방법이 적용될 수 있는 재료는 열처리 가능한 금속재료로서 선택적인 내마모성이 요구되는 부품에 광범위하게 사용되고 있으며 보통 CO₂ 레이저를 사용한다.

실제로 공업적으로 사용되는 표면경화법에는 화염경화법과 고주파유도경화법등이 있으나 다음과 같은 경우에 레이저에 의한 방법이 바람직하다. 즉 표면이 불규칙하고 뒤틀림을 극소화시켜야 하는 경우, 평평한 표면을 경화시키고 지속적인 평평함을 유지해야 하는 경우, 정확한 모양의 부분적인 경화가 요망되는 경우, 경화될 구역으로 열을 제한하도록 하는 것이 힘들어 과도한 변형을 주는 경우, 쿨칭구역이 발생되고 경화구역이 전체에 비하여 적은 경우등에 바람직하다. 따라서 부품의 모서리, 각이진 구석, 움푹들어간 구역, 치차의 불규칙한 부분의 표면경화에 이용된다. 자동차공업에서론 내마모성이 요구되는 엔진시린더 내부 및 구멍, 발브가이드, 캠샤프트, 기아, 샤프트 저널, 발브시트, 스티어링 기아하우징 등의 표면경화에 이용된다. 그림 4는 실제 이용의 한 예로서 회주철계 발브가이드의 내부벽면의 내마

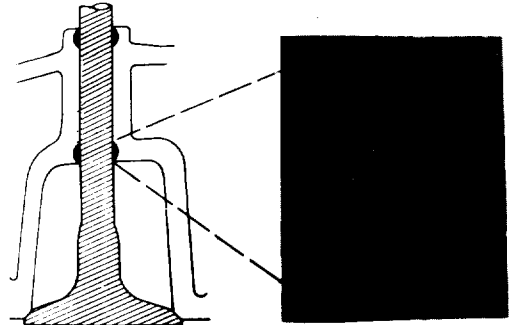


그림 4. 레이저에 의한 상변태로 경화된 발브가이드 내부면, 우측사진은 말텐사이트로 변태된 구역을 보여주고 있다.

모성을 위한 경화모형을 보여주고 있다. 400 WCO₂ 레이저빔을 1.5 mm의 폭으로 집속시켜 표면이 용융되지 않는 정도에서 요망되는 경화층의 깊이를 주도록 한다. 여기서 경화된 두개의 환상구역은 반사체로 사용되는 Cu 거울을 45°경사시켜 레이저를 가이드표면으로 조사시킨다. 이때 얻어진 경화층의 깊이는 0.25 mm로서 레이저빔의 주사속도는 4.2mm/sec이다. 옆의 현미경사진은 경화된 구역으로서 표면의 평평함에 변함이 없음을 보여주고 있다. 경화된 구역은 급속한 냉각속도에 의하여 편상흑연을 함유한 미세한 마르텐사이트 조직이다. 이렇게 함으로써 발브와 가이드사이에 내마모성을 매우 향상시킨다.

(2). 표면합금화에 의한 표면경화

이 방법은 내마모성, 내식성 혹은 내열성등 필요한 조직을 얻기 위하여 금속표면에 요망되는 합금층을 형성시키는 것이다. 따라서 금속표면이 용융되는 정도까지 가열되어야 함으로 상변태에 의한 표면경화의 경우보다 레이저에너지가 커야 한다.

현재 표면의 조성을 변화시켜 요망되는 성질을 얻는 방법으로는 철강표면에 탄화처리, 질화처리, 크롬처리, 알루미늄처리 등이 있다. 이들은 탄소, 질소, 크롬등 합금원소의 확산에 의함으로 비교적 장시간 가열이 요망된다. 그리고 전부품의 가열 및 냉각으로 표면확산과 함께 전반적인 뒤틀림을 주게 된다. 그러나 레이저에 의한 경우에는 부품내부에 온도를 가하지 않고 표면을 용융점까지 도달시키게 할 수 있다. 이 경우 금속분말 또는 피복된 얇은 층의 형태로 표면에 첨가된 합금원소는 용융된 상태에서 거의 순간적으로 확산하여 들어가 표면층의 합금화가 이루어

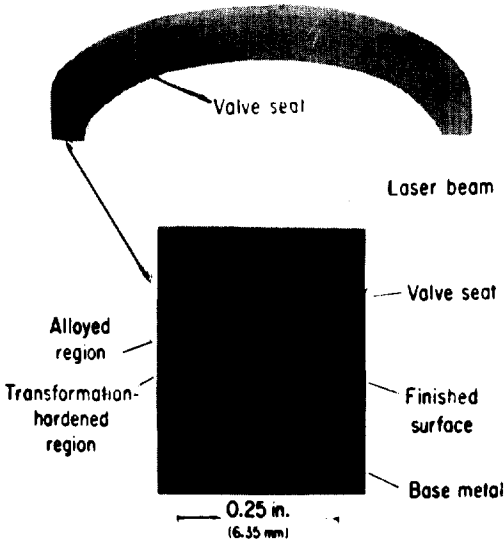


그림 5. 레이저로 표면합금시킨 밸브시트, 밀의 사진은 조직사진을 보여준다.

지며, 다음과 같은 경우에 적당하다. 즉 주조 또는 가공상태에서 요망되는 합금이 얻어질 수 없고 이를 다른 금속으로 대체하기 힘든 경우, 전체적인 부품이 가열로에 적합하지 못한 경우, 가열로에서 확산에 의한 표면층 합금시 전체적인 부품에 나쁜 영향을 주는 경우, 복잡한 형상으로 부분적인 열처리 및 가공이 힘든 경우 등에 적당하다.

이 방법의 응용예로서 그림 5는 상변태에 의하여 경화된 회주철의 밸브시트이다. 이 조직은 230 °C에서 템퍼링됨으로 540 °C에서의 동작에서는 상변태에 의한 표면경화 만으로는 수명이 길지 못하다. 이를 극복하기 위하여는 고가의 특수강으로 부품을 만들 수도 있으나, 다른 방법이 주철체시트의 가장자리에 선택적으로 표면합금을 시키는 방법이다. 연마작업을 극소화 하기 위하여 기계가공후 6.5kW CO₂ 레이저로 15 초간 가공후 표면상태의 정확도는 0.13 mm 정도이다. 이것을 가공한 경우 경도는 Rc 55 이상으로 540 °C에서 2시간 이상 동작후에도 연화가 일어나지 않았다.

기타 표면가공 방법으로는 레이저 조사 후 급냉에 따른 표면조직의 비정질화 방법등이 있다. 이러한 레이저그레이징에 의한 비정질상태는 유리화온도 이하의 저온에서 사용되며, 내식성이 우수한 성질을 얻게되어 많은 연구가 수행중이다.

	Steel	Aluminum	Gold	Beryllium	Cadmium	Cobalt	Chromium	Copper	Iron	Magnesium	Manganese	Molybdenum	Nickel	Lead	Platinum	Rhenium	Tin	Tantalum	Titanium	Vanadium	Tungsten	Zirconium	
Aluminum	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Gold	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Beryllium	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Cadmium	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Cobalt	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Chromium	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Copper	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Iron	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Magnesium	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Manganese	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Molybdenum	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Nickel	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Lead	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Platinum	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Rhenium	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Tin	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Tantalum	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Titanium	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Vanadium	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Tungsten	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
Zirconium	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽

그림 6. 여러가지 금속의 용접용이도

⑤ 금속재료의 용접

레이저에 의한 용접은 접합하고자 하는 금속들을 용접 이상으로 가열시켜야 함으로 표면경화의 경우보다 큰 에너지가 요망된다. 레이저에 의한 용접은 일반적인 방법에 비하여 용접봉과 용제등이 필요치 않아 부품의 오염이 없고, 다른 종류의 금속들 사이에 용접이 가능하고, 열에 의하여 영향받는 부분이 적어 변형을 방지할 수 있는 등의 여러가지 장점이 있다. 레이저에 의한 용접은 두개의 접합되는 금속의 용융온도가 비슷하고 서로 고용체를 형성할때 쉽게 일어남으로 그림 6과 같이 이종 금속사이의 용접용이도는 레이저 용접에도 적용이 된다. 그러나 레이저에 의한 철강재의 용접에서는 가열 및 냉각속도가 큼으로 고탄소강에서는 균열의 민감성으로 HSLA 강등 저탄소강에 유용하다.

(1). 일반 경용접(conduction welding)

이 방법은 보통 수백 W 정도의 레이저를 사용하여 금속의 표면온도가 비등점 이내로 되도록 한다. 이 방법으로 얻는 용접의 aspect비(용접 깊이/용접폭)는 1.5내외 정도이다. 따라서 이 방법은 판재 및 적은 부품을 사용하는 경우에 많이 이용된다.

실제적인 예로서 소형모터와 변압기의 얇은 규소강판을 뭉침에 종래에는 리벨팅으로 이루어 졌으나, 시간이 많이 소요되며, 재료가 많이 소요되고 부품의 삼입으로 전기적 성질을 변화시킨다. 그러나 레이저를 사용하여 그림 7에 보는 바와 같이 용접하면 부품의 전기적인 특성을 바꾸지 않고 생산속도를 매우

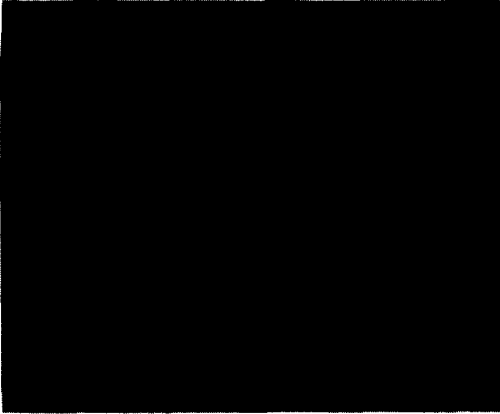


그림 7. 모터의 구조강판들을 조합한 후 레이저로 용접시킨 모양

빨리 할 수 있다.

전자공업에서 전자부품의 스폿용접등에 의한 제품 생산에서 저항용접등이 사용되나 현재는 레이저에 의한 용접이 많이 도입되고 있다. 또한 PCB상에서 IC 회로의 리드등의 연결에 레이저에 의한 납땜등 여러 가지 미소용접이 사용된다. 이러한 미소용접도 이 범주에 속하나 사용되는 레이저에너지는 적다.

(2). 심층침투용접(deep-penetration welding)

이 방법은 고출력레이저에 의하여 keyhole의 형성으로 되는 용접으로서 두꺼운 재료의 용접에 사용한다. 레이저에너지가 임계값 이상에서는 심층침투효과에 의하여 keyhole 이 형성된다. 이 경우 내부로 들어간 레이저는 다중반사등에 의하여 모두 흡수됨으로 깊은 용융층을 준다. Keyhole 내부에서는 용융금속이 고온 및 압력등으로 격렬한 운동을 받게 되나, 용융금속의 중력, 점성 및 표면장력등에 의한 복잡한 작용으로 표면에 비드를 형성한다. 이러한 심층침투용접은 그 aspect 비가 5~12정도로서 전자빔용접과 비슷하다. 금속조직학적인 견지에서 보면 레이저에 의한 심층침투용접은 불순물을 제거시키는 작용과 고온에 단시간 유지됨으로 입자의 성장이 억제되어 양호한 조직을 얻을 수 있어 경도, 인장강도 및 충격치등 기계적 성질이 기지금속에 비하여 떨어지지 않는다.

현재 레이저용접은 스테레스강으로된 반응로의 용접등에 사용되며, 항공기산업에서 이루어지는 많은 전자빔용접이 레이저용접으로 대체되고 있다. 예를

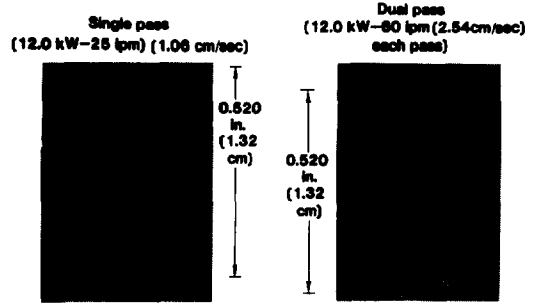


그림 8. 레이저로 용접시킨 파이프의 용접단면

들면 로켓내부에서 보강재, 기구를 위한 내부용접, 고압가스를 유지하기 위한 용접, 터빈엔진을 위한 브레이드와 기아의 용접등이 있다. 자동차공업에서도 크러치와 변속하우징, 기아, 액슬등과 기타 여러 가지 대형제품의 용접방법이 계속 연구되고 있다. 그림 8은 X-80 극지방파이프에서 레이저 용접을 보여주고 있다. 이들은 10 kw 정도의 CO₂ 레이저로 수행한 것으로, 용접재료의 인장시험에서 파단은 용접 부위가 아닌 다른 기지금속부분에서 일어났다.

⑥ 재료의 절단

레이저에 의한 재료의 절단은 증발이 요망됨으로 용접의 경우보다 큰 에너지가 필요하다. 이 절단방법은 기계적으로 힘든 비금속재료의 복잡한 형상에도 가능하다. 그리고 레이저는 적은 빔크기로 접속시킬 수 있어 절단폭을 0.1mm 정도로도 할 수 있어 재료의 손실이 적으며, 진동 소음 먼지등이 없고 절단면의 상태가 양호하다. 또한 절단속도가 대단히 빠르며, 자동조절에 의한 용통성이 큼으로 많이 이용되고 있다.

(1). 금속재료의 절단

레이저에 의한 금속의 절단은 금속의 증발, 용융과 반응가스에 의한 산화등 세가지 기구중의 하나 혹은 둘 이상의 방법에 의한다.

금속의 증발에 의한 기구에만 의존한다면 에너지가 용융에 요구되는 경우 보다 수배가 소요됨으로 절단속도가 느리다. 그리고 증발된 금속이 이온화하여 플라즈마를 형성함으로 레이저에너지를 흡수 및 차단함으로 효율이 떨어진다.

용융후 불어내는 기구는 금속을 용융점 이상으로 가열 후 함께 뿜어주는 불활성가스에 의하여 용융금

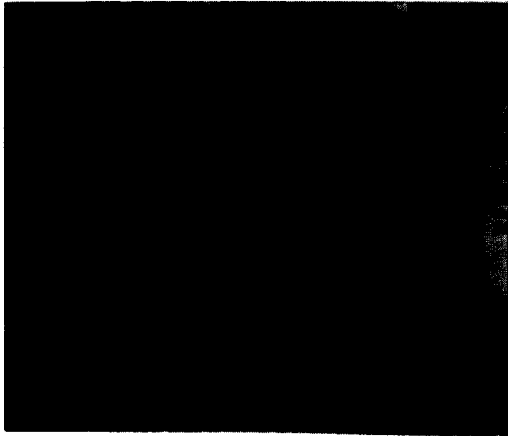


그림 9. 레이저에 의해 일정한 모양으로 절단하는 과정

속을 절단구역으로부터 제거시키는 방법이다. 이 방법은 산화가 쉽게되지 않는 내열합금에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.

반응가스에 의한 기구는 금속을 용융시키는데 요하는 에너지의 일부를 산소와 금속의 산화에 의한 발열반응으로부터 얻는다. 이 방법은 탄소강, 티타늄 같이 쉽게 산화되는 금속에 적합하며 상당히 두꺼운 금속도 수백 W의 레이저로 절단이 가능하다. 이 경우에는 절단속도를 약 40% 정도 증가시킬 수 있다.

그림 9는 CO₂ 레이저로서 철판을 일정한 모양으로 절단하는 것을 보여주고 있다. 레이저에 의한 절단은 판재를 취급하는 곳에서 많이 사용되며, 특히 항공기 산업에서 티타늄등을 절단하는데 레이저를 사용하는 방법은 매우 보편화되어 있다.

(2). 비금속재료의 절단

레이저에 의하여 절단이 수행되는 비금속재료에는 유리, 요업재료, 합성수지, 복합재료는 물론 고무, 목재, 섬유, 가죽 및 유기재료등 매우 광범위하다. 대부분 비금속재료에 대한 직접적인 절단은 증발에 의한 방법이고, CO₂ 레이저가 사용된다.

실제적인 응용의 예로서 석영관의 제조시 종래의 다이아몬드휠에 의한 절단방법을 1KW CO₂ 레이저로 대체시킨 결과 여러가지 작업과정을 줄일 수 있어 40% 비용절감을 가져왔다. 여기에 더하여 절단면이 매끈하여 짐으로 균열전파로 인한 손상을 방지하여 품질이 개선되었다.

현재 에너지절약의 방법으로 무게절감과 강도증가 등의 향상을 위하여 새로운 엔진재료로서 질화실리콘을 사용하려는 연구가 한창 진행되고 있다. 이 재료는 매우 견고한 요업재료임으로 기계가공의 큰 문제점을 가지고 있다. 그 가공은 현재 다이아몬드휠 등이 사용되나, 이것은 원칙적으로 직선적인 절단인데 비하여 레이저를 사용시에는 여러가지 모양으로 절단이 가능하고 효율이 좋아 가장 바람직한 가공방법으로 대두되고 있다.

Si 및 요업재료를 분리시키는데 사용하는 스크라이빙도 절단의 한 방법이다. 특히 이것은 전자공업에서 Si wafer 와 alumina substrate 의 생산에 광범위하게 사용하는 방법이다. Si 은 10.6 μm보다 1.06 μm 를 더욱 강하게 흡수함으로 Nd : YAG 레이저가 사용된다. 그러나 alumina 또는 다른 요업재료의 경우에는 cw CO₂ 레이저가 효과적으로 사용된다.

⑦ 재료의 천공(drilling)

레이저에 의한 천공에서는 재료의 증발이 요구됨으로 다른 방법들보다 더욱 큰 에너지가 필요하다. 레이저에너지가 큼으로 표면에서 과열된 증기는 이온화가 이루어지며, 이들 증기와 플라즈마의 압력은 크며 초음속임으로 용융금속 및 증발되는 재료들의 제거에 도움이 된다. 그러나 이때 발생하는 플라즈마가 많은 경우에는 에너지를 흡수, 발사 및 산란시킴으로 레이저에너지의 입사를 차장시킨다. 따라서 레이저에 의한 천공에서는 큰 에너지의 반복되는 Q-switched Nd : YAG 레이저 또는 펄스형의 레이저가 바람직하다.

그림 10은 두께 0.7 mm인 alumina 를 루비레이저로 천공시킨 것으로 펄스수에 따른 천공깊이를 보여주고 있다. 적은 각도로 집속된 빔의 경우에는 depth of focus 가 큼으로 aspect 비(깊이/직경)가 25 정도 까지도 얻을 수 있다. 그림에서 보듯이 부품과 다른 물질 사이에 접촉이 없어 오염은 없으나, 증발된 재료가 구멍벽에 집적되어 정밀도가 요하는 경우에는 정밀연마가 수행되어야 한다.

레이저에 의한 천공은 보통의 방법 보다 몇가지의 장점이 있다. 즉 기계적으로 힘든 매우 적은 크기(수 μm 정도)의 구멍도 얻을 수 있고, 보석류와 같이 매우 견고한 재료, 또는 매우 연질의 재료에도 사용이 가능하며, 가공시간이 짧아 생산성이 매우 높다.

레이저에 의하여 천공된 구멍은 레이저에너지와

⑧ 재료의 미소가공(micromachining)

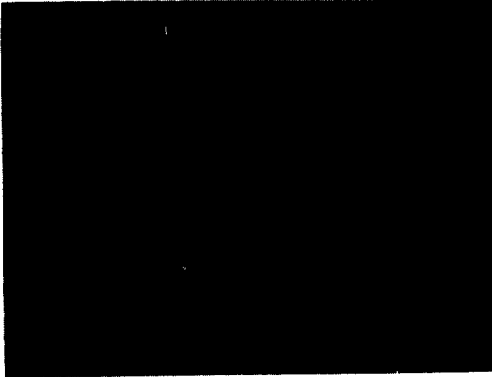


그림 10. 루비레이저로 천공시킨 알루미늄의 단면. 필스수는 좌로부터 우측으로 감에 따라 5에서 30으로 증가됨.



그림 11. 레이저의 초점위치에 따른 구멍의 모양과 깊이

집속조건에 따라 깊이와 직경을 변화시킬 수 있으나, 그림 11과 같이 집속된 빔의 초점위치가 어디에 있는가에 따라 구멍의 깊이와 모양에 차이가 난다. 즉 집속된 초점위치가 표면으로 부터 떨어지게 되면 구멍이 추모양으로 테이퍼가 지게되나, 표면으로 부터 약간 내부로 위치시킬때 깊이가 가장 크게 된다.

현재 세계공업에서 사용되는 루비부품의 천공에는 레이저가 사용되며, 가는 와이어를 신선하는데 사용하는 다이아몬드다이의 경우에는 레이저로 구멍을 만든 후 정밀연마를 수행한다. 금속재료의 경우에는 요업재료와 같이 흔하게 사용되지는 않는다. 그러나 기계적으로 천공이 힘든 위치 또는 공구가 표면처리 상태를 손상시키는 경우에 사용된다. 예로서 항공기 산업에서 특수강으로된 터빈브레이드와 연소실의 라이닝, 잠파트엔진의 적은 냉각출동의 천공에 사용된다.

레이저에 의한 재료의 미소가공이란 위에 기술된 용접, 절단 및 천공등의 가공범주에 속한다. 그러나 그 가공대상이 얇은 박막등 특수목적의 재료로서 매우 정밀한 규격이 요구되는 것으로 레이저에 의한 반도체회로의 제조등이 포함된다.

실제적인 응용은 박막저항의 레이저트리밍등 매우 다양하다. 트리밍은 그 저항을 변화시키기 위하여 박막의 일부를 증발시키거나 열적으로 수정시킴으로 된다. 증발에 의한 방법이 사용되는 경우에는 박막에 여러개의 구멍을 만들거나 선의 형태로서 재료를 제거 시킨다.

그림 12는 선형절단방식에 의한 박막 저항의 트리밍을 보여주고 있다. 만일 요망되는 저항치가 R_p 이면 A와 B의 2개의 절단으로 될 수 있다. 전극 사이에 박막을 통하여 A 방향으로 절단하면 저항값은 R_0 에서 A로 상승하며, X거리까지 절단하면 저항이 R_0 에서 R_1 로 된다. 그후 전극방향 즉 B 방향으로 절단하면 A 방향으로 절단하는 것 보다, $\Delta R / \Delta L$ 의 경사가 AX 방향보다 BX 방향이 적음으로, 저항치의 증가가 서서히 일어난다.

따라서 R_p 에 해당되는 거리에서 B 방향으로 절단을 정지시키면 된다. 이 경우 박막의 재료에 따라 사용되는 레이저가 다르다. 보통 얇은 박막저항의 트

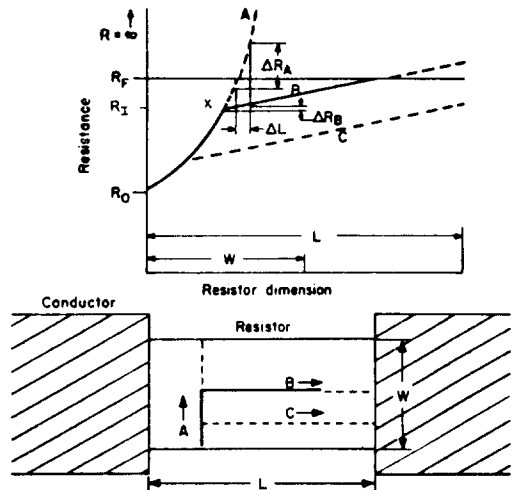


그림 12. 레이저에 의한 "L-cut" 트리밍. 윗그림은 거리에 따른 저항의 변화이고, 밑그림은 L-cut의 모형

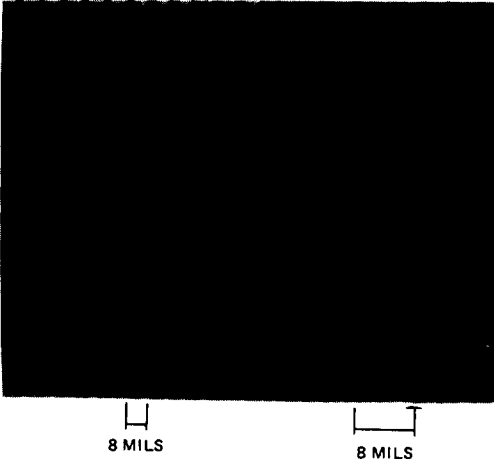


그림 13. Al_2O_3 상에 Au-Ti 박막의 레이저 가공

리밍에서는 Q-switched Nd : YAG 레이저가 바람직하며, 두꺼운 박막의 경우에는 펄스당 큰 에너지와 긴 펄스가 요구됨으로 펄스형 CO_2 레이저가 바람직하다. 특히 부품의 트리밍에서 실제 사용하의 최적 조건의 회로성능을 주기 위하여 전기적 측정을 수행하면서 자동조절되는 레이저에 연계시켜 사용한다.

부도체판상에 도선패턴을 주기 위하여 금속박막을 제거하는데는 반복되는 Q-switched Nd : YAG 레이저가 바람직하다. 즉 $1.06 \mu m$ 의 레이저는 실리콘과 같은 판상에서 투과되며 대부분의 금속에는 많이 흡수되기 때문이다. 그림 13에 보는 바와 같이 적당한 조건하에서 작업하면 기저에는 손상을 주지 않으면서 금속박막을 제거함으로써 도선패턴을 주게 된다.

㉑ 레이저에 의한 반도체아닐링

최근에 반도체가공과 장치의 제조에 레이저의 이용이 이루어 지고 있으며, 동시에 광범위한 연구가 이루어 지고 있다. 그중에 대표적인 것이 반도체의 아닐링이다.

Si 같은 반도체상에 가속된 이온을 주입시키면 결정조직에 손상을 주게되어 주입된 층이 비정형으로 된다. 더욱이 많은 불순물들은 적당한 치환형격자위치에 들어가지 못하여 요양하는 특성을 주지 못한다. 이러한 결함들은 반도체 부분을 조절된 분위기의 로내에서 일정시간 가열시킴으로 부분적으로 제거시킬 수 있다. 그러나 이 방법은 항상 결정조직을 완전하

게 회복시키는 것은 아니며, 흔히 재료의 오염으로 순도를 저하시키며, 때에 따라서는 주입원자가 조직내로 깊이 확산하며 일부 석출물과 결합되어 전기적 성질을 저하시킨다.

이온주입된 반도체의 레이저아닐링은 이러한 제약을 극복한다. 특히 이 방법에서는 손상된 부분만을 가열함으로 기저조직의 변화가 없다. 펄스형 또는 cw 레이저로 가열은 잔류결함이 거의 없고, 불순물의 확산깊이의 조절이 가능하다. 그리고 레이저아닐링 후에는 표면층의 재결정으로 주입원자가 치환형격자위치를 점유하게 된다.

레이저아닐링은 로내에서 가열에 의한 단점을 제거하나 몇가지 문제점도 있다. 즉 펄스형 레이저아닐링은 반도체 표면이 불규칙하게 되고 용융이 그치는 계면에서 응력이 유입된다. 그리고 cw 레이저에 의한 경우에는 일부 결합이 남게 된다. 이런 문제들도 많이 극복되어 레이저 아닐링은 거의 공업화단계에 접근하고 있다. 그림 14는 Si에 P를 주입시킨 경우 여러가지 처리에 따른 주입원자들의 침투깊이를 보여주고 있다.

펄스형 레이저로 아닐링은 이온주입된 층이 용융점에 도달하게 되는 경우에 일어난다. 그리고 재결정은 거의 모든 주입원자들이 치환형격자위치를 점유하면서 기저조직으로부터 액상의 결정성장에 의하여 진행된다. 이때 기저조직내로 주입원자의 침투깊이는 레이저에너지에 크게 의존한다.

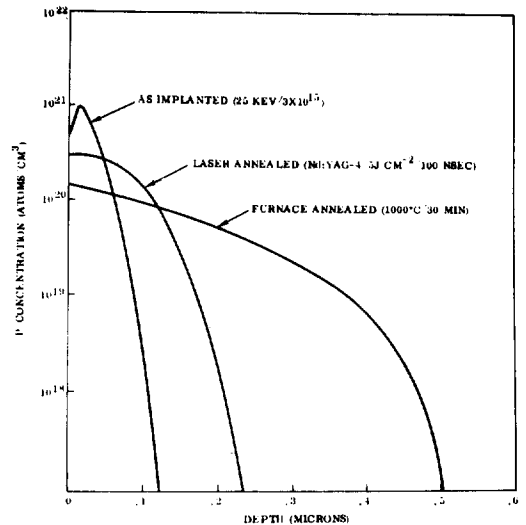


그림 14. 여러가지 처리에 의하여 Si내에 P가 침투한 깊이

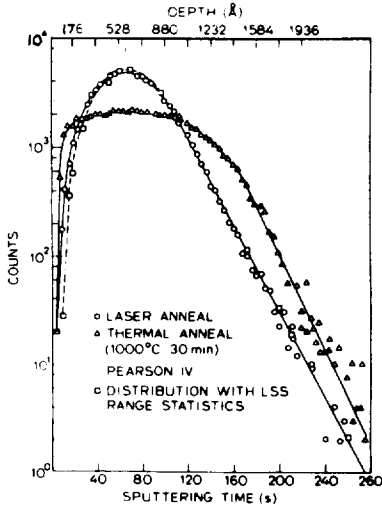


그림 15. As 주입된 Si을 cw 레이저와 가열로에 의하여 아닐링시 주입원자의 침투깊이

cw 레이저아닐링은 고상의 결정성장에 의함으로 가열로내에서 아닐링도중에 일어나는 과정과 비슷하여 용융이 일어나지 않는다. 따라서 cw 레이저아닐링은 주입원자의 분포를 유지하며 표면의 규칙성을 유지한다. 반면에 이 방법은 평형과정에 의함으로 아닐링시간이 길고 펄스형레이저 처리의 융통성을 주지 않는다. 그림 15는 As 주입된 Si의 아닐링시 침투깊이를 보여주고 있다. 여기서 보듯이 가열에 의한 아닐링은 As 분포를 크게 재배열시키나, cw 레이저에 의한 경우에는 원칙적으로 영향을 받지 않는다. 그리고 전자현미경에 의한 관찰시에 재결정구역과 비정형구역 사이에 명확한 구분이 가능하다.

위에 기술된 여러가지 방면에서 레이저의 이용은 광범위 하며, 새로운 이용방법 즉 레이저에 의한 이온주입법, MOS 조직에 금속-반도체 연결, 결정성장 광화이버 제조등 계속하여 연구가 진행중이다. 특히 우주산업과 외계에서 기대되는 재료가공과 처

리문제는 거의 전적으로 레이저에 의존할 것으로 기대된다. 따라서 레이저에 의한 여러가지 재료가공방법에 대한 연구와 개발은 더욱 신장될 것이다.

참고문헌

- 1) M.I.Cohen ; " Material Processing " Sec F4, ' Laser Handbook ' (ed) F.T.Arecchi & E.O. Shulz-Dubois, North-Holland Pub Co. Amsterdam (1972)
- 2) J.F.Ready ; " Industrial application of Lasers " Academic Press, New York (1976)
- 3) W.W.Duley ; " Laser Processing and Analysis of Materials " Plenum Press, New York (1983)
- 4) J.F.Ready (ed) ; " Laser applications in Material Processing " Proceedings of Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers vol, 198, Bellingham (1980)
- 5) R.Saunders, et al ; " Lasers, operation, equipment, application and design " (Coherent, Inc.), McGraw-Hill Co., New York (1980)
- 6) W.W.Duley ; " CO₂ Lasers Effects and Applications " Academic Press, New York (1976)
- 7) N.Rykalin, A.Vglov, A.Kokola ; " Laser Maching and Welding " Pergamon Press, Oxford (1978)
- 8) D.C. Óshea, W.R.Callen, W.T.Rhodes ; "An Introduction to Lasers and their applications" Addison-Wesley Pub Co. Reading (1978)
- 9) F.D.Seaman, D.S.Gnanamuth ; Metal Progress, August, 1975
- 10) E.V.Locke, R.A.Hella ; IEEE, QE-10, 2, Feb. 1974
- 11) M.Yessik, D.J.Schmatz ; Metal Progress, May, 1975