

p 편광 레이저광에 의하여 금속 표면에 만들어지는 법선 방향 전기력

Normal Electric Force on a Metal Surface Induced by a P-Polarized Laser

조관식, 이제원, 강명훈, 장수욱*, Y. Y. Tsui, C. Serbanescu**

인제대학교 나노시스템공학과*, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Alberta, Canada**

gscho@inje.ac.kr

p 편광 레이저광이 금속 표면에 입사할 경우에 있어서, 금속 표면에 작용하는 법선방향 전기력을 입사각에 대한 함수로서 이론적으로 탐구하였다. 입사각이 90 도에 근접할수록 큰 값이 얻어지고, 그 방향은 금속 표면에 수직하게 밖으로 잡아당기는 방향임을 알아내었다.

I. 서론

물체의 표면에서 빛이 흡수되거나 반사될 때, 빛의 운동량이 물체에 전달됨으로써 미치는 힘은 광압 (Radiation Pressure)으로서 알려져 있다. 이 힘은 밀어내는 방향으로 작용하고, 빛의 입사각이 작을수록 크다고 할 수 있다. 그런데, 빛이 물체 표면에 수직인 전기장 성분을 갖고 있고, 물체가 자유전자를 갖고 있다면, 자유전자들이 표면에 수직인 진동을 하게 된다. 이때 물체 표면에 존재하는 전기장은 1) 입사 레이저 전기장, 2)반사 레이저 전기장, 3)전자들에 의한 공간전하 전기장, 4)이온들에 의한 공간전하 전기장 등의 합이다. 본 연구에서는, 이 네 개의 성분들의 합이 금속 표면을 잡아당기는 방향으로 드러날 수 있음을 이론적으로 밝혀 보고자 한다.

이상적인 금속에서는 빛의 진폭반사계수가 -1이므로 1)과 2)가 상쇄되어 버리지만, 실제 금속에서는, 특히 p 편광에 대하여, 반사계수와 입사각 사이에 어떤 함수 관계가 존재한다.⁽¹⁾ 입사각이 90 도에 근접할수록, 앞의 문단에서 언급한 광압은 무시되어 가는 반면에, 1)과 2)의 합은 상당한 값을 가질 수 있다. 전자들의 진동이 레이저 전기장의 진동에 의하여 강제된다고 가정할 때, 금속 표면에서 3)과 4)는 반 주기 동안은 상쇄되고, 다른 반 주기 동안은 같은 방향으로서 합세한다. 시간에 대하여 평균을 취하면, 결과적으로 금속표면의 이온들을 밖으로 잡아당기는 힘이 남게된다.

II. 금속표면에서 진행되는 전기장 리플에 의한 힘

레이저광이 물체 표면에 비치면, 타원형의 스팟이 형성되고, 레이저 전기장은 타원형 스팟 안에서 진행되는 파동이 된다. 그런데, 금속 표면 근방의 전자들이 레이저 전기장에 따라 표면에 수직하게 진동한다고 가정해 보자. 전자들이 밖으로 끌려나온 동안에는 전자들과 금속표면 근방의 이온들에 의한 공간전하 전기장(space charge field)이 레이저 전기장을 상쇄시키려 든다(차폐 효과). 반면에 전자들이 금속 안으로 밀려들어난 경우에는 전자들과 이온들의 공간전하 전기장이 레이저 전기장에 영향을 주지 않게 된다. 다시말해서 타원형 스팟 안의 파형에서 볼록한 부분은 유지되지만, 오목한 부분은 차폐되어 버린다. 결과적으로 입사 및 반사 레이저 전기장의 합은 금속표면에서 타원 안을 진행하는 리플 모양이 된다(그림 1 참조).

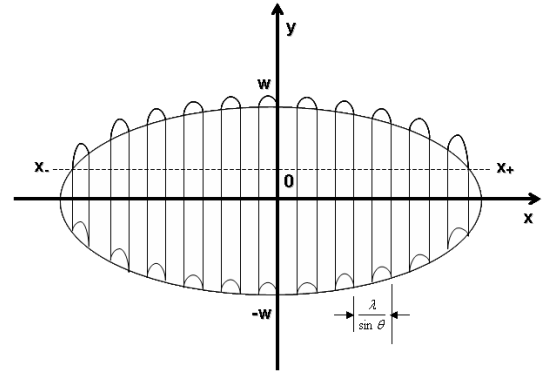


그림 1. 입사 및 반사 레이저광에 의한 리플 패턴. w는 레이저 빔의 반지름. θ 는 입사각.

여기서, 타원 안의 전기장 리플 패턴에 의하여 금속 표면에 작용하는 힘은 시간에 대한 함수로서,

$$F(t) = \int_{-w}^w \int_{-\frac{w}{\cos\theta}}^{\frac{w}{\cos\theta}} \frac{Ze(1+r)E_m}{a^2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} x \sin\theta) \sin\theta dx dy - [\text{self force}] \quad (1)$$

와같이 표현할 수 있다. 여기서, w 는 레이저빔의 반지름, θ 는 입사각, e 는 전자전하의 절대값, r 은 금속의 진폭반사계수, a 는 금속의 격자상수, E_m 은 입사 전기장의 진폭, λ 는 레이저광의 파장, w 는 레이저광의 각진동수이다. [self force]는 표면 이온들의 self field를 고려한 항이며, 입사각과는 관계없는 값이다. 입사각이 90 도에 근접하다고 가정하고, 위의 적분을 계산하고, 시간에 대하여 평균을 취하고 나면,

$$\bar{F} = [1 + r(\theta)] \left(\frac{w}{a}\right)^2 ZeE_m \tan\theta - [\text{self force}] \quad (2)$$

가 된다. 여기서, $r(\theta)$ 는 입사각이 90 도에 접근함에 따라서 1을 향하여 급격하게 증가하는 함수이다.⁽¹⁾ 그러므로, (2) 식은 입사각에 따라서 증가하는 힘을 나타낸다.

III. 결론 및 논의

p 편광 레이저광이 매우 큰 입사각으로 입사하는 경우에, 금속 표면에 수직으로 진동하는 전자들에 의한 차폐효과를 가정하면, 금속 표면을 끌어당기는 힘이 위의 (2) 식과같이 주어진다. 이 결과를 마이크로 미러의 조정, 금속이나 반도체 표면의 식각공정 등에 응용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 황보창권 저, “박막광학”, 테크미디어 간, p. 60 (2005).