

## 레이저 변수가 마그네슘 원자의 다광자 이온화에 미치는 영향 연구

김 달 우

산업과학기술연구소 물리연구분야

고강도 레이저 장에서 마그네슘 원자의 다광자 이온화에 미치는 레이저 parameter의 영향을 Time-of-Flight spectrometer를 사용하여 분광학적 방법으로 연구하였다. 진공 챔버 속에서 파장 532 nm 와 1064 nm 인 레이저 펄스를 강도  $10^{10-13}$  W/cm<sup>2</sup> 범위내에서 변화시키며 마그네슘 원자와 반응시켜서 Mg<sup>+</sup> 및 Mg<sup>2+</sup> 이온을 생성시켰으며 레이저의 파장, 강도 및 편광에 따른 광전자 스펙트럼을 구하였다. 또한, 전자 두개를 방출하고 생성된 Mg<sup>2+</sup> 이온의 발생 기구에 대하여 논하였다.

## I. 서 론

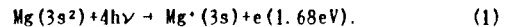
강한 레이저 광선이 원자와 반응하면 통상의 광전효과와는 달리 광자의 에너지가 이온화 포텐셜보다 작더라도 광전자가 방출된다. 이는 동시에 원자에 흡수된 여러개의 광자의 에너지 합이 이온화 포텐셜보다 크므로 생기는 다광자 이온화 (Multiphoton Ionization)<sup>(1,2)</sup> 현상으로서 원자의 구조와 레이저 광선의 parameter에 따라 영향을 받는다. 또한, 강한 레이저 장에서는 이온화에 필요한 최소의 광자 수보다 더 많은 광자가 흡수됨으로써 다광자 이온화에서 보다 광자의 정수배 만큼 더 큰 운동에너지를 가진 전자가 발생하는 Above Threshold Ionization<sup>(3,4)</sup> 현상과 원자로부터 여러개의 전자가 방출되는 다전하상태분포 (Multiple Charge State Distribution)<sup>(5,6)</sup> 현상도 나타나게 된다. 이러한 현상들은 대단히 많은 양의 광자 에너지가 원자 시스템에 효과적으로 결합하여 일어나는 것으로서 대단히 큰 비선형효과를 나타내며 섭동이론으로는 설명되지 않는다.

강한 레이저 장에서의 다전하 이온 (multiply charged ion) 생성 기구로는 원자로부터 여러개의 전자가 동시에 방출되는 직접이온화과정 (direct ionization)<sup>(7,8)</sup>과 단계적으로 전자가 방출되는 연속이온화과정 (sequential ionization)<sup>(1,9)</sup> 모델이 제시되었다. 직접이온화는 여러개의 전자가 다중여기 (multiple excitation)됨을 나타내

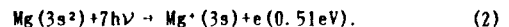
므로 전자의 상호관계가 중요한 역할을 한다. 연속이온화는 전자가 한개씩 순차적으로 방출되는 과정이지만 원자에 구속되어 있는 다른 전자들이 여기상태에 놓이는 경우도 있으므로 역시 전자의 상호관계가 고려되어야 한다. 여기서는 레이저 분광학을 이용하여 외곽전자가 두개인 마그네슘 원자를 대상으로 레이저 parameter를 변화시키며 원자의 이온화에 미치는 레이저의 영향을 연구하였다.

## II. 마그네슘 원자의 에너지 준위

마그네슘의 에너지 준위는 그림 1에 나타난 바와 같으며 Mg 및 Mg<sup>+</sup>의 이온화 포텐셜은 각각 7.64 및 15.04 eV 이다. 따라서, 광자 에너지가 2.33 eV 인 파장 532 nm 의 레이저 광선이 Mg 원자와 반응하면 Mg 원자는 4개의 광자를 흡수하고 1.68 eV 의 운동에너지를 가진 광전자를 방출하고 Mg<sup>+</sup> 이온이 된다. 즉,



이와 유사하게 1064 nm 의 경우는 광자 에너지가 1.17 eV 이므로 7개의 광자가 흡수되어 Mg<sup>+</sup> 이온이 생성되고 0.51 eV 의 운동에너지를 가진 전자가 방출된다.



연속이온화에 의해 Mg<sup>2+</sup> 이온이 생성되는 경우는 파장 532 nm 일 때 7개의 광자, 1064 nm 일 때 13개의 광자가 흡수되어야 한다.

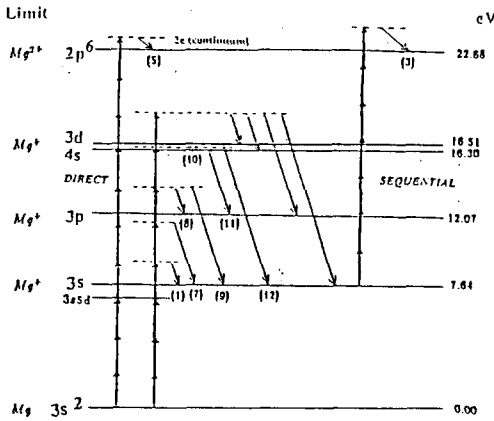
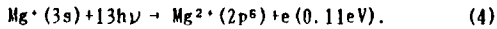
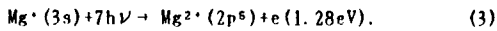
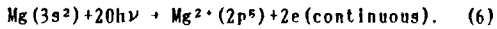
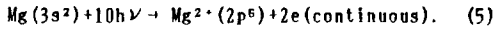


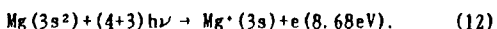
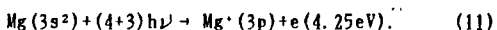
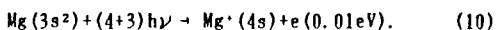
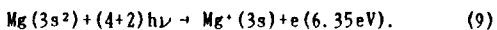
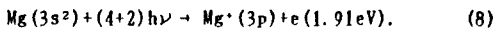
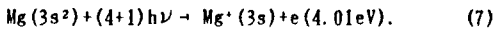
그림 1. 마그네슘 원자의 에너지 준위도.



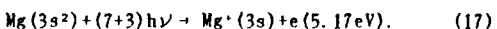
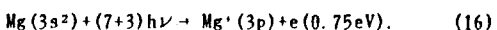
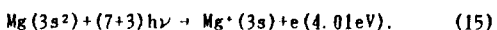
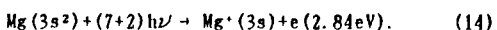
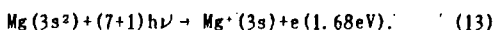
Mg 원자로부터 Mg<sup>2+</sup> 이온으로 직접 이온화되는 경우는 파장 532 nm, 1064 nm 일 때 각각 10개 및 20개의 광자가 흡수되며 발생되는 전자는 연속 스펙트럼을 나타낸다.



또한, 이온화에 필요한 최소의 광자 수보다 더 많은 광자가 흡수되면 흡수된 광자의 에너지만큼 더 큰 운동에너지를 가진 광자가 발생되거나 여기 상태에 이온이 놓이게 되며, 파장 532 nm 경우는,



마찬가지로 파장 1064 nm 의 경우는,



Mg<sup>+</sup> 이온의 3p 와 4s 에너지 준위는 3s limit 보다 각각 4.4 및 8.7 eV 높으므로 (7+1) 부터 (7+3)-광자 이온화까지는 3s에 대한 ATI 현상만 일어나고

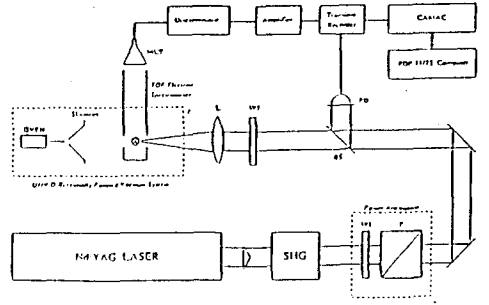


그림 2. 다광자 이온화 실험장치 개략도.

(7+4)-광자 이온화 과정에서 비토소 3p 여기상태가 된다. 따라서 파장 1064 nm 일 경우는 532 nm 일 때보다 ATI가 우세하다.

### III. 실험

이 연구에 사용한 실험 장치는 그림 2에 나타난 바와 같이 레이저 광원, 원자 빔 발생 챔버, 레이저와 원자 빔의 반응 챔버, 전자 또는 이온 검출 장치등으로 구성되어 있다. 실험에 사용한 레이저는 Nd:YAG 레이저로서 파장 532 nm 와 1064 nm 에서 강도 10<sup>10-13</sup> W/cm<sup>2</sup>, 펄스 폭 10 nsec 인 선형편광된 광선이었다. 레이저 광선은 근사 Gauss 모드였으며, 레이저 특성을 일정하게 유지하기 위하여 일정 전압으로 레이저를 작동시키고, 레이저 강도는 외부 광학계를 이용하여 변화시켰다. 또한, 편광된 빛이 검출기와 이루는 각도는 반파장판 (half-wave plate) 으로 조정하였다. 마그네슘 원자 빔은 oven을 가열하여 skimmer를 통하여 진공 챔버 속으로 보내졌으며 여기서 레이저 광선과 수직 방향으로 교차하였다. 레이저와 원자의 반응에 의해 발생된 전자 및 이온은 Time-of-Flight Spectrometer로 해석하여 전자에너지 스펙트럼을 구하고 다광자에 미치는 레이저의 강도, 파장 및 편광의 효과를 구였다.

### IV. 결과 및 논의

#### 1. 전자 에너지 스펙트럼

그림 3(a)는 마그네슘 원자가 파장 532 nm 인 광자를 4개 또는 그 이상 흡수하여 발생된 광전자

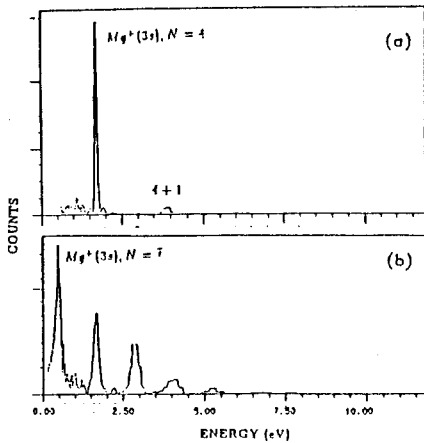


그림 3. 광전자 스펙트럼. (a) 파장 532 nm, (b) 파장 1064 nm.

의 에너지 스펙트럼이다. 가장 우세한 peak은 1.68 eV 에 나타났으며, 이것은 4-광자 이온화 과정인 경로 (1)에 해당한다. 또한, 광자를 (4+1) 개 흡수한 ATI peak이 1.68 eV peak보다 광자 에너지 (2.33eV) 만큼 더 큰 4.01 eV에 나타났다.

1.28 eV 에는 경로 (3)을 따라  $Mg^+$  이온으로부터  $Mg^{2+}$  이온이 생성되는 7-광자 이온화 과정에 의해 발생된 전자이다. 따라서,  $Mg^{2+}$  이온이  $Mg^+$  이온을 거쳐 발생하는 연속이온화 과정이 일어남을 알 수 있다. 한편, Mg 원자로부터 직접  $Mg^{2+}$  이온이 생성되는 직접이온화 과정에 의해 발생하는 전자는 경로 (5)에서 알 수 있는 바와 같이 연속 스펙트럼으로 나타나며 위의 스펙트럼에서는 구분되지 않았다. 그러나, 1.91 eV 운동에너지를 가진 전자가 방출된 것은 경로 (8)을 따라  $Mg^+$  이온이 이중여기 (double excitation)됨을 나타내며 직접이온화 과정이 일어날 확률도 있음을 뜻한다.

그림 3(b)는 파장 1064 nm 일 경우의 광전자 에너지 스펙트럼이다. 가장 우세한 peak은 7개의 광자를 흡수하여 발생한 0.51 eV peak이며 ATI peak들이 1.68, 2.84, 4.01 eV 위치에 나타났다. 그림 3(a)와 3(b)를 비교하면, 파장 532 nm 인 (a)의 경우는 마그네슘의 여기상태가 두드러지게 나타나지만 1064 nm 인 (b)의 경우는 여기상태가 아주 미약한 반면 ATI가 강하게 나타났다. 이는, 532 nm 인 경우는 기저상태보다 2 또는 3개의 광자가

더 흡수되어 3p 또는 4s 여기상태가 되는데 반해 1064 nm 의 경우는 광자가 4 또는 7개나 더 흡수되어야 여기상태가 되므로 여기상태는 미약하고 ATI가 강하게 된다.

## 2. 레이저 강도

레이저 강도가 1 일 때 N개의 광자를 흡수하여 생성되는 이온의 양은  $I^N$ 에 비례한다는 것이 최저 차수 섭동이론으로 예측되었다.<sup>(11, 12)</sup> 따라서, 레이저 강도와 발생된 이온과의 관계를 log-log plot으로 나타내면 직선의 기울기 N은 흡수된 광자의 수와 일치하게 된다. 실험치를 최소자승법으로 power law,  $I^N$ 에 적용한 결과, 파장 532 nm 의 경우  $Mg^+$  (1.68eV)의 기울기는  $4.2 \pm 0.5$ 로써 4-광자 이온화 과정에 의한 이론치 4와 잘 일치하였으며, (4+1)-광자를 흡수한 ATI의 기울기는  $5.3 \pm 0.7$ 로써 역시 이론치와 일치하였다. 또한,  $Mg^{2+}$  ( $2p^5$ )의 기울기는  $5.2 \pm 1.5$ 로써 연속이온화 과정에 의한 예측치 7과 근사하며 연속이온화가 주된 과정을 나타내고 있다.

파장 1064 nm 경우는 7-광자 이온인  $Mg^+$  (0.51eV)의 기울기는  $6.7 \pm 1.2$ 이고, 그 ATI 인 8-, 9-, 10-광자 이온은 각각  $7.8 \pm 0.9$ ,  $9.2 \pm 1.6$ ,  $9.7 \pm 1.8$ 로써 이론치와 잘 일치하였다.

## 3. 각분포

다광자 이온화 과정에 의해 발생된 전자의 각분포는,<sup>(12, 13)</sup>

$$I(\Theta) \propto \sum \beta_{21} P_{21}(\cos \Theta)$$

으로 표현되며  $\beta_{21}$ 는 원자에 따라 고유한 값,  $P_{21}(\cos \Theta)$ 는 Legendre 다항식을 나타낸다. 각분포는 선형편광을 사용하여 측정하고 편광면의 각도를 검출기 축에 대해 회전시키며 레이저 광선의 전파 방향과 수직방향의 전자를 검출하였다.

그림 4의 (a), (b), (c)는 532 nm 레이저에 의해 마그네슘 원자로부터 각각 4, 5, 6개의 광자를 흡수하여 방출된 전자의 각분포로써 흡수된 광자의 수가 많을수록 편광방향으로 더욱 급한 경사를 이루고 복잡한 구조를 나타내는데, 이것은 비선형도의 증가에 따른 효과이다.

그림 5는 1064 nm 에 의한 것으로써 (a), (b), (c)는 각각 7, 8, 9개의 광자를 흡수한 경우이며

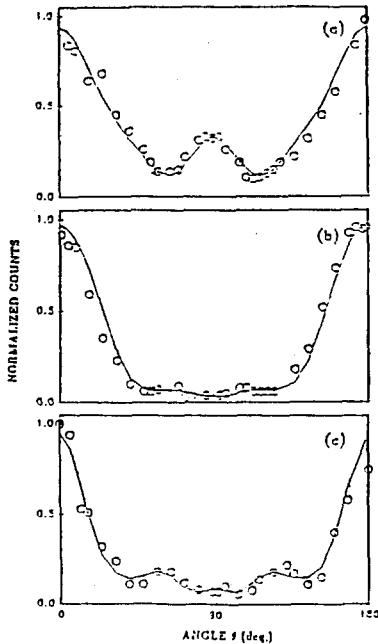


그림 4. 파장 532 nm 에서 (a)4-광자, (b)5-광자, (c)6-광자 흡수에 의한 마그네슘 광전자의 각분포.

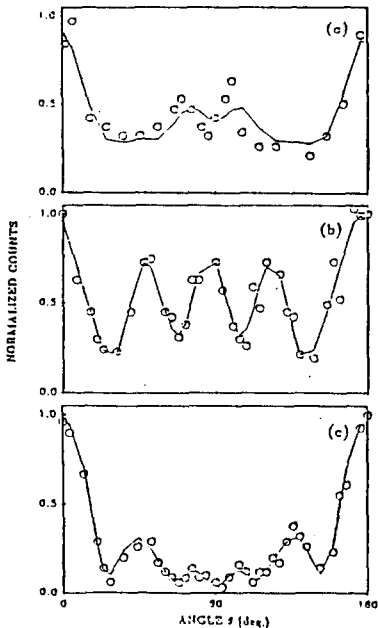


그림 5. 파장 1062 nm 에서 (a)7-광자, (b)8-광자, (c)9-광자 흡수에 의한 마그네슘 광전자의 각분포.

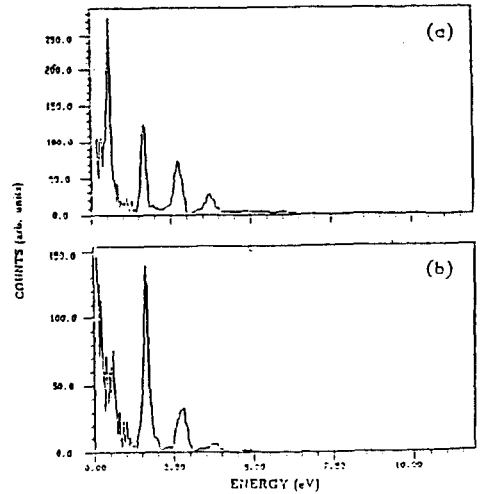


그림 6. (a)선형편광, (b)원형편광에 의한 광전자 에너지 스펙트럼 (파장 1062 nm).

532 nm 일 때보다 비선형도가 크므로 편광방향으로 급한 경사를 이루고, 더욱 복잡한 구조를 나타낸다. 또한, 실험치를 각분포식에 적용시켜  $B_{21}$ 를 구한 결과, 비선형도가 증가할수록 높은 차수의  $B_{21}$ 가 각분포에 공헌하여 편광방향으로 더욱 급격한 peak 을 이루었다.

#### 4. 편광효과

선형편광과 원형편광에 대한 전자에너지 분포는 그림 6과 같다. 원형편광된 레이저 광선으로 다광자 이온화를 시킨 경우 파장 532 nm 의 경우는 선형편광과 비슷한 스펙트럼을 나타내었으나 파장 1064 nm 의 경우는 작은 운동에너지를 가진 전자가 급격히 줄어들었다. 이 현상은 원심력 장벽 (centrifugal barrier)에 의해 작은 운동에너지를 가진 전자의 발생이 억제되기 때문이다. 즉, 최종 연속상태의 높은 궤도 각운동량의 흡수로 인해 작은 광자 에너지에 의해 발생된 낮은 전자 에너지 상태의 transition matrix element가 줄어들기 때문이다.<sup>(14)</sup> 그러나, 더 많은 광자와 각운동량이 흡수되는 더 큰 에너지에서는 자유전자의 에너지가 급격히 증가하므로 다광자 이온의 생성이 원상대로 회복되어 강한 peak이 나타난다.

## V. 결 론

강한 레이저 장에 의한 마그네슘 원자의 다광자 이온화 과정을 time-of-flight spectrometer를 이용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다광자 흡수에 의한  $Mg^{2+}$  이온의 생성은  $Mg^+$  이온의 기저상태가 초기상태로 작용하는 연속 이온화가 주된 이온화 과정이다.
- (2) 강한 레이저 강도에서 원자로부터 발생된 광전자의 각분포는 레이저의 파장 및 흡수된 광자의 수에 따라 결정된다.
- (3) 파장 1064 nm 인 경우는 원형편광된 레이저 광선은 원심력 장벽때문에 운동 에너지가 작은 광전자의 발생이 억제된다.

## 참 고 문 헌

- [1] "Multiphoton Ionization of Atoms", ed. S.L. Chin and P. Lambropoulos (Academic Press, Toronto, 1984).
- [2] P. Lambropoulos, Adv. At. Mol. Phys. **12**, 87 (1976).
- [3] P. Agostini, M. Clement, F. Fabre, and G.

- Petite, J. Phys. **B14**, L491 (1981).
- [4] P. Krult, J. Kilmann, H. Muller, and M. Van der Wiel, Phys. Rev. **A28**, 248 (1983).
- [5] T. S. Luk, H. Pummer, K. Boyer, M. Shakidi, H. Egger, and C. K. Rhodes, Phys. Rev. Lett. **51**, 110 (1983).
- [6] I. S. Aleksakhin, N. B. Delone, P. P. Zapesochyi, and V. V. Suran, Sov. Phys. JETP (Eng. Tran.) **49**, 447 (1979).
- [7] K. Boyer and C. K. Rhodes, Phys. Rev. Lett. **54**, 1490 (1985).
- [8] A. Szoke, C. K. Rhodes, Phys. Rev. Lett. **56**, 720 (1986).
- [9] P. Lambropoulos, Phys. Rev. Lett. **58**, 108 (1987).
- [10] J. Morellec, D. Normand, and G. Petite, Adv. At. Mol. Phys. **18**, 97 (1982).
- [11] P. Lambropoulos, Adv. At. Mol. Phys. **12**, 87 (1976).
- [12] P. Lambropoulos and X. Tang, J. Opt. Soc. Am. **B4**, 821 (1987).
- [13] S. N. Dixit, J. Phys. **B16**, 1205 (1983).
- [14] H. B. Bebb and A. Gold, Phys. Rev. **143**, 1 (1966)

The Effect of Laser Parameters on the Multiphoton Ionization of  
Magnesium Atoms

Dal-Woo Kim

Department of Physics, Research Institute of Industrial  
Science and Technology, Pohang 790-330

A spectroscopic study on photoelectrons arising from multiphoton ionization of magnesium atoms in high intensity laser field is studied experimentally with time-of-flight spectrometer. Both 532 nm and 1064 nm excitation in the intensity regime of  $10^{10-13}$  W/cm<sup>2</sup> are used for single and double ionization of magnesium. The emphasis is placed on the photoelectron spectra, and their variations with laser wavelength, intensity, and polarization. Also, the ionization process of doubly charged ions which can be produced either by a stepwise process or by the simultaneous removal of two electrons is discussed.