

용량결합고주파여기 아연증기레이저의 출력특성

(Output Characteristic Of Zinc Vapour Laser With Capacitively Coupled Radio Frequency Excitation)

최상태*

(Sang-Tae Choi)

요 약

직류방전이 추가로 인가된 용량결합고주파(CCRF)여기에 의한 아연증기레이저에서 6개의 레이저선들이 방출되었다. 이들의 파장은 491.162[nm]와 492.403[nm]의 청색선과 589.433[nm]의 오렌지선 그리고 747.879[nm], 758.848[nm], 773.25[nm]의 적외선 영역에 분포되어 있다. 최적의 레이저운전을 위해서 방전파라미터들이 결정되었다. 13.56[MHz]의 고주파전력 400[W]에서 오븐온도 780~800[K], 헬륨압력 3.5~5.5[kPa]로 최적화 되었다.

Abstract

From a CCRF-excited zinc vapour laser with overlapped DC-discharge were emitted following 6 laser lines: two blue at 491.162[nm] and 492.403[nm], an orange at 589.433[nm] and three infrared lines at 747.879[nm], 758.848[nm] and 773.25[nm]. The discharge parameters were determined for an optimal laser operation. At a RF-power of 400[W] with the frequency 13.56[MHz] the optimal temperature of the oven lay between 780[K] and 800[K], the He-pressure between 3.5[kPa] and 5.5[kPa].

Key Words : Zinc Vapour Laser, RF-Laser, CCRF-Discharge, Birefringent Filter

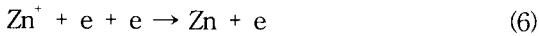
1. 서 론

산업 및 의료기술장비 등의 발전에 특히 중요한 역할을 담당할 연속파 자외선레이저에 대한 연구는 아직 만족할 만한 성과를 보지 못하고 있다. 연속파 자외선레이저를 발전시키는 레이저매질로는 특히 금속 증기가 첨가된 희유가스가 사용된다. 기체레이저의

발전이 주로 사용되고 있는 홀로우음극방전에서는 가시광과 적외선영역 뿐만 아니라 자외선영역까지도 레이저선들을 방출하지만 실제적인 응용에는 문제점을 드러내고 있다. 그 이유는 홀로우음극방전레이저의 제작은 기술적으로 까다롭고, 레이저수명이 짧은 데 있다. 한편으로는 크립톤레이저[1]와 카드뮴레이저[2]의 경우처럼 방전관의 외부에 간단하게 전극을 배치하고 고주파를 사용하여 레이저플라즈마를 발생시키고 있다. 이러한 용량결합고주파를 사용한 레이저여기는 통상적인 홀로우음극방전이나, 직류방전에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있다[3].

* 주저자 : 경주대학교 컴퓨터정보전자공학과 부교수
Tel : 054-770-5180, Fax : 054-744-5295
E-mail : stchoi@gnu.ac.kr
접수일자 : 2007년 10월 8일
1차심사 : 2007년 10월 17일
심사완료 : 2007년 10월 31일

준안정 헬륨원자와 여기된 아연이온사이의 에너지 차이는 자유전자로부터 운동에너지의 형태로 넘겨받는다. 아연이온은 잠재적으로 레이저선으로 발진이 가능한 UV영역의 몇 개의 선이들을 가지고 있다: 206.423[nm], 209.994[nm], 210.218[nm], 250.199[nm], 255.795[nm]. 이 선들의 상준위는 적외선(예, 758.848 [nm])의 에너지준위와 비슷하기 때문에 이들 역시 헬륨분자이온들과의 전하이동충돌을 통해 여기될 수 있다. 레이저천이 이후에 아연이온은 다단계의 자연 방출을 하면서, 특히 UV영역에서 여러개의 파장들을 방출하면서 이온의 기저상태에 도달한다. UV영역의 방출은 가시광역대의 방출보다 상대적으로 높은 천이확률을 가진다. 대체로 기저상태의 이온($E_{zn^+} = 9.39[eV]$)들과 전자들의 재결합이나 혹은 벽에서의 재결합을 통하여 중성의 아연원자들이 생성된다.



이로써 레이저하준위는 빠르게 비워지고 아연중기레이저의 4준위계 사이클이 완성된다.

3. 레이저의 구조

금속이온레이저에 있어서 방전내부에 생성되는 금속중기의 균일한 분포는 레이저발진에 중요한 역할을 한다. CCRF-방전에서는 방전관 내벽으로 이온충돌이 일어나 스퍼터링효과가 나타난다. 이때 내벽의 구성물질이 방출되거나 금속이온과 벽물질이 화학적으로 결합함으로써 기체내부가 불순물로 혼탁하게 된다. 본 연구에서는 석영유리로 이루어진 레이저방전관의 내벽을 아연이온의 충돌로부터 보호하기 위하여 외부직경 7[mm], 내부직경 4[mm]인 Al_2O_3 (산화알루미늄, 인조사파이어)-세라믹관을 방전관내부에 삽입하였다. Al_2O_3 의 표면은 석영의 표면보다 강도가 현저히 높다. Al_2O_3 -세라믹은 다이아몬드 다음으로 견고해서 다양한 분야에 사용된다. "Sputtering Yield"는 어떤 매질이 스퍼터링 될 때 그 척도로 사용된다. 이는 생성되는 금속이온에 대하여 방전관 벽으로부터 방출되는 물질의 원자 혹은 이온의 평균수를 의미한다. 참고문헌[5]에서는 600[eV]의 에너지를

가진 아르곤이온이 충돌할 때 여러 가지 물질들의 Sputtering Yield를 측정하였다. Al_2O_3 의 값(0.18)과 SiO_2 (석영)의 값(1.34)을 비교해보면 석영의 스퍼터링효과가 7배정도임을 알 수 있다.

레이저의 여기를 위해서는 먼저 방전관 안으로 RF-전력이 효과적으로 결합되어야 한다. 또한 균질한 형태의 방전이 생성되어야 한다. 그림 2는 내부에 Al_2O_3 -방전내관이 삽입되고 외부에는 RF-전극이 부착된 레이저방전관의 단면을 보여주고 있다. RF-전력을 레이저플라즈마 내부로 결합시키기 위해서 길이 400[mm], 폭 4[mm]인 두개의 전극을 방전관의 양쪽에 길이로 부착하였다. 열전도성과 경제성을 고려했을 때 최적의 조건을 갖춘 구리를 전극의 재질로 채택하였다[3].

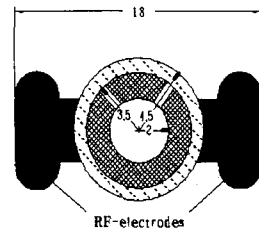


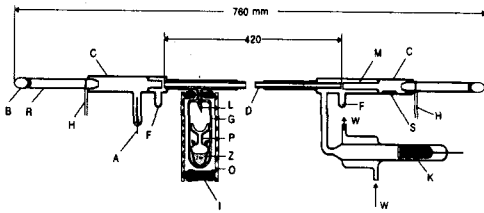
그림 2. 방전관과 RF-전극
Fig. 2. Discharge tube and rf-electrodes

직류방전을 추가한 CCRF-여기 아연중기레이저의 구조가 그림 3에 나타나 있다. 전체길이 760[mm]인 레이저튜브는 석영유리관으로 이루어져 있다. 스퍼터링을 억제하기 위하여 길이 420[mm], 내부직경 4[mm]인 Al_2O_3 -세라믹관을 방전관 내부에 삽입하였다. 관의 양쪽 끝에는 Brewster창문으로 막혀져 있다. 창문은 광축에 대해서 Brewster각으로 고정되어 있다. 아연이온이 Brewster창문에 응결하게 되면 레이저출력이 감소하거나 방출이 중단된다. 가속된 아연이온이 Brewster창문으로 향하는 것을 막기 위해서 He 방전이 응결방을 통과하도록 하였다. 그 결과 아연중기는 냉각된 응결방의 내면에 달라붙게 된다.

고주파방전에서는 오직 확산에 의해서만 금속중기가 방전내부에 분포된다. 금속중기가 방전중앙부에 위치한 오븐으로부터 방전내부로 퍼져 나갈 때 균일하게 분포되지 않는다. 약한 직류방전을 CCRF-방전에 추가로 연결시키고, 오븐을 양극쪽에 치우쳐

용량결합고주파여기 아연증기레이저의 출력특성

배치시킴으로써 만족한 분포를 얻을 수 있었다. 이러한 목적으로 RF-전극외에 DC-양극과 DC-음극을 레이저튜브에 부착하였다. 금속증기는 모세관의 양극쪽 끝에서 방전내부로 유입되고 전기영동의 효과로 음극쪽으로 운반된다. 직류여기에 의한 기체레이저에서 전기영동은 이온증기의 균일한 분포에 결정적인 역할을 한다. CCRF-여기 아연증기레이저의 경우에는 방전내부로 유입되는 아연원자가 이온화되고 직류전기장에 의해 음극방향으로 모세관을 통해 이동하며 분포된다. 아연원자들은 RF-방전에 의해 이온화되므로 단지 아주 약한 직류(약 20~50[mA])가 요구된다. 전기영동의 또 다른 장점은 스퍼터링에 의한 퇴적물생성이 모세관길이를 따라 골고루 이루어진다는 것이다[6].



DC-양극 A, Brewster창문 B, 응결방 C, Al_2O_3 -내관 D, 퇴적물용기 F, 아연용기 G, 열코일 H, 절연재 I, DC-음극 K, 석영송곳 L, 철심유도관 M, 오븐 O, 엠플 P, 석영관 R, 철심 S, 냉각수 W, 아연 Z

그림 3. 레이저튜브의 구조
Fig. 3. Structure of laser tube

양극쪽에는 아연용기가 있다. 용기에는 증류처리된 고순도의 아연이 담긴 엠플이 있다. 이 엠플은 전체 레이저튜브가 외부로부터 약 800[K]의 열로 48시간의 가열과정을 거친 후 고진공펌프시스템에 연결되기 직전 오븐의 상부에 위치한 석영송곳과의 충격에 의해 개방된다. 용기벽과 오븐 사이에 있는 철-콘스탄탄 열소자가 오븐의 온도를 측정한다. 스퍼터링물질이 Brewster창문에 충돌하는 것을 억제하기 위하여 응결방과 Brewster창문 사이에 열코일을 감아두었다. 코일의 국부적인 가열을 통해 기체 내부의 입자가 벽쪽으로 꺾여 와류를 형성하는 선회작용을 일으킨다. 약 30~40시간의 운전 후에는 적절한 실험이 불가능할 정도로 퇴적물이 크게 자라게 된다. 레

이저튜브의 수명을 재차 혹은 더 이상 연장시켜 장시간 실험을 수행하기 위하여 음극 쪽 응결방 내부에 철심을 삽입하였다. 이 철심은 직경 2[mm], 길이 3[cm]이며, 끝을 뾰족하게 다듬었다. 관 외부에서 자석의 도움으로 철심을 모세관에 통과시켜 자라난 퇴적물에 충돌시킨다. 분쇄된 퇴적물은 철심의 유도로 모세관 밖으로 빠져나와 레이저튜브 양쪽 끝의 응결방으로 밀려 나온다. 이 때 생기는 먼지가 펌프에 의한 진공처리과정이나 헬륨의 충전과정에서 Brewster창문에 침착되는 경우를 완벽하게 억제하지는 못한다. 상대적으로 많은 양의 퇴적물 찌꺼기를 방전 영역으로부터 격리시키기 위하여 모세관 양쪽에 각각 하나의 용기를 만들어 찌꺼기를 모을 수 있게 하였다.

4. 레이저파라미터 최적화와 출력특성

본 논문의 연속운전 CCRF-여기 아연증기레이저에서 다음과 같이 총 6개의 레이저선들이 관찰되었다: 두 개의 청색선(491.162[nm], 492.403[nm]), 하나의 오렌지선(589.433[nm]), 세 개의 적외선(747.879[nm], 758.848[nm], 773.25[nm]). 이 선들의 측정에는 약 40[nm]의 좁은 파장대역만을 반사시키는 세 개의 고반사거울이 사용되었다. 곡률반경은 각각 1.5[m](청색선, 오렌지선), 1[m](적외선)이다. 다중광선레이저에서는 좁은 대역폭의 거울을 사용함으로써 발진하는 선들을 미리 선택하는 것이 용이하다. 레이저가 단지 하나의 선만을 방출하기 위해서는 공진기안에 필터를 설치하여야 한다. 이 필터는 원하는 선에 대해서는 손실 없이 통과시킨다. 그 외의 다른 선들은 발진이 불가능 할 만큼 약해진다. 위의 요구조건들을 만족시키는 복굴절필터[7]는 이방성 평면크리스탈로 이루어졌다. 이것은 공진기의 광축에 대해서 Brewster각으로 기울어져 있고 필터면에 수직으로 광축을 중심으로 회전이 가능하다.

그림 3의 구조를 가진 레이저튜브를 사용하여 여러 가지 방전파라미터들에 대한 실험을 하였다. power meter로 공진기거울의 뒤에서 레이저출력을 측정하였다. 금속증기레이저의 최적운전은 여러 가지 파라미터들에 의존한다. 예를 들어 오븐온도, 기체압력, 인가전력 등이다.

4.1 오븐온도의 최적화

아연용기내의 온도는 오븐과 용기벽 사이의 공간에 위치한 철-콘스탄탄 열소자가 측정한다. 오븐의 온도를 변화시키는 동안에 총 4개의 레이저선의 출력을 측정하였다(그림 4). 두개의 청색선(491.16[nm] 및 492.40[nm])은 서로 분리되지 않았다. 이들의 파장 간격은 겨우 약 1[nm]로서 복굴절필터를 사용해도 선의 선택이 불가능하였다. 491.16[nm]의 선은 492.40[nm]에 비해 아주 약한 출력(약 3분의 1)을 나타내기 때문에 두 선의 출력은 합쳐진 값이 측정되었다.

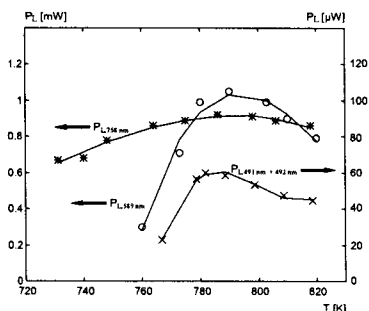


그림 4. 오븐온도의 최적화
Fig. 4. Optimization of oven temperature

그림에서 각 선들의 최적화된 오븐 온도는 780~800[K] 사이에 놓여있음을 알 수 있다. 이 온도값 이상에서는 아연증기의 과잉으로 방전이 짙은 청색을 띠었다. 그로 인해 레이저출력이 감소하였다. 오븐온도가 증가하는 동안에는 방전임피던스가 변화하기 때문에 고주파발생기의 내부저항값에 임피던스정합이 지속적으로 재조정되어야 한다[3]. 파장, 헬륨의 압력 그리고 RF-전력의 의존성은 전혀 나타나지 않거나 혹은 미미한 정도이다. 따라서 이어지는 실험에서는 그림 4에서 얻은 최적화된 오븐온도 790[K]이 설정되었다. 레이저운전시에는 아연 용기내의 가벼운 온도변동은 사소한 것으로 취급된다. 왜냐하면 온도 최적값의 폭(약 20[K])이 상대적으로 넓기 때문이다.

4.2 헬륨압력 및 직류전류의 최적화

각각의 레이저선들에 대하여 헬륨압력 및 직류전류에

대한 의존성을 측정하였다. 491.162[nm]와 492.403[nm]에 대해서는 그림 5에, 589.433[nm]와 747.879[nm]에 대해서는 그림 6에 그 측정결과를 나타내었다. 758.848[nm]와 773.25[nm]에 대해서는 그림 7에 나타내었다. 그림은 헬륨압력과 레이저출력 사이의 관계 그리고 헬륨압력과 직류전류값 사이의 관계를 보여주고 있다. 헬륨압력에 대한 최적의 직류전류값이 설정된 상황에서 레이저출력을 측정하였다. 레이저출력은 방전내의 아연증기밀도에 의존하기 때문에 앞에서 결정된 최적화된 오븐온도 790[K]에서 측정이 이루어졌다. 모든 측정에서 RF-전력은 400[W]를 인가하였다.

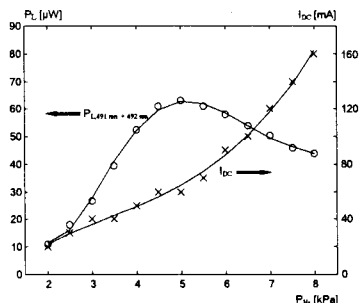


그림 5. 491.162(nm) 및 492.403(nm) 선의 헬륨압력 및 DC-전류의 최적화
Fig. 5. Optimization of helium pressure and dc current for 491.162(nm) and 492.403(nm) line

헬륨압력 3.5~5.5[kPa]의 범위에서 모든 레이저선들이 최대출력을 나타내었다. 압력이 상승하면 먼저 헬륨이온과 준안정 헬륨원자들의 밀도가 높아지고 그로 인해서 레이저상준위의 점유밀도가 높아진다. 동시에 전자들의 평균자유행정이 감소하고 그로 인해 전자들의 온도가 내려간다. 이러한 두 개의 상반된 과정을 통해서 최대값이 나타난다.

그림 6에서는 레이저상준위가 준안정 헬륨원자들과의 패닝충돌에 의해 여기되는 589.433[nm]와 747.879[nm]의 두 개의 선이 4~5[kPa]의 헬륨압력에서 가장 강력하게 방출됨을 알 수 있다. 헬륨분자($E_i = 22.22[eV]$)와의 전하이동충돌로 여기되는 두 개의 적외선 758.848[nm]와 773.25[nm] 사이의 레이저출력을 그림 7에서 비교해보면 헬륨압력의 최적값이 약 2[kPa] 차이가 난다.

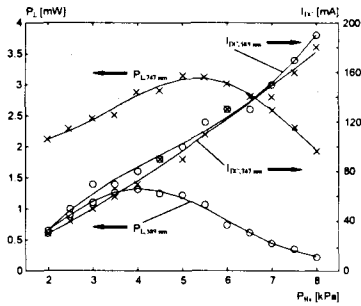


그림 6. 589.433(nm) 및 747.879(nm) 선의 헬륨압력 및 DC-전류의 최적화
 Fig. 6. Optimization of helium pressure and DC current for 589.433(nm) and 747.879(nm) line

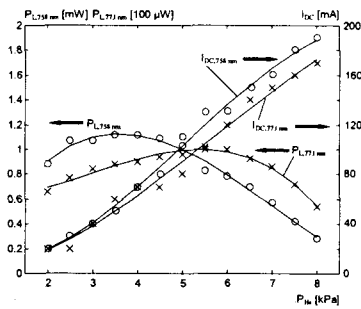


그림 7. 758.848(nm) 및 773.25(nm) 선의 헬륨압력 및 DC-전류의 최적화
 Fig. 7. Optimization of helium pressure and DC current for 758.848(nm) and 773.25(nm) line

4.3 RF-전력의 최적화

계속되는 실험에서 RF-전력에 대한 각 선들의 출력의존성을 연구하였다. 이들은 각각 최적화된 헬륨압력과 DC-전류하에서 이루어졌다. 아연용기의 온도는 다른 측정에서와 같이 790[K]을 유지하였다. 가능한 최대의 레이저출력을 얻기 위해서 앞에서 결정된 헬륨압력을 주입하였다. 두 개의 청색선의 측정에서는 5[kPa], 589.433[nm]의 오렌지선은 4[kPa]이었다. 적외선의 압력최적치는 가시광선보다 폭이 더 넓었다. 747.879[nm]에서는 5[kPa], 758.848[nm]는 3.5[kPa] 그리고 773.25[nm]는 5.5[kPa]의 압력으로 헬륨을 주입하였다. 그림 8에서 측정치의 곡선은 RF-전력이 증가할수록 레이저출력이 현저하게 상

승하는 것을 보여주고 있다. 입력을 더 높임에 따라 레이저출력이 계속해서 상승함을 예측할 수 있으나 뚜렷한 포화상태는 아직 나타나지 않고 있다. RF-전극 사이에 섬락이 발생하기 때문에 RF-전력을 계속해서 높이는 것은 중지하였다.

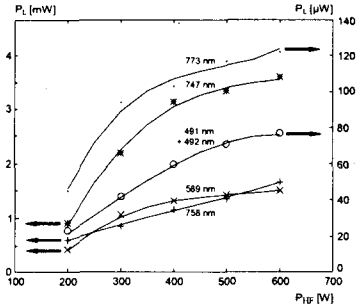


그림 8. RF-전력의 최적화
 Fig. 8. Optimization of RF-power

5. 결 론

현재까지 아연증기레이저는 직류방전과 홀로움극방전 및 RF-방전으로도 발전시킬 수 있었다. 표 1은 여러가지 운전방법에 따라 지금까지 발견된 가시광역 및 적외선영역의 레이저선들을 나타내고 있다. 본 연구에서는 자체 제작한 아연증기레이저의 방전관에 헬륨가스를 충전하고, 방전관의 길이를 따라 횡으로 고주파전극을 배치하였다. RF-전극을 통하여 13.56[MHz]의 고주파전력을 용량적으로 인가하여 아연증기레이저의 여기에너지로 사용하였다. 방전관 하부의 오븐에서부터 확산되는 아연 증기는 추가로 인가된 약한 직류방전의 전기영동의 효과로 음극쪽으로 이동하면서 방전관 전체에 고르게 분포되었다. 방출된 레이저선들의 파장은 다음과 같다: 491.162[nm], 492.403[nm], 589.433[nm], 747.879[nm], 758.848[nm], 773.25[nm]. 773.25[nm]의 선은 최초로 CCRF-여기에 의해 레이저발진이 성공하였다. 아연증기레이저는 이외에도 적색과 적외선영역에서 레이저의 발진이 가능한 5개의 선들이 있다.

레이저출력은 청색선 약 60[μW], 오렌지선 1.3[mW], 적외선에서는 747[nm]에서 3[mW], 758 [nm] 1.1 [mW], 773[nm]는 100[μW]를 방출하였다. 개개의 선들

에 대한 레이저파라미터들은 오븐온도 780~800[K], 헬륨압력 3.5~5.5[kPa]의 값에서 최적화 되었다. 고주파출력을 높일수록 레이저출력이 상승하였으나 전극 간의 섬락의 발생을 억제하기 위해 400[W]로 고정하였다.

표 1. 아연증기레이저의 레이저방출선

Table 1. laser lines of zinc vapour laser

(DC : 직류방전, HC : 홀로우음극방전, RF : 고주파방전, RF+DC : 본논문)

λ [nm]	천 이	여기과정	DC	HC	RF	RF+DC
491.162	$4f \ ^2F_{5/2}-4d \ ^2D_{3/2}$	전하이동	○	○	○	○
492.403	$4f \ ^2F_{7/2}-4d \ ^2D_{3/2}$	전하이동	○	○	○	○
589.433	$4s^2 \ ^2D_{3/2}-4p \ ^2P_{1/2}$	패닝충돌	○	○	○	○
602.118	$5d \ ^2D_{3/2}-5p \ ^2P_{1/2}$	전하이동	○	○	○	
610.249	$5d \ ^2D_{5/2}-5p \ ^2P_{3/2}$	전하이동	○	○	○	
621.461	$4s^2 \ ^2D_{3/2}-4p \ ^2P_{3/2}$	패닝충돌		○		
747.879	$4s^2 \ ^2D_{5/2}-4p \ ^2P_{3/2}$	패닝충돌	○	○	○	○
758.848	$5p \ ^2P_{3/2}-5s \ ^2S_{1/2}$	전하이동	○	○	○	○
761.29	$6s \ ^2S_{1/2}-5p \ ^2P_{1/2}$	전하이동	○	○		
773.25	$5p \ ^2P_{1/2}-5s \ ^2S_{1/2}$	전하이동		○		○
775.786	$6s \ ^2S_{1/2}-5p \ ^2P_{3/2}$	전하이동	○	○		
참고문헌			[8,9,10, 11,12,13, 14,15]	[14,15, 16,17,1 8,19]	[20,21]	본논문

본 연구는 경주대학교 2007년도 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] N. Reich, J. Mentel, G. Jacob, J. Mizeraczyk, "A cw HeKr+-laser with transverse radio frequency excitation", Appl. Phys. Letters, 64(4), 397, 1994.
 [2] N. Reich, J. Mentel, J. Mizeraczyk, "cw radio-frequency excited white-light He-Cd+ laser", IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 31, No. 11, pp. 1902-1909, 1995.
 [3] S. T. Choi, "capacitively coupled radio frequency discharge system for excitation of gas laser", J. KIEE, Vol. 20, No. 1, 19-26, 2006.
 [4] A. Fuke, Y. Tokita, K. Masuda, "Characteristics of 325-nm CW Oscillation of a Hollow Cathode He-Cd+ Laser", Jap. J. Appl. Phys. Vol. 28, No. 10, L1836, 1989.
 [5] B. Chapman, "Glow discharge processes", John Wiley & Sons, Ins. New York, 394-396, 1980.
 [6] D. Teuner, J. Schulze, E. Schmidt, J. Mentel, "Improvement of

the metal vapour distribution in CCF excited metal vapor ion lasers by cataphoresis", XVII International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Toulouse, France, 1997.
 [7] J. Mentel, E. Schmidt, T. Mavrudis, "Birefringent filter with arbitrary orientation of the optic axis : an analysis of improved accuracy", Appl. Optics, 31, No. 24, 5022, 1992.
 [8] G. R. Fowles, W. T. Silfvast, "Laser action in the ionic spectra of zinc and cadmium", IEEE J. Quantum Electron, 1(3), 131, 1965.
 [9] R. C. Jensen, G. J. Collins, W. R. Bennett Jr., "Charge-exchange excitation and cw oscillation in the zinc-ion laser", Phys. Rev. Lett., 23(7), 363-367, 1969.
 [10] A. L. Bloom, J. P. Goldborough, "New cw laser transitions in cadmium and zinc ion", IEEE J. Quantum Electron, 6(3), 164, 1970.
 [11] M. F. Sem, V. F. Keidan, V. C. Mikhalevskii, "Elektron. Tekh., Ser.1, Elektronika SVCh,"(in Russian), No.1, 69-76, 1971.
 [12] W. T. Silfvast, G. R. Fowles, B. D. Hopkins, "Laser action in singly ionized Ge, Sn, Pb, In, Cd, and Zn", Applied Physics letters 8(12), 318-319, 1966.
 [13] W. T. Silfvast, "New cw metal-vapour laser transitions in Cd, Sn, and Zn", Appl. Phys. Lett. Vol.15, No.1, 23-25, 1969.
 [14] M. F. Sem, V. S. Mikhalevskii, "Zh. Prikl. Spektrosk.",(in Russian), 6(5), 668-669, 1967.
 [15] E. K. Karabut, V. F. Kaydan, Kravchenko et al., "Elektron. Tekh., Ser.1 Elektronika SVCh,"(in Russian), No. 9, 103-108, 1969.
 [16] E. K. Karabut, V. S. Mikhalevskii, V. F. Papakin, M. F. Sem, "Continuous generation of coherent radiation in a discharge in Zn and Cd vapors obtained by cathode sputtering, Soviet Physics-Technical Physics, Vol.14, No.10, 1447-1448, 1970.
 [17] Y. Sugawara, V. Tokiwa, T. Iijima, "New cw laser oscillations in Cd-He and Zn-He hollow cathode lasers", Jap. J. Appl. Phys. 9(12), 1537, 1970.
 [18] J. A. Piper, P. Gill, "Output characteristics of the He-Zn laser", J. Phys. D: Appl. Phys. Vol.8, No.1, 127-134, 1975.
 [19] J. A. Piper, C. E. Webb, "A hollow cathode device for cw helium-metal vapour laser systems", J. Phys. D: Appl. Phys. Vol.6, No.4, 400-407, 1973.
 [20] E. L. Latush, V. S. Mikhalevskii, M. F. Sem, G. N. Tolmachev, V. Ya. Khasilov, "Metal-ion transition lasers with transverse hf excitation", JETP Lett., 24, No. 2, 69, 1976.
 [21] N. Sabotiniv, P. Telbizov, "He-Zn laser with a transverse high-frequency excitation, Optics Communication 59(4), 290-292, 1986.

◆ 저자소개 ◆

최상태 (崔相泰)

1957년 8월 8일생. 1984년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1992년 독일 Ruhr-Universität Bochum 전기공학부 졸업(Dipl. Ing.). 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(Dr. Ing.). 1998년~현재 경주대학교 컴퓨터정보전자공학과 부교수.