

헬륨 동위원소 및 헬륨필터를 사용한 셀레늄증기 다중광선레이저의 출력특성에 관한 연구

(A study on output power characteristic of selenium vapour multiline laser
using isotope helium and helium filter)

최상태*

(Sang-Tae Choi)

요 약

다중광선레이저인 셀레늄증기레이저에서 일반적으로 사용하는 ^4He 대신에 동위원소인 ^3He 을 펌핑가스로 사용하여 개개의 레이저선들에 대한 광이득과 레이저의 출력특성을 연구하였다. 또한 출력에 영향을 주는 헬륨의 순도는 특수 헬륨필터로써 개선하였다.

Output-coupling 출력과 소신호이득은 ^4He 의 경우 보다 ^3He 을 사용한 경우에 대부분의 선들에서 더 높게 나타났다. 특히 강력한 선들(497.6 nm, 499.3 nm, 506.9 nm, 517.6 nm, 522.8 nm, 530.5 nm)에서는 소신호 이득이 약 30% 더 높게, Output-coupling 출력은 2 배에서 3 배까지 더 높은 값을 보여 주었다.

Abstract

The paper presents the effects of output-coupling power and small signal gain of selenium vapour multiline laser by discharge of either ^4He or ^3He . The purity of the He gas was improved with a special He-filter. The result shows that compared with those of ^4He , the output-coupling power and small-signal gain of ^3He increase in the most of the lines. Especially, the small-signal gain of ^3He for the strong lines (497.6 nm, 499.3 nm, 506.9 nm, 517.6 nm, 522.8 nm, 530.5 nm) lies about 30% higher than that of ^4He , and the output-coupling power from doubles to triples.

Key Words : selenium vapour laser, isotope helium, helium filter, output-coupling power, small signal gain, birefringent filter

1. 서 론

오늘날 시장에 나와 있는 많은 레이저 시스템들은 과학과 공학 및 의학분야에서 서로 다른 여러 임무들을 수행하고 있다. 이러한 레이저들은 참고문헌에 기술된 것들의 단지 일부분에 속한다. 단지 전문과

* 주저자 : 경주대학교 컴퓨터전자공학부 조교수
Tel : 054-770-5180, Fax : 054-748-2895
E-mail : stchoi@kyongju.ac.kr
접수일자 : 2003년 12월 10일
1차심사 : 2003년 12월 15일 2차심사 : 2004년 1월 19일
심사완료 : 2004년 2월 9일

학자들에게만 알려진 레이저들 중에서 셀레늄증기 레이저는 특수한 응용 분야에서 큰 역할을 담당할 수 있는 특징을 가지고 있다. 셀레늄증기레이저는 가시광역대에서 46개의 분산된 선들을 방출할 뿐만 아니라 적외선 영역에서도 최소 10개 이상의 선들을 방출한다[1].

HeSe⁺-레이저는 각각 두 개의 선명한 청색선($\lambda = 460 \text{ nm}, 465 \text{ nm}$)과 적색선($\lambda = 644 \text{ nm}, 649 \text{ nm}$) 그리고 몇 개의 강력한 녹색선 ($\lambda = 506,86 \text{ nm}, 517,6 \text{ nm}, 522,7 \text{ nm}, 525,4 \text{ nm}, 530,5 \text{ nm}$)을 방출한다. 이 선들은 삼삼각형에서 모서리에 위치하므로 삼색선레이저를 실현시킬 수 있다[2]. 또한 이들의 혼합으로 백색광을 포함한 모든 색을 만들어낼 수 있다.

셀레늄증기레이저는 기체레이저인데, 셀레늄증기가 첨가된 헬륨방전내에서 이미 잘 알려진 헬륨네온 레이저와 비슷한 조건하에서 운전된다. 레이저광은 글로우방전의 양광주내에서 생성되는 여기된 셀레늄이온으로부터 방출된다.

본 연구의 목적은 셀레늄증기레이저에서 각각 ⁴He와 ³He를 충전가스로 사용했을 때 개개의 선들에 대한 레이저의 특성을 광이득과 출력의 측면에서 서로 비교 측정하는데 있다. 또한 헬륨의 순도가 레이저의 출력에 영향을 미침을 고려하여 특별히 제작된 헬륨필터를 통과한 헬륨을 레이저 튜브에 충전하였다. 순도가 향상된 헬륨을 사용함으로써 최적화된 레이저출력하에서 측정하고자 한다.

가스레이저인 He-Ne 레이저에서는 충전가스로 일반적으로 사용되는 ⁴He 대신에 동위원소인 가벼운 ³He를 사용했을 때 레이저 출력이 약 20% 정도 높아지는 것이 실험적으로 알려져 있다. 같은 온도 내에서는 ³He의 원자가 자신의 작은 원자질량으로 인해 ⁴He보다 열적 속도가 상대적으로 높아지게 된다. 그로 인해 ³He의 원자는 Ne 원자와 충돌이 더욱 잦아지고, 단위시간당 더 많은 에너지를 Ne 원자에 넘겨주게 되는데 기인한다. 이러한 효과는 He 방전을 여기원으로 사용하는 셀레늄증기레이저에서도 나타날 것으로 기대되고 있다.

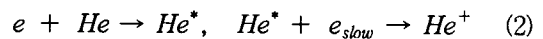
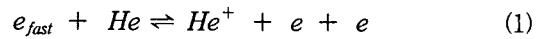
개개의 선들에 대한 레이저 변수들은 서로 큰 차이를 보이기 때문에 레이저 전체출력을 측정하기 보

다는 각 선들에 대한 개별적인 출력을 측정해야만 한다. 개개의 레이저선들을 선별하는데는 복굴절필터[3,4]를 사용하였다.

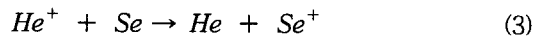
2. 셀레늄증기레이저의 개요

2.1. 셀레늄증기레이저의 원리

금속증기레이저인 셀레늄증기레이저의 능동매질로는 He 글로우방전을 사용한다. 여기서 He은 Se이온을 여기시키는데 펌핑가스로 작용한다. 음극으로부터 방출된 전자들은 전기장에 의해 양극 쪽으로 이동하고, He 원자들은 이 전자들과의 충돌로 인해 다음의 두 가지 반응식에 따라 이온화된다. 이때 전자들의 에너지는 He 원자로 넘겨진다.



He 이온과 Se 원자사이에서 전하이동충돌의 결과 여기된 Se 이온이 생성된다.



Se 이온이 레이저하준위로 천이할 때 레이저광으로 여기에너지의 일부가 방출되고, 계속해서 진공자외선(VUV)의 형태로 여러 가지 파장의 광자를 방출한 후 이온의 바닥준위에 도달한다. VUV 영역에서의 방출은 가시영역에서의 방출보다 더 높은 천이확률을 가진다. VUV 광선은 방전모세관의 내벽에 흡수되고, Se 이온과 전자의 재결합으로 레이저하준위는 빠른 속도로 비워진다. 이로써 반전분포가 크게 형성되고, Se 이온의 수많은 에너지준위가 여기되어 가시광역대와 적외선영역에 걸쳐서 많은 선들을 방출하고 있다.

2.2. 레이저튜브의 구조

그림 1은 석영유리와 듀란유리 부분으로 이루어진, 방전관 외부에 수냉각장치가 부착된 셀레늄증기 레이저의 레이저튜브를 보여준다. 유리관중심을 따라 위치한 석영모세관을 통과하여 양극과 음극사이에서 He 방전이 일어난다. 모세관의 양극쪽 끝에 위치

한 오븐을 가열하면 증기형태의 Se이 방전내부로 확산된다. He 이온과의 전하이동충돌로 생성된 증기형태의 Se 이온은 전기영동(Cataphoresis)의 효과로 음극 쪽으로 이동하고 양광주의 길이를 따라서 균일한 분포를 이룬다.

Se 이온이 음극에 직접 접촉하게 되면 화학작용으로 음극이 쉽게 손상되고, Brewster창문에 응결하게 되면 레이저출력이 감소하거나 방출이 중단된다. 가속된 Se 이온이 Brewster창문으로 향하는 것을 막고, 직접적인 음극에로의 도달을 방지하기 위해서 음극의 위치를 양극 쪽으로 완전히 치우치도록 제작하였다. He 방전은 외부에서 수냉식으로 냉각되는 응결방을 통과하도록 하였다. 그 결과로 Se 금속증기는 냉각된 응결방의 내면에 달라붙게 된다. 또한 방전관을 냉각시킴으로써 뜨거운 석영유리벽을 통과하여 확산되는 He의 손실을 줄일 수 있다. 방전경로인 모세관 내부는 상대적으로 높은 온도를 유지하기 때문에 내벽에 Se의 응결은 형성되지 않는다.

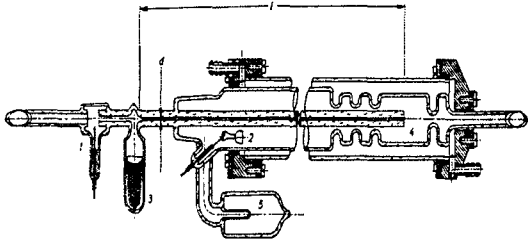


그림 1. 셀레늄증기레이저의 튜브구조 (외부수냉식 냉각장치 부착, 1:양극, 2:음극, 3:Se 오븐, 4:응결방, 5:헬륨필터, $l = 250 \text{ mm}$: 유효모세관 길이, $d = 1.5 \text{ mm}$: 모세관 직경)
Fig. 1. Structure of selenium vapour laser tube

2.3. 헬륨 필터

헬륨의 순도를 높이기 위한 방법으로 헬륨필터를 사용하였다. 그림 2는 그림 1의 5에 개략적으로 표시된 헬륨필터를 확대한 그림이다. 헬륨가스는 두께 1 mm의 석영유리로 제작된 필터를 통과하여 레이저 튜브 내부로 충전된다. 열선의 온도가 높아짐에 따라 필터가 가열된다. 결정내의 석영분자(SiO_2)들의 운동이 활발해지면 석영분자 사이의 공간이 확대되고 헬륨원자들이 필터를 통과해 튜브 내부로 확산된다. 불순물원자보다 현저히 그 크기가 작은 헬륨원

자들은 공간을 쉽게 통과할 수 있다. 반면에 불순물 분자들(O_2 , CO_2 , H_2O 등)은 헬륨원자보다 훨씬 크기 때문에 석영분자들 사이의 공간을 통과하지 못한다.

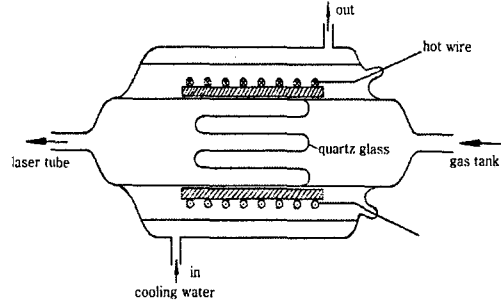


그림 2. 헬륨필터의 구조
Fig. 2. Structure of helium filter

3. 레이저의 Output-coupling 출력 및 소신호이득

3.1. 공진기출력과 Output-coupling 출력의 관계

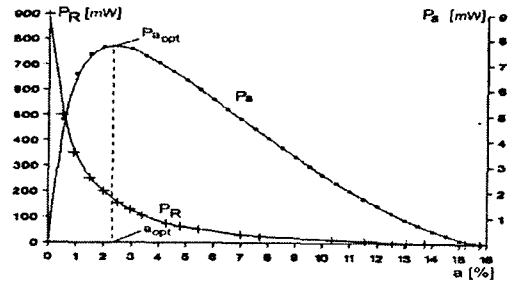


그림 3. 공진기출력 및 Output-coupling 출력
Fig. 3. Resonator power and output-coupling power

공진기출력을 공진기 밖으로 Output-coupling하기 위해서 공진기내부에 석영평판을 설치하였다(그림 4). 광경로축에 대한 유리판의 각도에 따라 각각 다른 Output-coupling을 a 가 주어진다. 그림 3는 공진기출력 P_R 과 Output-coupling출력 P_a 가 a 의 함수로 나타나 있으며 이들의 관계를 설명하기 위한 하나의 예시이다. a 가 0일 때 P_R 은 최대이다. a 가 증가함에 따라 P_R 은 급격히 감소하며, 특정값 a_{opt} 에서 최대로 가능한 출력값 $P_{a,opt}$ 이 주어진다. a 가 계속해서

증가하면 P_a 가 감소하고 P_R 도 계속 감소한다. Output-coupling율이 a_{max} 에 이르러서는 P_R 은 0이 되고 따라서 P_a 도 0이 된다, 즉 레이저의 발진이 중단된다. 공진기출력은 레이저매질의 이득과 포화현상에 의해 생성된다. 공진기의 손실이 최소로 유지될 때 레이저의 출력은 최고를 나타내며, 이 손실이 레이저의 능동매질을 통해서 보상되지 않으면 레이저의 발진은 불가능하다.

3.2. 소신호이득

본 연구에서는 공진기내부에 설치된 석영평판에 반사된 공진기출력의 일부가 Output-coupling되어 측정용 출력으로 이용된다. 석영평판의 반사율은 광축에 대한 각도에 따라 변화한다. 반사율 ρ_m^2 의 계산에는 Fresnel 공식이 사용된다.

$$\rho_m^2 = \left(\frac{n^2 \cos \alpha_m - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_m}}{n^2 \cos \alpha_m + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_m}} \right)^2 \quad (4)$$

위의 식은 굴절률이 n 인 석영유리판 표면의 반사율을 입사면에 평행하게 진동하는 레이저광의 편광 성분에 대하여 입사각 α_m 의 함수로써 나타내고 있다. 그림 4의 측정장치에서 고정된 석영평판의 입사각 α_m 은 레이저광의 반사손실을 최소화하기 위하여 각 선들에 대한 Brewster각에 근접한 54° 로 정확히 고정시켰다. 반사율로부터 Output-coupling을 a_m 이 결정된다.

$$a_m = 1 - (1 - \rho_m^2)^4 \quad (5)$$

식에서 지수 4는 광선이 석영평판을 왕복으로 통과할 때의 반사 횟수를 표시한다. 측정장치내의 회전하는 두개의 평판에 대해서도 동일하게 적용된다. 앞의 Fresnel 공식과 Output-coupling율은 회전각의 위치에 따라 새로이 결정된다.

$$\rho_{var}^2 = \left(\frac{n^2 \cos \alpha_{var} - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_{var}}}{n^2 \cos \alpha_{var} + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_{var}}} \right)^2 \quad (6)$$

$$a_{var} = 1 - (1 - \rho_{var}^2)^8 \quad (7)$$

광경로 내의 2개의 회전평판에 의해 8개의 반사광이 나타나고 지수도 8이 된다. 고정된 석영평판에서의 공진기출력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_R = \frac{P_m}{\rho_m^2} \quad (P_m = P_m' \cdot f_c) \quad (8)$$

여기서 P_m' 은 광검출기에서 읽어들이는 출력이고 f_c 는 포토다이오드와 편광판의 손실에 대한 교정인자이다. 두개의 Output-coupling율로부터 전체 Output-coupling을 a 의 값이 주어지고 Output-coupling 출력 P_a 가 결정된다.

$$a = (1 - (1 - \rho_m^2)^4 (1 - \rho_{var}^2)^8) \quad (9)$$

$$P_a = P_R \cdot a \quad (10)$$

레이저의 소신호 이득 g_0 은 레이저빛이 사라지는 순간의 최대 Output-coupling을 a_{max} 과의 관계로부터 결정된다.

$$g_0 = -\ln(1 - a_{max}) \quad (11)$$

4. 측정장치의 구조 및 시스템

4.1. 측정장치의 구조

레이저출력의 Output-coupling에 그림 4의 구조를 가진 측정장치가 만들어 졌다. 이것은 레이저방전관, 공진기거울, 석영유리판 그리고 복굴절필터 등으로 이루어졌다. 레이저방전관에서 방출되는 빛은 두 거울사이에서 왕복으로 반사되며, 레이저매질 내에서 증폭된다.

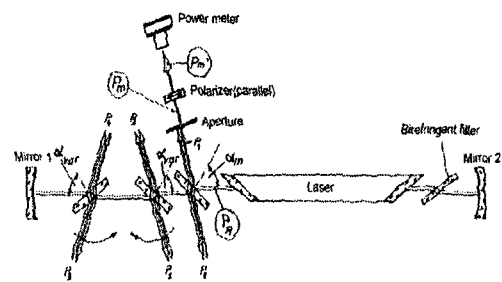


그림 4. Output-coupling출력의 측정구조
Fig. 4. Measuring structure of output-coupling power

레이저매질로부터 첫 번째 석영평판은 레이저선들의 파장에 대한 Brewster각에 아주 근접한, 광축에 $\alpha_m = 54^\circ$ 의 각도로 고정되어서 레이저광의 일부를 Output-coupling하는데 기여한다. 단지 이 평판에서 Output-coupling된 레이저광만이 측정되었다. 3개의 유리판의 앞뒤 경계 면에서 반사에 의해 각각 2개의 광선으로 이루어진 출력들이 P₁에서 P₆까지 나타난다. 하나의 광선에 대한 측정값으로만 계산이 이루어지므로, Output-coupling 평판의 뒷면으로부터 반사된 두 번째 광선은 조리개에 의해 차단된다. 측정기에 연결된 포토다이오드를 통해서 Output-coupling 출력이 측정된다.

두 개의 회전평판들의 각도를 변화시킴으로써 Output-coupling을 변화시킬 수 있다. 이들은 서로 마주보는 반대방향으로 같은 각도로 회전함으로써 두 개의 유리판에 의한 광경로차를 서로 보상한다. 이들의 회전위치에 따라 다른 값의 레이저출력이 Output-coupling된다. 최초의 측정시 이들은 레이저선들의 파장에 따른 Brewster각에 위치하고 있다.

포토다이오드 앞에는 편광판이 있다. 레이저는 공명기내에서 일반적으로 입사평면에 평행한 편광을 방출하지만, 입사면에 수직한 편광이 아주 일부이지만 생성될 수 있다. 특히 레이저광의 편광이 Brewster 창문의 입사면에 상대적으로 어긋날 때는 수직 편광은 측정값을 아주 크게 틀리게 하므로, 이 성분은 차단되어야 한다.

4.2. 복굴절필터

일반적으로 레이저공진기 내에서는 여러 파장의 광선들이 동시에 진동한다. 단일 파장의 선을 선택하기 위해서 공진기 내부에 반사손실이 적은 특수한 복굴절필터를 설치하였다. 이것은 복굴절성질을 가진 결정질로 된 얇은 원판으로 이루어졌으며, 표면에 수직으로 광축의 주위로 회전이 가능하다. 0°와 180°의 위치에서는 모든 파장의 선들을 통과시키고, 다른 위치에서는 회전각도에 따라 하나 혹은 몇 개의 선들을 통과시킨다. 레이저광은 공진기를 왕복함으로써 복굴절필터를 두 번 통과한다. 이 필터는 광축에 대해서 Brewster각도로 기울어져 있으며, 광선의 편광이 필터 위의 입사평면과 일치하도록 되어

있다.

입사하는 레이저광선은 필터를 통과하면서 상광선과 이상광선으로 나누어지는데, 이들의 편광은 서로 직각을 이룬다. 두 개의 파는 서로 다른 굴절률로 인해서 필터의 반대쪽에서는 위상차가 생긴다. 그러므로 두 개의 다른 편광은 필터의 반대쪽에서는 타원 편광의 빛으로 합성된다. 그 결과 공진기내의 모든 Brewster면에서는 부차적인 반사손실이 생긴다. 필터의 반대쪽에서 두 파의 위상차가 2π 의 정수배가 되면, 필터를 벗어날 때 그 파의 원래의 편광으로 되돌아간다. 이 경우에 필터는 공진기 내에서 손실을 야기시키지 않는다. 위상차는 광선의 파장과 두 파의 굴절률의 차이에 의해서 결정된다.

이 위상차는 크리스탈의 광축에 의존하기 때문에 필터표면에 수직으로 필터자체를 축주위로 회전시킴으로써 위상차를 변화시킬 수 있다. 고정된 위상차 $2\pi N$ 에 대해서는 필터의 통과파장의 곡선이 원판의 회전각 δ 의 함수로써 주어진다. 필터를 사용해서 각각의 선들을 선택할 수 있다. 그림 5의 필터곡선을 보면 일정한 회전각 δ 에서 여러 다른 차수 N의 곡선들이 좁은 간격으로 나타나므로 여러 개의 선들이 동시에 진동할 수 있다. 이것은 다른 두께의 필터들을 조합함으로써 해결할 수 있다. 그 외에도 필터표면에 대하여 광축을 더 기울게 함으로써 필터곡선의 경사도를 더 높일 수 있다. 본 연구에서는 독일의 Sprindler & Hoyer사가 제작한 두께 800[μ m]인 하나의 필터를 사용하였다.

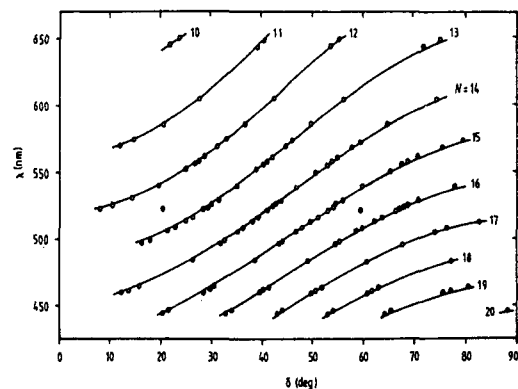


그림 5. 필터곡선
Fig. 5. Characteristic curve of birefringent filter

4.3. 전체적인 측정시스템

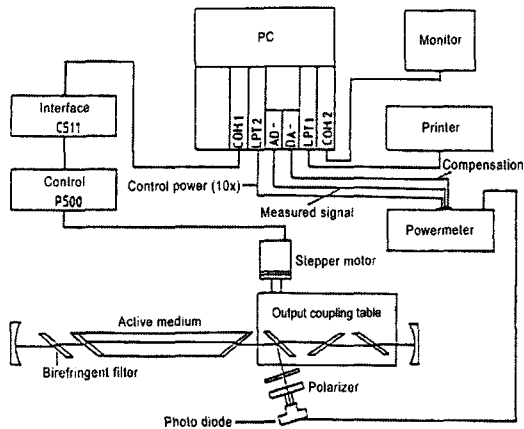


그림 6. 전체적인 측정시스템
Fig. 6. Full measuring system

그림 6은 컴퓨터로 제어되는 전체적인 측정시스템의 개략도이다. 시스템은 외부광의 검출을 막기 위해서 암실에 설치되었다. 포토다이오드는 선택된 레이저빔을 충분히 검출할 수 있을 정도의 크기를 가지고 있으며, 검출된 광은 Powermeter로 연결되어 그 측정치가 읽혀진다. 측정치는 공진기출력과 Output-coupling출력의 계산을 위해서 컴퓨터로 보내진다. 측정 중에는 두개의 회전 석영평판은 모터 제어에 의해 최초의 Brewster각에서 시작해서 0.02° 씩 회전한다.

5. 측정결과

최대의 레이저출력 하에서 측정이 이루어지기 위해서는 레이저변수들의 최적화가 필요하다. 먼저 헬륨을 레이저튜브에 충전하기 전에 필터에 통과시켜 불순물을 제거하였다. 순도가 높아진 ⁴He 및 ³He를 사용하여 레이저를 발진시켰다.

⁴He로 충전된 레이저방전관에서는 He 압력 P=7.5 mbar, 방전전류 I=280[mA] 그리고 Se 오븐온도 T=11.3[mV] (오븐내의 열전소자의 전압으로 표시)로 최적화 시킨 후 선택된 모든 선들이 측정되었다. 그후 ⁴He를 제거하고 대신 ³He을 충전한 레이저방전관에서 최적화된 변수들의 값은 P=19.5 mbar, I=310

[mA] 그리고 T=10.9[mV] 였으며, 복굴절필터에 의해 선택된 모든 선들을 측정하였다. 실험에 사용된 레이저방전관에는 길이 250[mm], 직경 1.5[mm]의 소형의 모세관을 사용하였으므로 적외선영역의 선들과 가시광역대 선들의 일부는 발견하지 않았다.

측정에서 525.3[nm]의 선은 항상 522.8[nm]의 선과 동시에 검출되었으나 전체적인 ³He의 효과에 대한 측정에는 영향을 주지 않으므로 두 선의 출력이 합쳐진 측정값을 525.3[nm]의 값으로 하였다.

좁은 파장대역별로 높은 반사율을 가진 총 4쌍의 공진기 거울(청:R=0.8 m, 녹:R=1.5 m, 황:R=1.0 m, 적:R=0.8 m)을 사용하여 선들의 파장에 따라 최대출력을 방출하도록 하였다. 이들은 측정되는 선들에 대해서는 높은 반사율을 나타내며 다른 선들은 통과시킨다. 회전평판의 각도에 따라 출력측정기에서 읽은 측정값 P'm으로부터 공진기출력 P_R, Output-coupling출력 P_a 그리고 Output-coupling을 a를 계산하였다. 이 계산들과 모터제어를 위해서 특별히 개발된 Software를 사용하였다.

⁴He와 ³He을 각각 사용한 셀레늄증기레이저에서 각 선들의 최대 Output-coupling출력 P_{a,opt}은 최소 75[μW]에서 최대 6.5[mW]의 범위에서 발진하였다. 개개의 선들에 대하여 ⁴He 방전과 ³He 방전에서의 P_{a,opt}을 측정한 결과를 그림 7에 나타내었다. 또한 최대 Output-coupling을 a_{max}를 바탕으로 한 소신호 이득 g₀를 서로 비교한 결과를 그림 8에 나타내었다. 대부분의 선들이 ³He 방전에서 더 높은 Output-coupling출력과 소신호 이득을 보여 주었다.

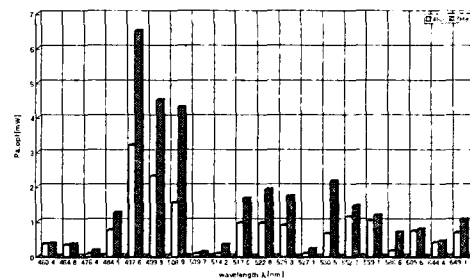


그림 7. 최대 Output-coupling출력 P_{a,opt}의 비교
Fig. 7. Max. Output-coupling power comparison

특히 강력한 선들(497.6 nm, 499.3 nm, 506.9 nm,

517.6 nm, 522.8 nm, 530.5 nm)은 평균 2배에서 3배까지의 $P_{a,opt}$ 값이 측정되었다. 이들 강력한 선들은 약한 선들 보다 ^3He 방전에서 소신호 이득의 증가가 현저하였고 평균 30 % 더 높게 나타났다. μW 단위의 약한 선들은 외부로부터의 아주 작은 영향에도 민감할 뿐만 아니라 출력증감의 폭이 다양하므로, 이들에 대한 최대 Output-coupling 출력과 소신호 이득의 비교는 강력한 선들에 비하여 신뢰도가 떨어진다고 볼 수 있다.

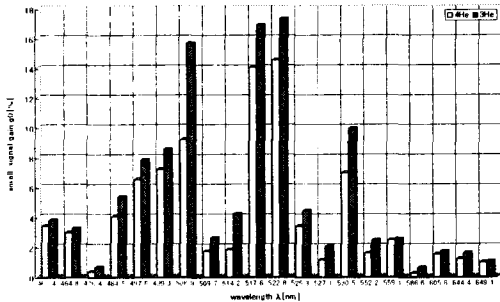


그림 8. 소신호이득 g_0 의 비교
Fig. 8. Small signal gain comparison

6. 결 론

필터를 통과한 헬륨가스는 불순물이 제거됨으로써 출력개선에 일차적으로 영향을 주며[5], 또한 동위원소 헬륨을 사용함으로써 이중으로 출력이 개선되는 효과를 기대하였다. 결론적으로, 셀레늄증기레이저에서 대부분의 선들이 자신의 소신호이득과 레이저출력이 증가됨을 확인하였다. 따라서 헬륨을 펄핑가스로 사용하는 금속증기레이저나 혹은 다른 기체레이저의 경우에도 헬륨필터를 사용하여 순도를 높이거나 동위원소를 사용함으로써 레이저출력을 향상시킬 수 있음을 기대한다. 금속증기레이저 중에서는 현재까지 유일하게 He-Cd 레이저가 325[nm]에서 연속파 자외선을 방출하고 있다. 레이저출력이 개선되면 향후 다른 금속증기레이저에서도 연속파 자외선발진의 실현가능성이 더욱 높아질 수 있을 것이다.

References

- [1] G. Roll and J. Mentel, "New laser lines in Se II discovered by gain measurements using amplified spontaneous emission", J. Phys. D: Appl. Phys. 22, pp. 483-487, 1989.
- [2] E. Schmidt, J. Mentel, K.-H. Krahn, "Three-color He-Se laser with optimized output power", Appl. Optics, 25, pp. 1383-1388, 1986.
- [3] F. Ortwein, J. Mentel, E. Schmidt, "A birefringent filter as a turning element for a multiline He-Se+ Laser", J. Phys. D: Appl. Phys. 22, pp. 488-491, 1989.
- [4] J. Mentel, E. Schmidt, T. Mavrudis, "Birefringent filter with arbitrary orientation of the optic axis: an analysis of improved accuracy", Appl. Optics 31, 5022-5029, 1992.
- [5] S. T. Choi, "Optical gain and output characteristic of selenium vapour multiline laser on purity of helium", J. KIIE, Vol. 16, No. 6, 60-65, 2002.

◇ 저자소개 ◇

최상태 (崔相泰)

1957년 8월 8일생. 1984년 영남대학교 전기공학과 졸업(학사). 1992년 독일 보훔 루르대학교 전기공학부 졸업(Dipl. Ing.). 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(Dr. Ing.). 현재 경주대학교 컴퓨터전자공학부 조교수.