

새 레이저펌핑光源 HCP

吳 喆 漢
(慶北大 師大 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 序 言
- 2. HCP의 構造
- 3. HCP의 特性
- 4. 다른 光源과의 비교
- 5. Iodine 레이저 펌핑
- 6. Xe 再結合 레이저
- 7. 色素 레이저
- 8. 結 言
 참고문헌

① 序 言

최근 Hypocycloidal Pinch (HCP) 장치로써 강력한 紫外線을 발생하여 이것으로 Iodine 레이저와 Xe 레이저를 펌핑하는데 성공한 보고가 나와 있다.¹⁾ 이어서 이와 같은 장치로써 Dye 레이저도 발생시킬 수 있다는 것도 보고 되어 있다.²⁾³⁾ 원래 이 HCP는 플라즈마 수렴장치로서⁴⁾ 放電할때 발생하는 光펄스의 rise-time이 빠르고 투입할 수 있는 에너지의 제한이 없으므로, 종래의 Xe-flashlamp에 비하여 훨씬 강력한 레이저펌핑원으로 기대되고 있다.¹⁾

지금까지 Iodine 光分解레이저를 펌핑하는데는 스펙트럼효율을 개선하고 出力을 높이기 위하여 Xe flashlamp 보다 나은 여러가지 光源들을 연구하여왔다. 즉 多重 spark gap⁵⁾, 表面放電⁶⁾, 플라즈마 加速器,⁷⁾ exploding wire⁸⁾ 그리고 레이저로 생성된 플라즈마⁹⁾ 등이 있다. 그러나 이 들은 스펙트럼분포나 光學의 不均一性 또는 유효 수명등이 高出力作動에 부적합하다. 한편 同位元素分離나 光化學의 應用에 필요한 高出力 色素 (dye) 레이저를 펌핑하는 데도 강력한 光源이 있어야 한다.

새로 개발된 HCP의 구조와 특성을 소개하고 Iodine 레이저, Xe 레이저 및 色素레이저를 펌핑하는

때 이 장치가 어떻게 이용되는 가를 간단히 기술하고자 한다.

② HCP의 構造

그림 1과 같이 1組의 HCP는 3개의 접시형 電極으로 구성되어 있다. 이 장치에 에너지를 투입하면 絶緣破壞는 먼저 두 電極사이의 絶緣體表面을 따라 일어나고 다음에는 두 電極사이에 電流板 (current sheet)를 만들게 된다. 上下의 두 電流板은 곧 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 의 힘을 받아 절연체로부터 떨어져서 中心軸으로 향하여 진행한다. 이 電流板은 최종적으로 서로 충돌하고 이때 최대의 電流가 흐른다. 이리하여 軸上的 두곳에 강한 磁氣핀치를 磁氣力線 ($B\theta$)에 의

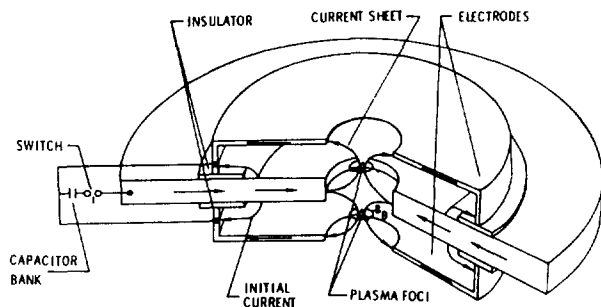


그림 1. 1組의 HCP 構造

하여 정해진 용적속에 수렴되는데 밀도가 높은 플라즈마變點을 만들게 된다.⁴⁾

이 장치는 원래 熱核融合條件에 가까운 高温, 高密度플라즈마를 이룩하는데 사용되었다.⁴⁾ 즉 플라즈마 電子溫度 $T_e = 1 \text{ kev}$ 이고 플라즈마 密度 $N_e = 10^{19} / \text{cm}^3$ 까지 발생시킬 수 있다. 그러나 동작조건을 바꾸면 T_e 와 N_e 는 각각 1 ev 와 $10^{18} / \text{cm}^3$ 로 낮출 수 있다.

이 장치를 레이저펄스에 이용할 때 그 길이를 길게 하려면 이 HCP를 여러조 연결하여 사용하면 된다. 그림 2는 3組의 HCP를 직렬로 연결한 것이다. 電極은 黃銅으로 만들고 절연체표면은 충전기체에 의한 오염을 방지하기 위하여 pyrex유리로 덮거나 테플론판으로 사용하면 된다. S.W. 는 高電流수송용으로 Trigatron이나 특별히 설계한 것을 사용해야 한다.

S.W. 를 넣으면 여러개의 케이블을 통하여 電流가 흐르게 되고 電流板은 처음 絶緣體表面에서 출발하여 中心軸으로 향하여 snowplow⁴⁾를 형성한다. 회로의 임피던스, 충전기압등을 조절하여 플라즈마 環이 中心軸 근처에 발생하도록 조절한다.

충진기체로서는 He, Ar, Xe을 사용할 수 있고, 기압은 0.13 pa ~ 53 kPa범위내에서 사용한다.

그림 2의 I, II, III組를 병렬로 연결할 수 있다. 병렬로 연결하면 HCP 자체의 임피던스는 감소하나 capacitor bank에 저장된 에너지가 放電時에 HCP 쪽으로 적게 투입되는 결점이 있다. 반면에 직렬연결때 보다 電壓의 ringing period와 光펄스의 rise-time이 짧아지는 장점이 있다.

그림 2속의 점선은 放電플라즈마의 최종단계를 나타낸 것이다.⁴⁾ 직렬로 연결하여 放電하면 7개의 電極사이에서 放電이 일어나서 소위 segmented coaxial discharge를 이루게 된다.

방출광의 강도와 스펙트럼을 비교하기 위하여 나선형 Xe flashlamp (Korad K-2 laser system)를 사용하였다.

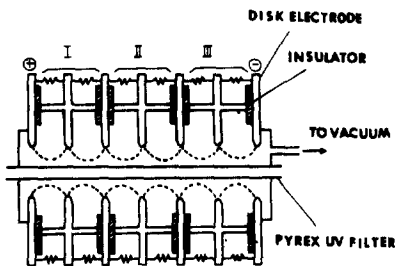


그림 2. 3組의 HCP 장치

③ HCP의 特性

(1) UV 스펙트럼

그림 3은 HCP로부터 발생하는 近紫外線 스펙트럼을 Xe flashlamp와 비교한 것이다. 한개의 작은 거울을 HCP 軸上的 레이저관속에 45°로 넣고 그것에서 반사광을 分光器로써 측정한 것이다. 10~15 KJ 정도로 저속된 에너지를 공급할때 UV 펄스폭은 대개 10~1000 μs이다. 일반적으로 HCP스펙트럼은 Xe flashlamp보다 300 nm이하에서 강한 연속방사를 하는 것을 알 수 있다. 그리고 HCP방사는 이 스펙트럼 영역내에서 강한 선 스펙트럼을 나타낸다.

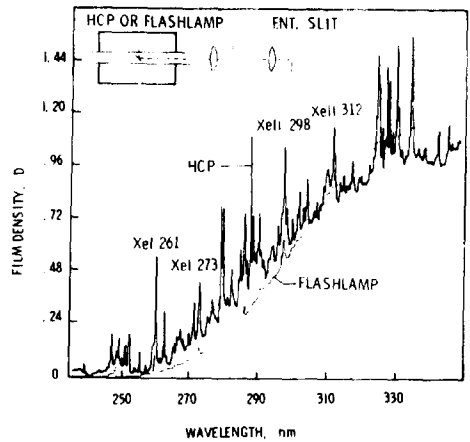


그림 3. UV 스펙트럼

(2) UV 펄스의 出力

HCP 스펙트럼내의 全露光量은 Xe flashlamp보다 약 50% 높다. 그러므로 flashlamp의 UV出力은 약 1 MW로 알려졌기 때문에 그리고 HCP 플라즈마가 전체 길이에 대하여 일정한 강도를 가졌다면 HCP의 UV出力은 약 150 MW로 추정할 수 있다.

HCP에 있어서는 電極의 그늘효과를 고려할 수 있는데 이것을 감안하면 UV강도는 최대치의 반으로 감소한다. 그러므로 HCP에서 방사하는 총UV 출력은 112 MW인데 이것은 分光光度計로 측정할 값과¹⁰⁾ 거의 일치한다.

UV방사의 재현성은 레이저관속에 넣어둔 작은 거울에서 반사된 UV의 강도를 관측하므로서 알 수 있다. UV에 감도가 좋은 光電管-오실로스코프로서

간섭필터 ($\lambda = 275 \pm 1.5 \text{ nm}$)를 통하여 강도를 측정할 수 있다.

(3) 光펄스의 角分布와 軸上分布

UV 방사 的 角分布와 軸上分布는 그림 4 및 5와 같다. 이것은 축상에 둔 작은 거울을 회전하거나, 軸上移動을 하여 측정할 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 360° 회전 시켜보면 제 1 피이크의 강도는 거의 일정함을 보여준다. 이것은 HCP 내의 極間絶緣體를 통하여 전영역에서 강도분포가 일정하고 따라서 放電分布가 균일함을 말해준다. 그러나 제 2, 제 3 펄스는 일정하지 않다. 이러한 多重펄스는 放電回路의 振動成分때문이며 이것을 제거함으로써 개선할 수 있다.

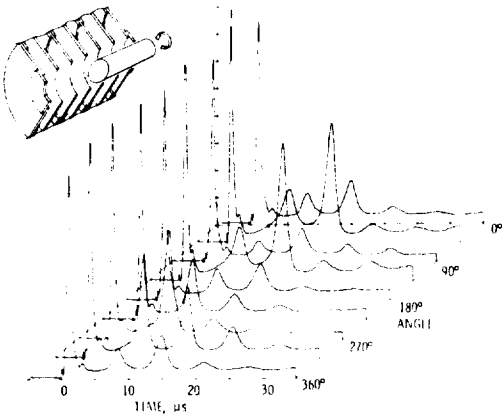


그림 4. 光펄스의 角分布

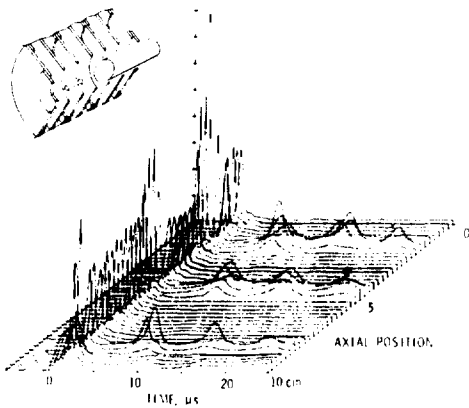


그림 5. 光펄스의 軸上分布

한편 光펄스의 축상변화는 그림 5와 같다. 최대치와 최소치사이의 간격은 電極間隙에 해당한다. 이것은 電極의 그늘효과(shadow effect)를 나타낸다. 이러한 축상변화는 레이저펌핑에 있어서 그렇게 해로운 것은 아니다. 그늘효과를 줄이기 위해서는 電極의 끝을 가늘게 설계해야 한다.

氣體의 종류를 바꾸거나 氣壓을 바꾸면 조금씩 달라진다. 重水素를 사용하면 665Pa (5 Torr)에서 최대의 방출을 나타낸다. 그러나 강도변화가 크다. 그런데 氣壓이 증가함에 따라 再現性은 더 좋아진다. Ar 이나 Xe 은 20 Torr 정도의 저기압에서는 강도가 낮지만 100 Torr 정도의 고기압에서는 강도도 높고 재현성이 좋아진다.

④ 다른 光源과의 비교

표 1은 최근 Fisk¹¹⁾ 등에 의하여 수집한 것으로 Iodine 레이저를 펌핑하기 위하여 사용된 각종 光源들이다. 최하단에는 HCP 에 관한 것을 나열하였다. 이들 광원의 대부분은 고임피던스 光源이기 때문에 펄스폭의 최소치가 약 1 μs 이다.

HCP는 앞에서 언급한 바와 같이 2개의 同心電流通路를 만든다. 이系の 임피던스는 電流板이 축상으로 이동함에 따라 0에서 최대치로 증가한다. 임피던스의 주성분은 誘導性리액턴스이다. HCP의 경우 電極間隙이 2.5 cm 이고 반경이 10cm인 경우 총임피던스는 3.5 nH에 불과하다. 이 값은 다른 UV 光源에 비해 대단히 작다. 그러므로 HCP 광펄스의 rise-time이나 펄스폭은 외부회로의 임피던스에 의하여 결정된다. 그러므로 1 μs 이하의 광펄스를 얻기 위해서는 超高速(저임피던스) capacitor bank나 Blumlein 電源을 사용해야 한다.

光源의 밝기는 표 1에 나타난 것과 같다. HCP의 電流板은 처음 絶緣體表面에서 형성되어 나중에는 電極의 증기가 포함되어 絶緣體표면을 증착하게 된다. 그러므로 강도는 表面放電 및 金屬증착형과 비슷하다.

UV 형광효율은 표 1의 제 4열에 나타나 있는데 이것은 Iodine 레이저의 펌핑때 (band)내에 있는 UV 복사에너지를 축전기의 저장에너지로 나눈 값이다. 앞에서 말한 바와 같은 이유때문에 HCP에 의한 형광효율은 表面放電이나 금속증착한 Xe-flashlamp와 동일하다. HCP의 수명은 아직 결정되지 않았다. 그러나 대단히 길다고 생각된다. 종래의 flashlamp의 석영과과는 대조적으로 HCP는 金屬電極으로 구성되었고 이것이 또한 眞空箱子도 된다. 석영유리관을 HCP

표 1. Iodine 레이저 펄핑용 방전형 광원

| 펄핑 광원 | 펄스폭(μs) | 밝기(J/cm^2) | uv형광효율(%) | 수명(방전수) | 기술개발 |
|-----------------|----------------|----------------|-----------|----------|------|
| 직선 Xe flashlamp | 1 | 0.5 | 4 ~ 5 | $< 10^5$ | 개선형 |
| 금속 증착형 | 1 | 1 | 8 ~ 15 | 10^5 | 원형 |
| 동축 Xe flashlamp | 1 | 1 | 4 ~ 5 | | 개선형 |
| 표면방전 | 1 | 1 | 9 ~ 13 | | 원형 |
| Exploding wire | 10^4 | 1 | 4 ~ 5 | | 개선형 |
| Hg lamp | 10 | 0.035 | 32 | 10^8 | 개선형 |
| HCP | 1 | 1 | 4 ~ 13 | 무한 | 원형 |

축상에 삽입고정해 두고 사용하면 관벽은 외부로부터 플라즈마에 의한 압력을 받는데 비하여 flashlamp는 내부 압력에 의하여 폭발하게 된다. 그러므로 HCP 장치는 flashlamp 보다 더 많은 電流密度를 허용하게 된다.

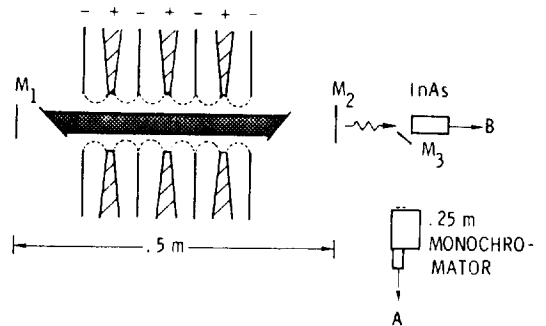
그림 6은 HCP의 動作範圍를 상용화된 Xe flashlamp와 비교한 것이다. flashlamp의 입력에너지는 光펄스폭이 1000 μs 일때 1 kJ/in 로 제한되어 있다. 放電時間이 짧아지면 입력에너지는 더 감소한다. 이 제한에너지는 그림 6과 같이 석영관의 폭발에너지에 의하여 결정된다. 3가지 HCP I, II, III에 대한 입력에너지를 조사한 결과 flashlamp보다 2~3배 높음을 알 수 있다. HCP 장치의 폭발한계는 아직 정해지지 않았으나 이 장치는 모두 金屬電極箱子로 이루어 졌기 때문에 실제로는 폭발할 염려는 없다.

앞에서 설명한 바와 같이 HCP의 펄스폭은 주로 외부의 回路와 電源에 의하여 결정된다. 그러므로 HCP의 동작범위는 입력에너지를 줄이지 않고도 펄스폭을 줄일 수 있다. 이 기능이 레이저의 出力을 높

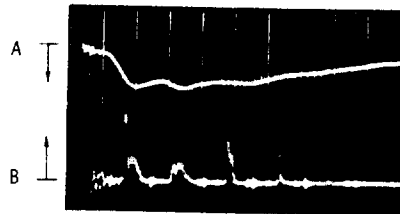
이고 UV 복사를 이용하는 光化學에 대단히 중요하다.

5 Iodine 레이저 펄핑

HCP 장치로서 iodine 레이저를 펄핑할 수 있음을 실증하기 위하여 그림 7의 (a)와 같이 장치한다. 두 개의 거울 M_1, M_2 는 HCP 축상에 둔 석영관 (길이 15cm)의 양끝으로부터 약 50cm 떠어 놓았다. 레이저관은 0.1 Pa 까지 진공시키고 새 레전터기체 (laserant gas)를 대회 충전한다. 사용한 기체는 iodide ($n-C_3F_7I$)이다. InAs 검출기로서 측정한 레이저



(a) 실험장치



(b) 광펄스와 레이저펄스

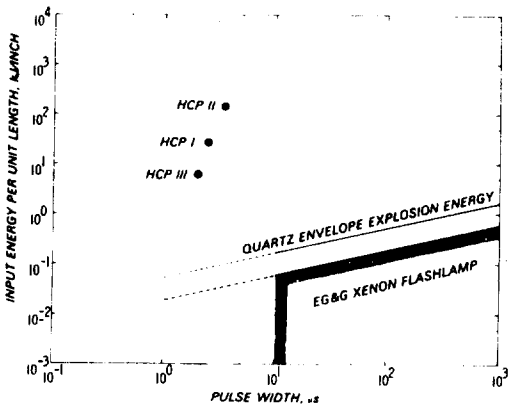


그림 6. 입력에너지의 비교

그림 7. Iodine 레이저

出力은 10 ~ 35 W이다. 검출기 A로써 측정된 레이저 펄스와 검출기 B로써 측정된 펌핑광펄스는 그림 7의 (b)와 같다. 광펄스는 약 30 μ s의 폭을 가졌는데 이것에 대하여 레이저펄스는 4개의 펄스가 나타났다. 반폭치가 약 1 μ s인 레이저펄스가 펌핑광의 UV 피크에 나타난다. 레이저의 최대치는 약 30 W인데 13 KJ로 입력한 나선형 Xe flashlamp의 경우보다 약 5배나 강하다.

이와같이 HCP는 짧은 폭을 가진 高出力에너지에 적합하고 반면에 flashlamp는 긴펄스폭을 가지는 레이저를 펌핑하는데 적합하다.

⑥ Xe 再結合 레이저

그림 8는 HCP 장치로서 Xe 再結合레이저를 펌핑하는 實驗과 그 레이저펄스이다. HCP 축상양단에 Brewster window를 부착하여 空洞을 만들고 그 양쪽에 거울 M_1 , M_2 를 두어 共振器를 이룬다. 그러므로 電氣放電은 空洞내에서 일어나고 따라서 電氣的 펌핑을 하게된다. 거울 M_1 은 99.9%, M_2 는 90%의 反射率(2.0 μ m에서)을 가졌다. 펌핑광의 길이는 15cm이고 共振器의 길이는 75cm이다. 충전기체는 66 kPa의 He에 0.01 ~ 10% Xe을 혼합하여 사용하였다. 2.027 μ m의 Xe레이저가 플라즈마 내에서 電子-이온 再結合에 의하여 발생한다. HCP내에서 생성된 플라즈마는 공간적으로 주기적 강약상태를 나타내는데 만약 플라즈마 강도가 일정하면은 이득이 더 증가할 것이다.

그림 8의 오실로그래프는 여러가지 기압의 He에

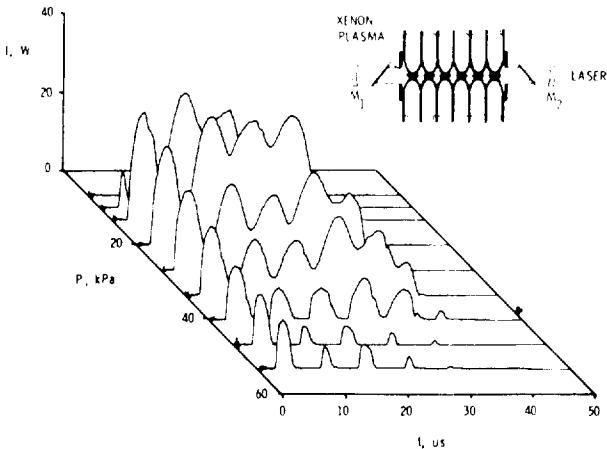


그림 8. Xe 레이저 펄스

0.1% Xe를 혼합했을 때 발생하는 2.027 μ m의 Xe 레이저펄스를 나타낸다. 제 1펄스는 최대 UV 방사후 2.6 μ s 늦게 발생한다. 이 지연은 再結合레이저에서 기대되는 값이다. 20kPa에서의 레이저出力은 약 35 W이고 3.5 μ s의 반폭치를 가졌다. 기압이 14 ~ 34kPa에 대해서 레이저펄스폭은 대단히 크고 최대치는 다르지만 연속 레이저를 관측할 수 있다.

⑦ 色素레이저

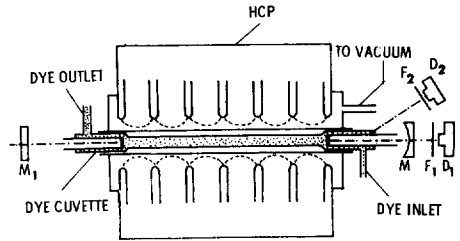


그림 9. HCP에 의한 色素레이저

그림 9는 HCP (3組) 장치로서 色素레이저를 발생하는 장치의 개략도이다. 色素레이저의 경우는 UV가 방해가 되므로 이것을 차단하는 것이 필요하다. 그러므로 HCP中央軸上에 파이렉스관을 넣고 그 내부에 dye cuvette를 장치한다. 그리고 색소용액은 소형 펌프로서 흐르게 한다. 色素로서 Rhodamine 6 G를 사용할 때에는 거울 M_1 , M_2 가 中心波長이 590nm이고 반사율이 각각 100%, 95%인 것을 사용하면 된다. 그림에서 D_2 는 HCP에서 발생하는 放電光을 550nm의 filter (F_2)를 통하여 강도를 측정하고 D_1 은 10^{-4} Neutral density filter (F_1)를 사용하여 레이저펄스를 측정한다. Rhodamine 6 G는 대개 10^{-4} 몰의 농도를 가지도록하면 되고 qencher로서는 COT를 소량 첨가하면 된다.

그림 10은 Ar을 HCP에 충전하여 기압은 200 Torr이고 인가전압이 15 kV일때의 펌핑광펄스(F)와 레이저펄스(上)의 오실로그래프이다. 550nm의 광펄스의 반폭치는 약 30 μ s임에 대하여 레이저펄스는 약 12 μ s에 해당한다. 그리고 레이저 출력은 최대치가 대략 400 W로 추정한다.³⁾

특히 色素레이저에 있어서는 펌핑광의 균일한 분포와 광을 받지 못하는 소위 dead length 문제를 충분히 고려하여야 한다. 펌핑광은 dye cuvette에 대하여 角分布가 균일하여야 하고 dead length는 가급적 작은 것이 좋다.

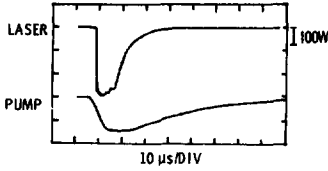


그림 10. 색소레이저 펄스

結 言

HCP는 사용하는 기체의 종류와 기압에 따라서 스펙트럼효율을 높일 수 있는데 可視영역으로부터 紫外線영역까지의 펌핑光源으로 사용할 수 있다. 특히 강력한 UV 광원으로 효과가 크며 스펙트럼의 넓은 영역이 요구되는 色素레이저에도 유력시된다. 그리고 HCP는 저임피던스이고 투입가능한 에너지가 Xe-flashlamp에 비하여 훨씬 크므로 高出力펄스레이저 개발에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 생각한다.

Iodine 光分解레이저, Xe 再結合레이저 및 Rhodamine:6 G의 有機體레이저 등 각종 레이저에 다양하게 적용될 수 있으므로 그 활용도가 점점 크질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) Ja H. Lee, D.R. McFarland, F.Hohl, Appl, Phys. **19**(19), 3343 (1980)
- 2) H. Rieger, K.K. Kim, J. Appl. Phys. **52** (8), 5381 (1981)
- 3) 吳喆漢, 새물리, **22** (4), 330 (1982)
- 4) J. H. Lee, D.R. McFarland, F.Hohl, Phys. Fluids **20**, 313 (1977)
- 5) P.Gensel, K.L. Kompa, J. Wanner, Chem. Phys. Lett. **7**, 583(1970)
- 6) R.E. Beverly 111, R.H. Barnes, C. E. Moller, M. C. Wong, Appl. Opt. **16**, 1572 (1977)
- 7) A.S. Kamrukou, et al, Kvantovaya Electron. Moscow **3**, 2023 (1976)
- 8) B.L. Borovich, V.S. Zuev, et al, Sov. J. Quantum Electron **4**, 1268 (1975)
- 9) W. T. Silfvast, O.R. Wood II, IEEE J. Quntum Electron. QE-11, 10 (1975)
- 10) J. H. Lee, D.R. McFarland, Va. J. Sci. **29**, 183 (1978)
- 11) G. A. Fisk, et al, "The Atomic Iodine Laser", SAND 78-1071, Sandia Lab, p. 29 (1978)