질소레이저의 제작과 질소기체의 온도변화에 따른 출력특성 연구*

양준묵 · 김원호 · 김기덕
충남대학교 물리학과
이 치 원
공주전문대학
추 한 태
금오공과대학교

(1995년 2월 28일 받음)

질소 기체의 온도변화에 따른 질소 레이저의 동작 특성을 조사하고, 실험에 의해 얻은 E/P 값을 이론치와 비교 연구하였다. 이를 위하여 레이저 관의 길이가 200 mm이고, 다중 평행판 축전기형 전송 회로 및 질소 기체의 온도 조정 장치로 구성된 질소 레이저를 제작하였다. 반복률 20 Hz에서 스파크 갭의 전극 거리 4 mm일 때 최대출력을 얻었으며, 최적동작 조건은 질소 기체 온도 30℃, 기체 압력 70 torr 이었다. 이때의 E/P는 411 V/cm·torr이었다. 한편 질소 기체의 온도가 증가함에 따라 최적 동작 조건은 높은 압력 쪽으로 이동하는 경향을 보였고, 이때 E/P 값은 감소하는 것으로 나타나 이론과 어느 정도 일치함을 알 수 있었다.

*I. 서 론

질소 레이저는 짧은 펄스폭(subnanosecond)과 큰 출력(~ 수 MW)을 갖기 때문에 동위원소 분리,[1] 각종 재료의 형광 분석, laser flash photolysis에 의한 초고속 반응의 측정,[2] 고속 사진 촬영, photoacoustic spectroscopy 등에 이용되고 있으며 특히 색소 레이저의 펌핑[3,4] 및 실험실에서의 주요 광원 등으로 그 효용도가 매우 높다.

이러한 질소 레이저는 그 전기적 회로 구성과 발진 방법 및 실험 조건에 따라 레이저의 출력과 안정성, 그리고 효율 등에 큰 차이를 보이고 있으며 많은 발전을 보여왔다.

한편 이론에 의한 연구 역시 많은 발전을 하였는바 그 중에서도 D.C. Cartwright,[5] B. Godard[6] 등에 의하여 레이저의 동작 특성을 결정짓는 중요한 인자인 E/P (electric field/pressure)[6] 값이 계산되었다. 여기서 B. Godard는 E/P 값의 산출에 대하여 질소 기체의 온도를 0℃로 가정하고 상태 밀도 반전의 확률이 가장 높은 전자에너지를 16 eV로 정하여, 최적의 $E/P \cong 250$(V/cm torr)을 얻었다. 이에 대하여 전기장(E)의 상승 등에 의한 연구는 되어 왔으나 질소 기체의 온도 변화에 따른 레이저의 동작 특성 조사에 관한 실험적 연구는 없었다. 즉, 본 연구에서는 최적의 동작특성을 갖는 질소 기체의 온도를 실험으로 구하고자 한다. 또한 본 연구에서는 상기의 여러 연구 결과에 따른 이론을 이용하여 $E/P = 5.92 \times 10^{-4}/T$(V/cm torr)를 얻었고, 이것은 레이저의 최적 동작 상태에서 질소 기체 압력(P)이 전기장(E)과 온도(T)에 정비례함을 알았다. 이에 따라 질소 기체의 온도 변화에 따른 질소 레이저의 출력 특성을 실험으로 조사하여 그 결과를 이론과 비교하였고, 아울러 스파크 갭(spark gap)의 전극 거리 변화가 레이저의 동작 특성에 미치는 영향도 함께 연구하였다. 이 실험을 위하여 고전압 펄스형 전원과 다중 평행판 축전기형 전송 회로[7] 및 self trigger 스파크 갭을 사용하는 질소 레이저를 설계 제작하였는데, 특히 본 실험의 연구 목적에 적합하도록 레이저 관내의 주전극은 온도 조정이 가능토록 하였다.

*이 연구는 학술진흥재단(1993/9-1994/8)의 지원에 의해 수행되었음을 감사드립니다.

II. 이론적 고찰

질소 레이저는 자외선 영역(337.1 nm)의 2nd positive band($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$)[8]에서의 전자 천이로부터 얻어진다. 질소 분자에 고전압 고전류의 펄스가 가해지면 고에너지의 전자 충돌에 의하여 질소 분자들은 기저 상태인 $X'\Sigma_g^+$에서 상준위인 $C^3\Pi_u$ 내의 여기 단면적이 큰, 즉 진동 양자수 $v'=0$과 $v'=1$로 대부분 여기 된다. $B^3\Pi_g$로의 여기는 $v''=0\sim5$로 많이 일어나는데, 이때 질소 레이저의 발진에 기여할 밀도 반전은 상준위의 $v'=0$과 하준위($B^3\Pi_g$)의 $v''=0$, $v''=1$ 사이 및 상준위 $v'=1$과 하준위의 $v'=0$에서 대부분 일어나게 된다. 이렇게 여기된 질소 분자는 Franck-condon 원리[9,10]에 의해 특히 $v'=0\rightarrow v''=0$로의 천이에 따라 파장 337.1 nm가 가장 강하게 나타남은 잘 알려진 사실이다. 전술한 바와 같이 질소 레이저의 발진은 고에너지 전자 충돌에 의하여 밀도 반전을 이룬 후, 자발적인 천이에 의하여 일어나게 되는데, 이때 레이저의 동작 특성 결정에 하나의 지표가 되는 물리 상수로서 E/P 값이 있다. 이 값에 대하여는 Cartwright가 계산한 질소 분자의 여기 산란 단면적[5]을 이용하여 B. Godard가 최적의 범위를 이론적으로 제시하였다. 특히 Cartwright는 전자 천이 진폭(electronic transition amplitude)에 기본을 둔 Frank-Condon 근사에 의해 전자 천이에 대한 총 산란 단면적을 측정 계산하였다.

즉 천이 $n''v''\rightarrow n'v'$에 대한 산란 단면적은

$$\sigma_{n''v''}^{n'v'}(k_0)=\int I_{n''v''}^{n'v'}(k_0,\ \theta,\ \phi)d\Omega_{\theta,\phi} \tag{1}$$

로 표시된다. 여기서 k_0는 입사 전자 에너지에 대한 wave number이고, $I_{n''v''}^{n'v'}$는 미분 단면적[5]이며 n과 v는 각각 전자 양자수(electronic quantum number) 및 진동 양자수(vibrational quantum number)이다.

따라서 특정 전자적 상태($\chi_{n''v''}^{n'}$)에 대한 총 산란 단면적은, 식 (1)로부터 v'를 모두 합한 식

$$\sigma_{n''v''}^{n'}(k_0)=\sum_{v'}\sigma_{n''v''}^{n'v'} \tag{2}$$

이 되어 전자천이(electronic transition)를 이해하는데 매우 유용하다. 한편 Godard는 질소 분자에 대한 $C^3\Pi_u$ 준위의 산란 단면적의 극대점은 14 eV 근처에서 나타나지만[6] 곡선이 대칭성을 갖지 않으므로 $C^3\Pi_u$와 $B^3\Pi_g$ 준위 사이에서 가장 높은 밀도 반전이 되기 위해서는 전자가 14 eV 보다 약간 높은 16 eV의 에너지를 가진다고 보아, 이에 대한 평균 자유 행로 λ를

$$\lambda=(\sigma N)^{-1} \tag{3}$$

식으로 계산하였다. 여기서 N은 단위 체적당 분자 수이고 σ는 총 산란 단면적이다. 이에 따라 Godard는 전자의 평균 자유 행로는 Cartwright가 제시한 총 산란 단면적 $\sigma\simeq5\Pi a_0^2$을 이용하여

$$\sigma\cong4.40\times10^{-20}\ (m^2) \tag{4}$$

가 됨을 밝혔다. 여기서 a_0는 Bohr의 수소 원자 반경이다. 한편 기체의 상태 방정식 $PV=\bar{n}RT$와 총 분자수 $N_m=\bar{n}N_A$으로부터

$$N=\frac{N_m}{V}=\frac{N_A}{R}\cdot\frac{P}{T} \tag{5}$$

가 된다. 여기서 $\bar{n}$은 mole 수이고 N_A는 Avogadro 수이다. 그러므로 단위 체적당 분자수 N을 구하기 위하여 $R=8.31$ J/mol·K과 식 (5)를 이용하면

$$N=7.24\times10^{-22}\frac{P}{T}(m^{-3}) \tag{6}$$

이 된다.

또한, 식 (4)와 (6)을 식 (3)에 대입하면

$$\lambda=3.14\times10^{-4}\frac{T}{P}(\mathrm{m}) \tag{7}$$

을 얻는다.

그런데 질소분자의 상태밀도 반전에 관계되는 $C^3\Pi_u$ 준위에 대한 전자에너지 충돌 단면적의 그래프[6]를 보면 최대치에 대하여 대칭이 아니므로, 따라서 상태밀도 반전의 확률이 가장 큰 전자에너지의 범위 12～16 eV의 중간 값인 14 eV를 가장 이상적인 단일전자 에너지 값으로 정하고[11] 식 (7)로부터 최적 E/P 값을 구해보면

$$E/P=\frac{14}{\lambda}=\frac{4.45\times10^4}{T}\ (V/m)\ (\mathrm{N/m^2})^{-1}$$
$$=\frac{5.92\times10^4}{T}\ (\mathrm{V/cm\cdot torr}) \tag{8}$$

를 얻는다.

기체 레이저에 있어서 E/P 값은 최적 레이저 동작에 기여하는 중요한 인자이나 대부분의 연구자들이 질소 기체 온도를 0℃[6] 또는 27℃[13]로 가정하여 최적 E/P 값을 계산 하였다. 본 연구에서는 식 (8)에서 알 수 있는 바와 같이 E/P는 온도 T의 함수이므로 최적 레이저 동작에 기여하는 질소 기체의 온도를 실험적으로 입증

하여 보고자 하였으며 아울러 전기장 E값에 대하여 P와 T가 정비례 관계를 갖고 있는지를 실험적으로 규명하고자 하였다.

III. 실험 장치 및 방법

1. 레이저 관

레이저 관은 질소 기체의 온도를 조정할 수 있도록 설계 제작되어야 하며 그 개략도는 그림 1과 같다.

레이저 관의 재료는 베이크라이트로 그의 외형은 높이, 길이, 폭 등을 각각 85 mm, 237 mm, 168 mm으로 하였다. 레이저 관내의 주전극은 길이 197 mm, 두께 10 mm인 구리로 만들었고, 주전극 사이의 간격은 8 mm로 고정하였다. 이 주전극과 전송회로의 접속은 최단거리로 하여 납으로 용접하였다.

레이저 관내의 질소 기체의 온도 조정과 그 측정은 질소 기체의 열용량이 매우 작을 뿐만 아니라 실험중 계속 흘려 보내 주어야 하므로 어려운 점이 많다. 본 실험에서는 역으로 열용량이 작다는 그 점을 이용하였으며, 질소 기체가 직경 6 mm인 관 a로 흐르도록 하고 이어서 등간격으로 뚫린 지름 1 mm의 모세관(모두 17개)을 지나도록 하였다. 이로써 모세관을 통과한 질소기체는 이 레이저 전극(편의상 이 전극을 음극으로 사용하였음)의 온도와 거의 같은 온도가 될 것이며, 그때의 레이저 전극의 온도를 질소기체의 온도로 정의하여 온도조정을 하였다.

다음으로 정확한 온도 조정을 위하여 b에는 열선을 삽입하고 c에는 냉각수가 흐를 수 있도록 하였다. 또한 음전극의 온도 측정은 알코올 온도계와 열전대를 사용하였다.

한편, 레이저 관의 양단에 부착시킨 출력창은 지름 25 mm, 두께 2 mm인 수정을 사용하였으며 반사경은 지름 25 mm, 곡률 반경 2 m인 오목거울에 알루미늄으로 완전반사 코팅을 하였다.

2. 다중 평행판 축전기형 전송회로

다중 평행판 축전기형 전송회로는 외형은 작아도 축전용량을 크게할 수 있는 전송회로[14]이다. 절연 재료로 두께 0.35 mm의 mylar film을 사용하였고, 도체로는 두께 0.1 mm의 황동판을 사용하였다. 이 전송회로의 도체는 E(earth)형, D(discharge)형 및 A(anode)형으로 구성되어 있으며, 이들 각 도체 사이에는 mylar film 7장(두께 2.45 mm)을 삽입하여 높은 내전압을 갖도록 하였는데 그 모양과 조립방법은 그림 2와 같다.

이렇게 제작된 다중평행판 축전기형 전송 회로의 축전용량은 펄스 발생용과 에너지 축적용이 각각 8 nF이고,

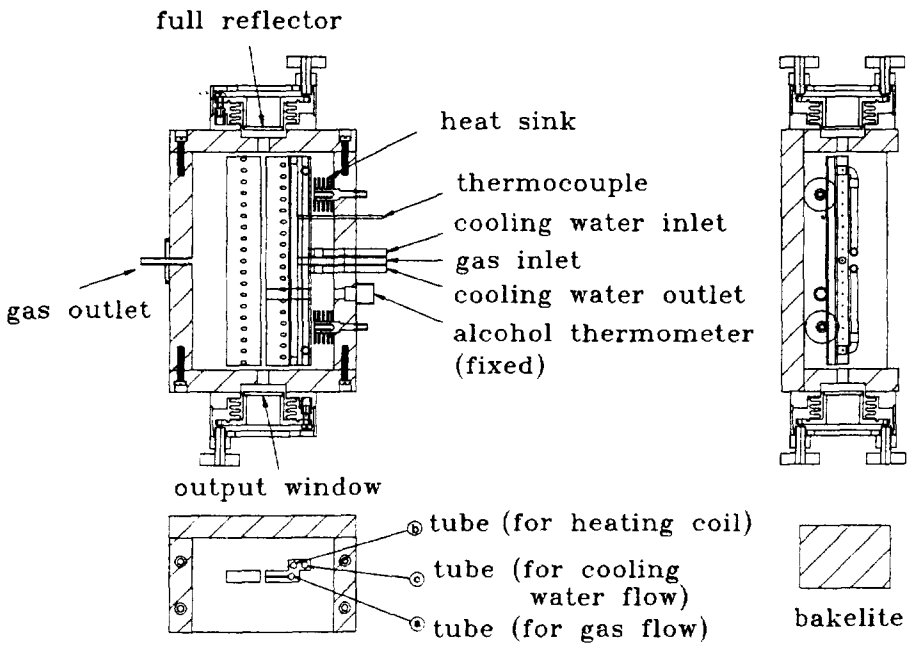


그림 1. Cross sectional view of laser tube.

그의 외형은 길이 385 mm, 폭 130 mm, 두께 197 mm로 하였으며, 두께는 주전극의 길이와 같게 하였다. 이와 같이 완성된 전송 회로의 *A*와 *D*단자는 레이저 관에, 그리고 *D*와 *E*단자는 스파크 갭[13]에 접속하였는데, 조립된 전체 모습의 개략도를 그림 3에 보였다.

전송회로에 공급하는 전원으로는 펄스형 고전압 전원[14]을 사용하였고, 그의 회로구성을 그림 4에 보였다.

IV. 실험 및 결과

1. 실험

질소 기체는 단위 체적당 기체의 열용량이 레이저 관내의 구리 전극의 열용량보다 상당히 작기 때문에 레이저의 음전극의 미세한 관을 빠져 나오는 순간의 기체 온도가 레이저 cavity내의 전체 온도와 같다고 볼 수 있다. 이에 따라 질소 기체의 온도를 실험조건에 따라 일정하게 유지 해주기 위하여 레이저 전극을 가열도하고 냉각도 할 수 있도록 하였다.

질소 기체의 온도 측정은 전술한 바와 같이 음전극

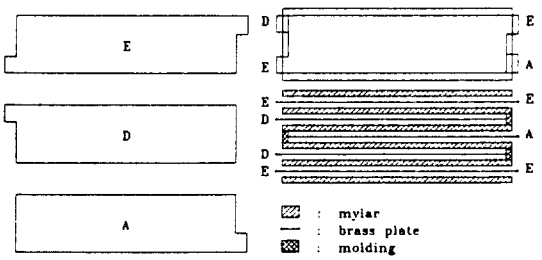


그림 2. Design of Blumlein transmission line circuit.

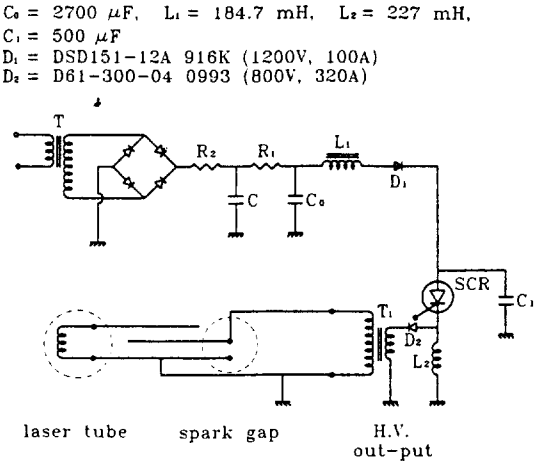


그림 4. Electric circuit of pulse type high voltage power source for this laser system.

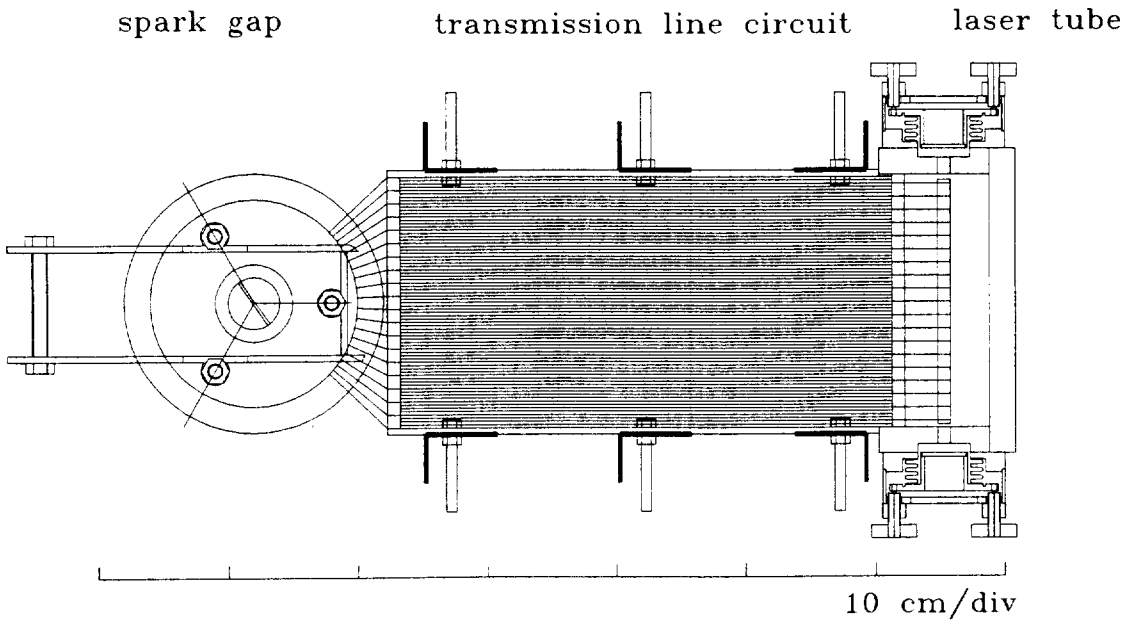


그림 3. N_2 laser system(front view).

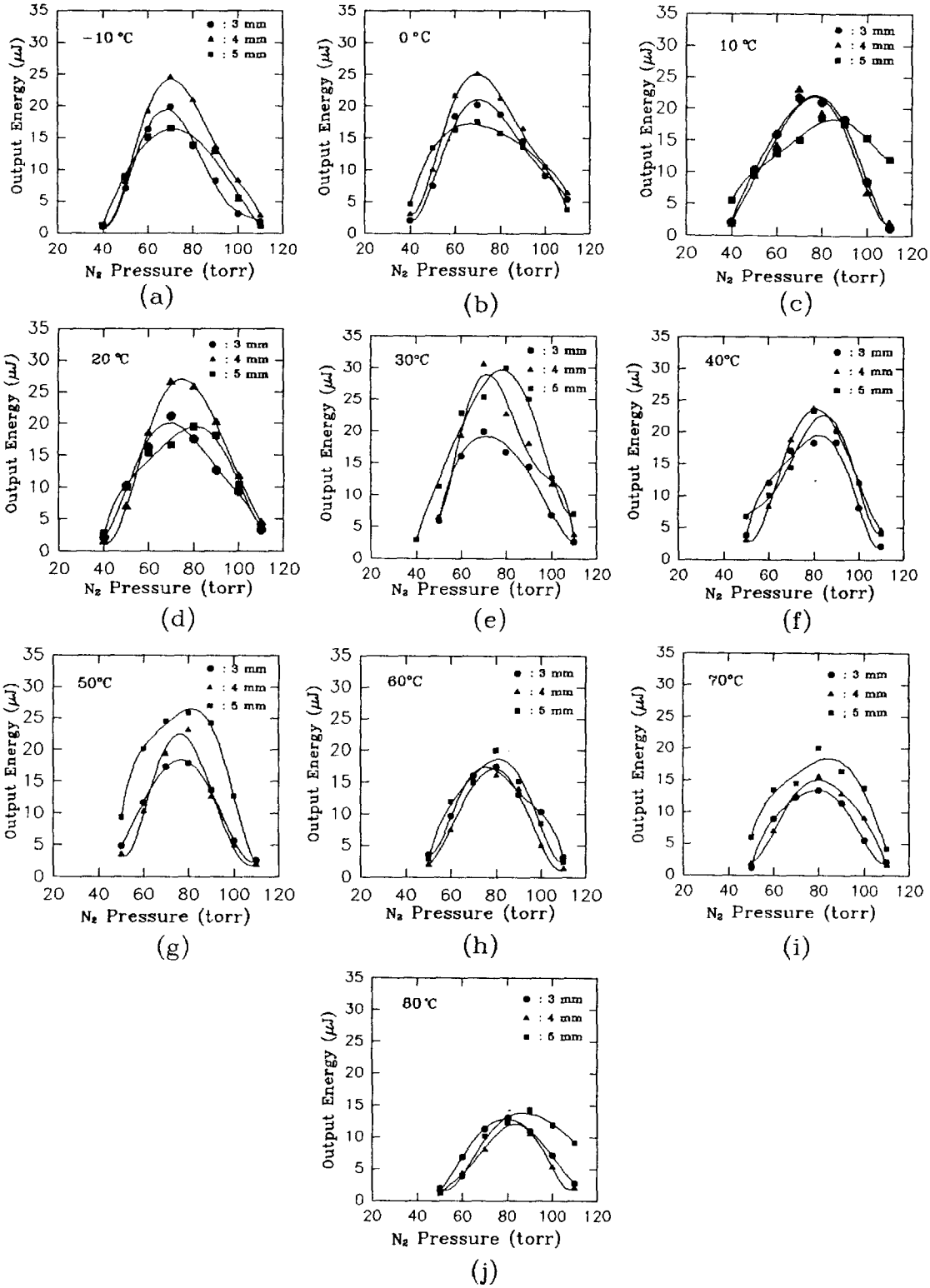


그림 5. Laser output energy vs. N_2 pressure for different spark gaps(a-j).

자체의 온도와 질소 기체의 온도를 같다고 보고 이들이 일정 시간 평형을 유지하는 상태에서 측정되었다.

본 연구의 주된 목적이 질소 기체의 온도 변화에 따른 질소 레이저의 최적 동작 조건을 구하고 그때의 E/P 값을 얻기 위한 것이므로, 질소 기체 온도를 －10℃부터 80℃까지, 기체 압력은 40에서 140 torr까지, 그리고 스파크 갭의 전극 거리는 각각 3 mm, 4 mm, 5 mm로 변화시켜 가면서 실험을 하였다. 한편 레이저 관내의 주전극 거리는 8 mm, 또 반복률은 20 Hz로 하였다.

질소 레이저는 파장이 자외선 영역이고 펄스 지속 시간이 ns-order이므로 detector의 rise time이 수 ns 범위 내에 있어야 한다. 따라서 본 실험에서는 펄스폭이 1 ns～1 ms까지 측정 가능하고, 출력도 수 μJ에서 2 J까지 측정 가능한 RSP-734 Pyroelectric Probe와 RJ-7610(Laser Precision Corp.) Energy Radiometer를 사용하여 측정하였다.

2. 결과

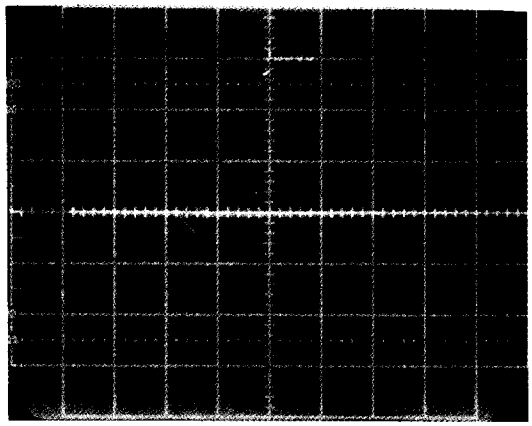
그림 5는 질소 기체 온도가 스파크 갭의 전극 거리 그리고 질소 기체의 압력 변화에 따른 레이저의 출력 특성 실험의 결과를 보인 것이다.

동작 특성 실험에 있어서는 전술한 바와 같이 스파크 갭의 전극거리는 변경하되 레이저 펄스마다에 공급되는 전기에너지를 일정하게 유지하기 위하여 고전압 펄스형 전원 장치의 축전기 C_1에 입력되는 전압은 400 VDC로 일정하게 유지시켰다. 주방전 순간의 스파크 갭 전압은 oscilloscope(TEKTRONIX 5441 storage)와 분압기(배율 1 : 1000)를 이용하여 측정하였는데 그 전압 변화 모습이 그림 6에 보인다.

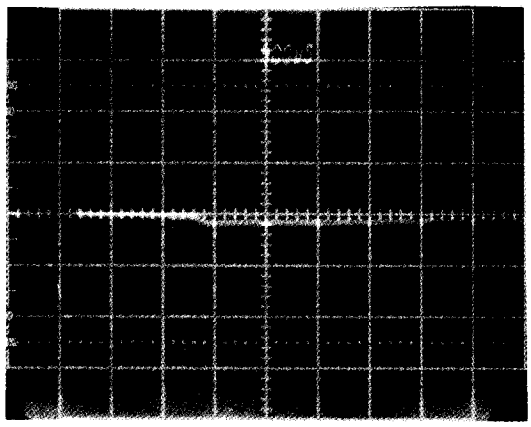
그림으로부터 스파크 갭의 전극 거리가 3 mm, 4 mm, 5 mm에 대하여 방전 전압은 각각 19000 V, 23000 V 및 27000 V가 되므로 레이저 공진기내의 전기장 E를 알 수 있으므로 E/P가 산출된다.[15,16]

그림 5의 (a)～(j)로부터 각 곡선의 최고점을 레이저 동작 특성의 최적 조건으로 볼 수 있으므로, 이로부터 얻은 각 기체 온도 변화에 따른 최적 동작점을 그림 7에 나타내었다. 또한 최적 동작 상태에 대한 E/P 값은 각각의 온도에 대하여 출력이 최대가 되는 점이 나타내는 질소 압력, 스파크 갭 거리 및 스파크 갭의 전압으로부터 얻었는데 이를 그림 8에 나타내었다.

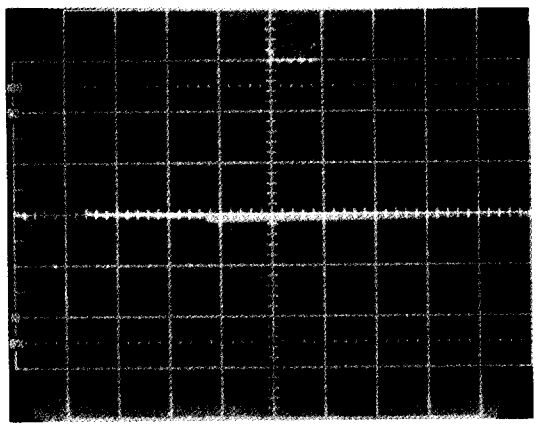
그림 7에서 보인 바와 같이 레이저의 최적동작에 대한 질소 기체 온도는 30℃이며 질소 기체의 온도가 높아질수록 그리고 스파크 갭의 전극거리가 좁아질수록 레이저의 출력 및 안정성은 감소하였다.[14,16,17] 그림 8은 질소



(a) Spark gap: 3 mm



(b) Spark gap: 4 mm



(c) Spark gap: 5 mm

그림 6. Voltage of spark gap; space of spark gap (a) 3 mm, (b) 4 mm, (c) 5 mm.

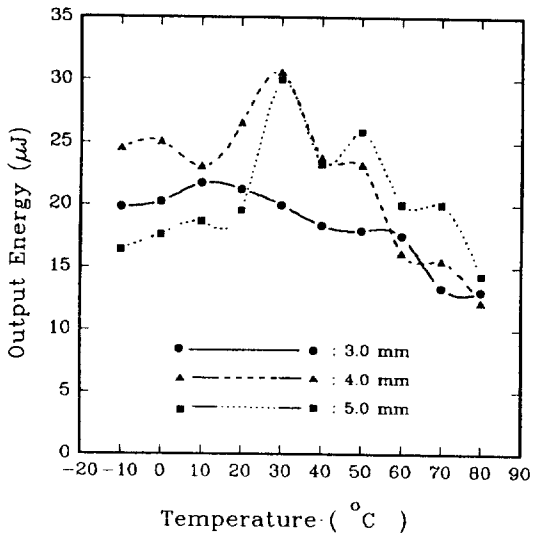


그림 7. Laser output power at optimum state vs. N_2 gas temperature for different spark gaps.

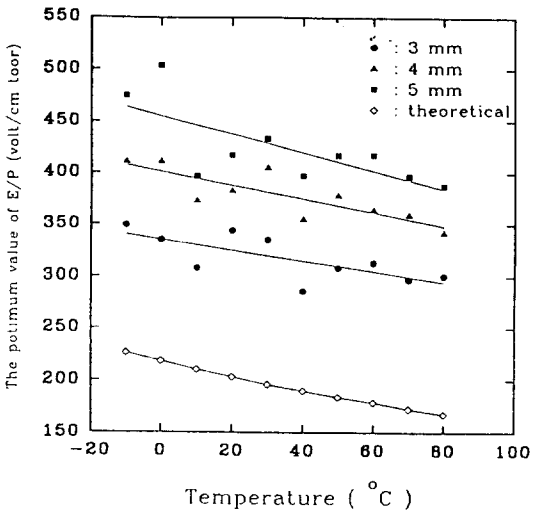


그림 8. *E/P* on the optimum condition vs. N_2 gas temperature for different spark gaps.

기체의 온도 및 스파크 갭의 전극거리변화에 따른 *E/P* 값의 관계를 나타낸 것으로 스파크 갭의 전극거리가 작고 온도가 높을수록 *E/P* 값은 전체적으로 감소한다는 사실을 보여주고 있는데, 이때의 기울기는 대략 −0.75 V/cm·torr·*C* 로 이론적으로 얻은 값과 대략 일치하였다. 그리고 최적온도인 30℃에서 *E/P*값은 411 V/cm·torr이었는데, 대체로 실험에서 얻은 *E/P* 값은 이론값보다 최소 100 내지 최대 250 V/cm·torr 높게 나타났다.

V. 결 론

질소 레이저 설계시 필요한 질소 기체의 온도를 이제까지는 0℃ 또는 27℃로 가정하여 사용하여 왔다. 이 연구에서는 그 온도를 실험으로 구하였으며, 27℃와 대략 일치하는 30℃를 얻었다. 이를 위하여 정전용량 8 nF의 다중 평행판 축전기형 전송회로 및 고전압 펄스형 전원을 사용하는 질소 레이저를 설계 제작하였고, 실험 결과 최적 동작 조건은 스파크 갭의 전극 거리 4 mm일 때, 질소 기체 온도 30℃ 및 질소 기체 압력 70 torr이었고, 사용한 반복률은 20 Hz였다. 이때의 *E/P* 값은 411 V/cm·torr로 이론치 195 V/cm·torr 보다 매우 컸다. 또한 온도가 상승함에 따라 *E/P* 값도 감소함을 확인하였는데, 그 기울기는 −0.75 V/cm·torr·℃이었고, 이론치와 대략 일치하였다.

참 고 문 헌

[1] J. P. Singh and S. N. Thakur, J. Sci. Ind. Res., **39**, 613(1980).
[2] E. Voigtman, *et al.*, Anal. Chem., **53**, 1443(1981).
[3] 공홍진, 한국과학원, 박사학위 청구논문 (1980).
[4] G. W. Scott, S. G. Z. Shen and A. J. Cox, Rev. Sci. Intstrum., **55**, 358(1984).
[5] D. C. Cartwright, Phys. Rev. A, **2**, 1331(1970).
[6] B. Godard, IEEE J. Quantum Electronics, **QE-10**, 147(1974).
[7] 양준묵, 이치원, 안근옥, 새물리 **28**, 79(1988).
[8] R. W. Nicholls and A. T. Stewart, In atomic and molecular Processes (Academic press, New York, 1962), chap. 2.
[9] C. S. Willet, *Introduction to Gas Lasers* (Pergamon press, Oxford, 1974), p. 346.
[10] G. Herzberg, *Spectra of Diatomic Molecules* (Van Nosrand Co. Inc., 1950).
[11] D. C. Cartwright, S. Trajmar, A. Chutjian, W. Willams, Phys. Rev. A **16**, 1041(1977).
[12] 한영진, 신현준, 김달우, 임충수, 새물리, **32**, 43 (1992).
[13] 양준묵, 이치원, 추한태, 새물리, **29**, 291(1989).
[14] C. B. Collins, IEEE J. Quantum Electron, **QE-20**, 47(1984).
[15] 선양래, 온도의 계측, 과학평론사 (198), chap. 2.
[16] B. Gianetas, P. Persephonis and R. Rigopoulos, Rev. phys. Appl, **20**, 671(1985).
[17] A. Nomura, Y. Saito and T. Kano, 應用物理, **52-11**, 982(1982).

Studies on the Constructions and Gas Temperature Dependence of the Output Power in a Nitrogen Laser

Joon-Mook Yang, Weon-Ho Kim and Ki-Dock Kim
Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Chi-Weon Lee
Kongju National Junior College, Kongju 314-040, Korea

Han-Tae Choo
Kumoh National University of Technology, Kumi 730-701, Korea

(Received: February 28, 1995)

The reported temperature of nitrogen gas in the design of nitrogen lasers was either 0℃ or 27℃. We found, through experiments, the optimum operational temperature was 30℃, roughly consistant with the reported value of 27℃. We have designed and fabricated a nitrogen laser which consists of multiple parallel plate capacitor type transmission circuitry of 8 nF and a pulse type high voltage power supply. For the optimum operation of the laser, we have found that the temperature of the nitrogen gas was 30℃, the gas pressure 70 torr and E/P 411 V/cm·torr at the repetition rate of 20 Hz. With the increase of the nitrogen gas temperature, the optimum nitrogen gas pressure was found to increase but the value of E/P decrease with the slope of -0.75 V/cm·torr·℃. These results agrees well with the theory.