

거리측정용 고반복 Nd:YAG 레이저 발진부 설계

박용찬*, 최영수, 김현규, 권우근, 강용철
국방과학연구소

Design of High Repetition Nd:YAG Laser Transmitter Module for Rangefinder

Y. C. Park, Y. S. Choi, H. K. Kim, W. G. Kwon, E. C. Kang
Agency for Defense Development

Abstract

In this paper, The laser transmitter module is designed as the subsystem of the high repetitive laser rangefinder. The module consists of high voltage power supply, high voltage control circuits, high voltage discharger, electro-optic Q-switch driver, and laser resonator. The high voltage power supply is composed of 2-phase flyback converter. And it has 220W power level and 78% conversion efficiency. From the Q-switch driver of the crossed porro resonator, the phase retardation voltage is switched from 600V to -1500V with 200ns falling time. The module can be operated up to 15Hz. And it generates the laser pulse which has 20ns width and 80mJ.

I. 서 론

레이저 거리측정기는 수 MW의 레이저 출력과 수 mrad 정도의 광 발산각을 유지해야 한다. 또한, 공진기의 광학정렬은 외부환경에 의한 진동이나 충격에도 견딜 수 있는 높은 안전성이 요구된다.^(1,2) 현재 널리 사용되고 있는 거리 측정용 레이저로는 1.06 μ m 파장의 Nd:YAG, 10.6 μ m의 CO₂, 그리고 1.54 μ m의 Ramann Shifted Nd:YAG 및 Er:Glass 레이저 등이 있다.^(3,4,5)

레이저 발진부는 고전압 공급장치, 고전압 방전회로, 전자광학 Q-스위치 구동장치, 그리고 레이저 공진기 및 냉각장치로 구성된다. 고전압 공급장치는 레이저 발진에 필요한 전기에너지를 공급하기 위한 것으로서 고전압 변환장치와 제어장치로 구성된다. 고전압 방전회로는 PFN(Pulse Forming Network)과 섬광관 트리거장치로 구성된다. 전자광학 Q-스위치 구동장치는 짧은 레이저 펄스를 얻기위한 것으로서 지연회로와 전압 변화시간이 빠른 고전압 펄스발생기로 구성된다.

본 논문에서는 반복율 15Hz, 출력에너지 80mJ, 펄스폭 20ns인 레이저를 얻을 수 있는 1.06 μ m 파장의 Nd:YAG 레이저 발진부를 설계하였다. PFN은 2LC구조로 구성하였으며, 2상의 flyback형 직류전압 변환기로서 220W의 출력을 얻을 수 있는 고전압 공급

장치를 제작하였다. 또한, Q-스위치를 위해 달합전압(-0.6kV)에서 열립전압(+1.5kV)으로의 상승시간이 200ns인 Q-스위치 구동장치를 제작하였다. 진동이나 온도변화에 민감한 레이저 공진기의 안정도를 높이기 위하여 포토프리즈를 사용하였으며, 냉각방식은 공냉식으로 하였다.

II. 설계 및 실험

발진부를 설계함에 있어서 첫번째 고려대상은 그림 1과 같이 시간에 따른 동작순서이다. 전원(24V)이 연결되고 고전압 공급장치의 동작이 가능하도록 Converter Enable 신호가 인가되면 최소한 66ms 이내에 15J의 전기에너지가 PFN에 충전된다. 레이저 발사신호를 인가하면 섬광관을 트리거시키기 위하여 16KV의 고전압 펄스가 발생되고 PFN에 저장된 에너지가 섬광관을 통하여 방전된다. 이때 섬광관의 저항은 매우 작으므로 일정시간 동

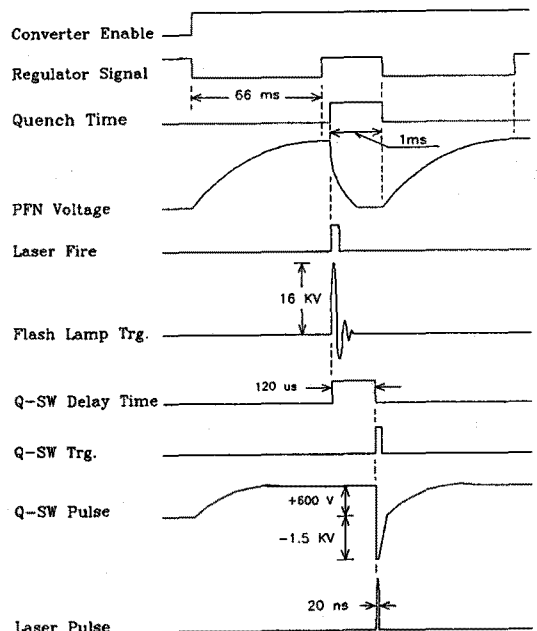


그림 1. Nd:YAG 레이저 발진부의 동작순서.

안 고전압 변환을 중지시키는 장치가 필요하다. 섬광관 트리거 신호를 기준으로 일정시간(밀도반전이 최대가 되는 시간, 약 120 μ s)이 지연된 후에 하강시간이 빠른 고전압 펄스가 Pockels Cell에 인가되면 20ns 정도의 짧은 레이저 펄스가 발생된다.

1. 고전압 공급장치

일반적으로 직류전압을 승압시키는 방법으로는 직류를 교류로 변환시켜 변압기를 이용하여 권선비 만큼 승압시킨 후 다시 정류회로를 통하여 직류전압으로 변환시키는 push-pull 방식과 반주기 동안에는 인덕터에 에너지를 저장하였다가 다음 반주기 동안에 저장한 에너지를 축전기로 넘겨주는 flyback 방식이 있다.^(6,7,8) 본 논문에서는 전압가변이 용이하고 장치의 경량화를 위하여 2상으로 구성된 flyback방식의 고전압 공급장치를 설계 하였다.

레이저 발진을 위하여 요구되는 PFN 충전에너지는 15J이며 초당 최고 반복률 15회를 고려할 경우 225W의 전력소모가 예상된다. 그리고, 섬광관 트리거 및 Q-스위치 동작을 위하여 요구되는 전력 15W를 감안하면 약 240W가 필요하다. 따라서 변환효율을 80% 정도로 예상한다면 변환기의 입력전력은 300W가 요구된다. 그림 2는 2상의 flyback 변환기중 하나에 관한 개략도이다.

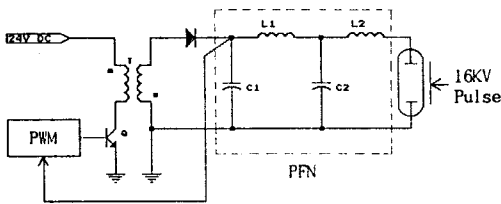


그림 2. 고전압 공급장치의 개략도

입력전력에 따른 변압기(T)의 1차측에 흐르는 최대전류와 1차측 인덕턴스의 관계는 식 1, 2, 3과 같다.

$$P_i = \frac{1}{2} L_1 I_m^2 f = \frac{1}{2} V_i I_m D \quad (1)$$

$$I_m = \frac{2P_i}{V_i D} \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{V_i}{I_m} t_m = \frac{V_i^2 D^2}{2P_i f} \quad (3)$$

- P_i : 입력전력
- I_m : L_1 에 흐르는 최대전류
- V_i : L_1 에 인가되는 전압
- t_m : L_1 에 전류가 흐르는 시간
- L_1 : T의 1차측 인덕턴스
- f : 변환기의 발진주파수
- D : f의 duty cycle

따라서, $V_i=24V$, $P_i=150W$, $f=25KHz$, $D=50\%$ 로 결정할 경우 식 3으

로부터 L_1 은 19.2 μ H가 되어야 한다. 본 논문에서는 제작상의 편리와 120W의 출력전력을 얻기위해 L_1 (Ferroxcube, 4229PA400-3B7 ferrite core)의 권선수를 5.5회로 결정하였으며,⁽⁹⁾ 적은 권선수로 인한 누설 인덕턴스를 최소화 하기 위하여 삼중감압으로 제작하였다. 그 결과 L_1 은 18 μ H였으며 변환기의 발진주파수를 25KHz로 정할 경우, 변환기의 입력전력은 식 3으로부터 160W가 요구되며 변환효율을 80%로 예상할 경우 출력전력은 약 128W를 얻을 수 있다.

사진 1은 Q의 콜렉터 전압 및 전류를, 사진 2는 그때의 PFN 충전 전류파형을 측정한 것이다. 2상의 flyback 변환기는 발진 주파수를 24KHz로 동작시켰을 때 효율과 출력이 최대가 되었으며, 이때 총 출력전력은 220W이고, 변환효율은 78%였다. 사진 3은 15Hz로 동작된 PFN의 충전전 전압파형을 측정한 것이다.

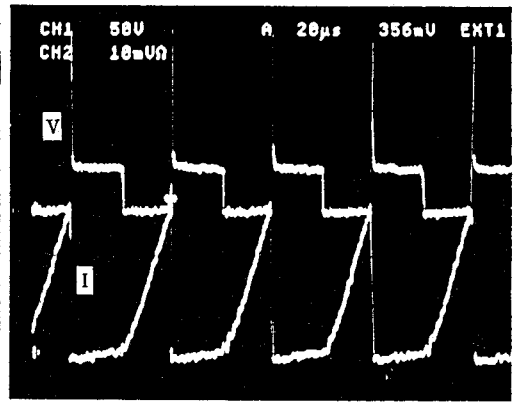


사진 1. 트랜지스터(Q)의 콜렉터 전압 및 전류파형 (10A/div.)

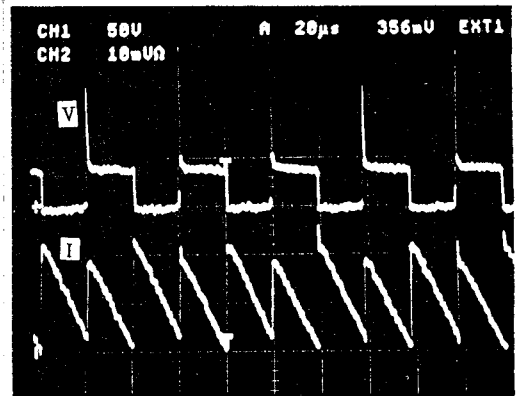


사진 2. PFN 충전 전류파형 (0.5A/div.)

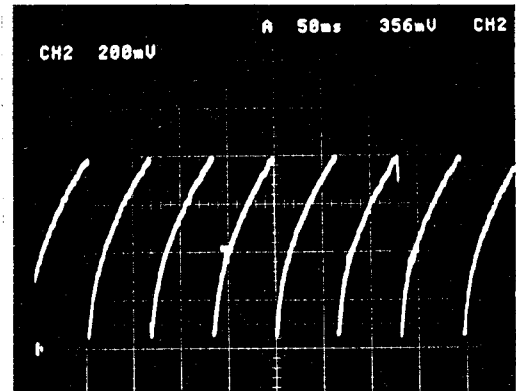


사진 3. 고전압 공급장치의 충전전 전압파형(반복률 15Hz)

2. 고전압 방전회로

Nd:YAG 레이저는 상준위 여기수명이 약 $230\mu\text{s}$ 이므로 효율적인 Q-스위치 동작을 위해서는 $100\sim 200\mu\text{s}$ 동안의 광 펄핑이 필요하다. 이것을 위해 2LC로써 광 펄핑펄스의 반복주기가 $120\mu\text{s}$ 되도록 그림 2와 같이 PFN을 구성하였다. 그리고 광 펄핑을 위해 사용한 Xe 섬광관(1LC, 4F2.5)의 최소 트리거 전압은 16KV, 펄스폭은 적어도 $0.25\mu\text{s}$ 이상이어야 한다.⁽¹⁰⁾ 트리거 전압을 발생시키기 위해 사용된 변압기(EG & G, TR180B)는 권선비가 112:1이며 1차측에 인가할 수 있는 최대 전압은 200V이다.⁽¹¹⁾ 그리고 최대 출력전압은 20KV이며, 펄스폭은 $1.5\mu\text{s}$ 이므로 위에서 선정 한 섬광관을 충분히 트리거시킬 수 있다.

3. 전자광학 Q-스위치 구동장치

LiNbO_3 결정을 이용한 전자광학 Q-스위치는 충분한 광펄핑이 이루어질 때까지 Q-스위치 동작을 지연시켜 주는 지연회로와, 공진기의 손실이 최대인 상태에서 최소상태로 변화시키기 위한 짧은 고전압 펄스발생기로 구성된다.⁽¹²⁾ 그림 3은 BK-7 포로프리즘 레이저 공진기에서 사용한 Q-스위치 구동회로이다. 변압기 T는 고주파 특성이 우수하며 전압 변화시간 즉 하강시간을 빠르게 하기 위해 포화영역까지 자화되게 설계하였다. 변압기의 1차측 권선수는 포화 자속밀도를 고려하여 30회, 2차측은 Q-스위치 동작에 필요한 전압을 위해 120회로 결정하였다. Q-스위치 펄스 전압을 인가하기 위해 광축인 c축과 평행하고 a축과 수직인 LiNbO_3 결정의 양 옆면에 두 개의 구리 전극판을 부착시켰다.

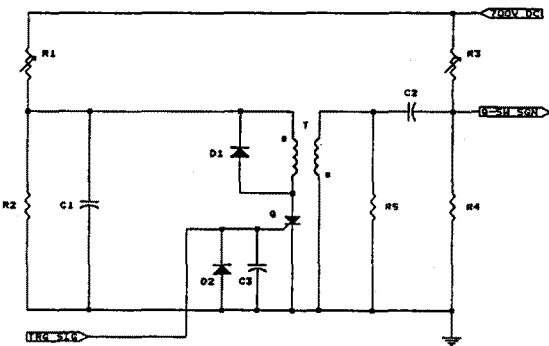


그림 3. Q-스위치 구동회로

사진 4(A)는 포화 reactor를 이용한 Q-스위치 구동회로로부터 얻은 위상지연전압의 펄스모양으로 닫힘전압(+600V)에서 열림전압(-1500V)으로의 하강시간이 200ns 이다. Q-스위치 열림 지연시간을 동기시키기 위해 섬광관의 트리거 펄스를 기준으로 $120\mu\text{s}$ 정도 지연한 후 Q-스위치 구동회로를 작동시켰다.

4. 레이저 공진기

평면경 레이저 공진기의 경우 안정된 광축정렬을 유지하기 힘들다. 특히 충격 및 진동이 유발되는 상황에서는 광축정렬의 안정성을 유지하기가 더욱 힘들어진다. 이와같은 악조건 하에서도

정상작동이 가능도록 레이저 공진기의 공진거울을 평면경 대신 포로프리즘으로 구성함으로써 공진기의 안정성을 증가시킬 수 있다. 그림 4는 일자형으로 구성된 BK-7 포로프리즘을 이용한 Nd:YAG 레이저 공진기의 구성도이다. 공진기의 오정렬에 매우 둔감하게 하기 위해 공진기 양끝단에 방위각 45° 로 엇갈린 두개의 BK-7 포로프리즘을 사용하였다.⁽²⁾ 레이저 출력은 편광분리기에서 광축과 수직인 방향으로 나오게 되므로 반사용 직각프리즘을 사용하여 출력방향을 조절하도록 하였다. Q-스위치 동작을 위해 LiNbO_3 결정에 인가되는 닫힘과 열림을 위한 인가전압은 +600V와 -1500V이다.

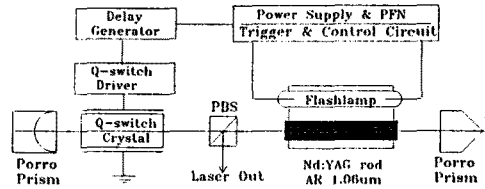


그림 4. 포로프리즘 레이저 공진기 구성도

펄핑을 위한 반사체(cavity)로는 장반경 31.4mm, 단반경 28.2mm, 길이 63.5mm인 금도금된 반사체를 사용하였다. Nd:YAG 레이저봉은 직경이 5.7mm이고 길이가 76.2mm로써 Nd 이온의 도핑농도는 0.9%이고 양쪽 단면은 $1.06\mu\text{m}$ 에 대한 무반사 코팅이 되어 있다.

사진 4(B)는 Q-스위치된 Nd:YAG 레이저 펄스이다. 이 때 Q-스위치 지연시간은 $120\mu\text{s}$ 이며 출력에너지는 80mJ이었다. 검출기는 Silicon Detector사의 SD3/5-055 PIN diode이며 Tectronix사의 2440 오실로스코프로 측정하였다.

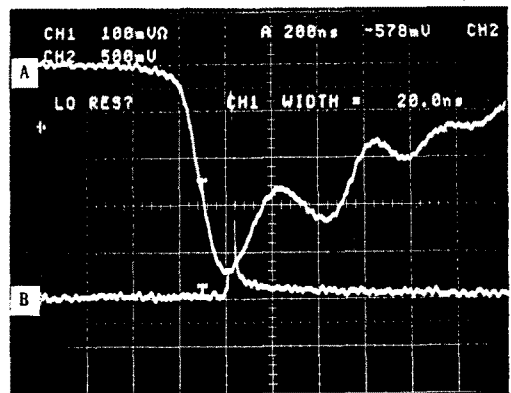


사진 4. Q-스위치 전압파형(A, 500V/div.)과 레이저 펄스(B)

거리측정용 Nd:YAG 레이저 발진부를 15Hz의 반복율로 작동시켰을 때 출력에너지는 80mJ, 펄스폭은 20ns인 레이저 펄스를 획득하였다. 2LC회로를 이용하여 고전압 방전회로를 구성하였으며, 2상의 flyback형 직류전압 변환기로써 220W의 출력을 얻을 수 있는 고전압 공급장치를 제작하였다. 그리고, 포화 reactor를 이용하여 닫힘전압(-0.6kV)에서 열림전압(+1.5kV)으로의 상승시간이 200ns인 Q-스위치 구동장치를 제작하였으며, Q-스위치 지연시간은 120 μ s일때 최대의 레이저 출력을 얻을 수 있었다.

2상의 flyback 변환기는 발진주파수를 24KHz로 동작시켰을 때 효율과 출력이 최대가 되었다. 이때 변환효율은 78%였으며, 출력전력은 총 220W이었다. 실험결과 변환초기의 불안정한 동작에 의해 설계값 보다 적은 출력을 얻었으며 이것은 펄스폭 제어회로의 보안을 통해서 개선될 수 있을 것이다. 또한, 누설 인덕턴스로 인한 트랜지스터의 콜렉터 스파이크 잡음(약 150V)이 변환효율의 저하와 시스템 전체에 상당한 잡음을 유발시키므로 이것을 최소화하는 작업이 요구된다.

1. D.W. Coffey and V.J. Norris, Appl. Opt., 11, 1013 (1972)
2. 김 영대, 이 종민, 새물리, 24, 305 (1984)
3. M. L. Stitch, Laser Handbook, Vol. 3, North Holland Pub. Co. (1979)
4. T. S. Hartwick, CO₂ Laser Devices and Applications, SPIE Vol. 227 (1980)
5. Anthony M. Johnson, Eyesafe Lasers: Components, Systems, and Applications, SPIE Vol. 1419 (1991)
6. Abraham I. Pressman, Switching and Linear Power Supply, Power Converter Design, Hayden Book Company, Inc., 1977.
7. Colonel Wm. T. McLyman, Transformer and Inductor Design Handbook, Electrical Engineering and Electronics/7, Marcel Dekker, Inc., 1978.
8. 송인섭, 고전압 플라이백 변환기의 고반복 충전특성 연구, 선임논문, 국방과학연구소, 1986.
9. Ferroxcube Corp. Core Data Book.
10. ILC Technology Flashlamp Catalog.
11. EG & G Electro-Optics Trigger Transformer Catalog.
12. W.G. Wagner and B.A. Langye1, J. Appl. Opt., 34, 2040 (1963)