

단순화된 Pockels cell Q-switch용 구동기 개발 및 특성에 관한 연구

박구렬*, 정종한, 홍정환, 김병균, 문동성, 김희영¹⁾, 김희재, 조정수
 부산대학교 전기공학과, 동주대학 컴퓨터정보통신학과¹⁾

A study of the development of a simple driver
 for the Pockels cell Q-switch and its characteristics

K.R.Park*, J.H.Joung, J.H.Hong, B.G.Kim, D.S.Moon, W.Y.Kim¹⁾, H.J.Kim, J.S.Cho
 Dept. of Electrical Eng. Pusan National Univ. Dept. of C.I.C. Dong-Ju College¹⁾

Abstract - In the technique of Q-switching, very fast electronically controlled optical shutters can be made by using the electro-optic effect in crystals or liquids. The driver for the Pockels cell must be a high-speed, high-voltage switch which also must deliver a sizeable current. Common switching techniques include the use of vacuum tubes, cold cathode tubes, thyratrons, SCRs, and avalanche transistors. Semiconductor devices such as SCRs, avalanche transistors, and MOSFETs have been successfully employed to drive Pockels cell Q-switch. In this study, a simple driver for the Pockels cell Q-switch was developed by using SCRs, pulse transformer and TTL ICs. The Pockels cell Q-switch which was operated by this driver was employed in pulsed Nd:YAG laser system to investigate the operating characteristics of this Q-switch. And we have investigated the output characteristics of this Q-switch as a function of the Q-switch delay time to Xe flashlamp current on.

1. 서 론

레이저의 응용에서는 일반적으로 레이저 출력의 시간적인 의존성이 중요하다. 특히, 레이저에 의한 재료 가공에서는 펄스 길이와 그에 따른 출력수준이 매우 중요한 인자이다. 따라서, 레이저 출력에 있어서 보다 높은 첨두출력(peak power)과 더 짧은 펄스를 얻기 위한 펄스 생성 기술이 요구되어지는데, 이러한 펄스 생성 기술 중 Q-switching 방식이 사용되고 있다.[1][4]

Q-switching은 셔터나 다른 광학소자를 레이저 공진기 내에 넣어 광이 공진기 내에서 발진하는데 손실을 유발하고, 충분한 반전분포가 활성 매질 내에서 생성되면 순간적으로 셔터를 열어 공진기 내에 축적된 에너지가 매우 강한 빛으로 방출되게 하는 것이다. 이와 같이 Q-switching은 레이저 공진기의 Q값을 감소시켰다가 갑자기 증가시키는 것이다. 레이저를 Q-switching하는 방법에는 고속 회전 end-mirror 방법, electro-optic switch 방법, 포화흡수체 cell 방법 등 크게 3가지가 쓰이고 있다. 이들중 전기광학적인 효과에 의한 전기적인 전환은 짧은 Q-switching 펄스를 생성할 수 있기 때문에 널리 사용되고 있다. [2-3]

본 연구에서는 이러한 전기광학효과를 갖는 Pockels cell을 Q-switch로 사용하기 위하여 이를 구동시킬 수 있는 보다 단순한 구조의 구동기를 SCR과 TTL IC 및 펄스트랜스로 설계 및 제작하였다. 또, 이를 사용한 Q-switch의 동작특성을 알아보기 위하여 Nd:YAG 레이저 시스템에 설치하였고, Q-switching 된 레이저 출력특성과 Q-switching 지연시간에 따른 레이저 출력특성에 관하여 연구하였다.

2. 본 론

2.1 Pockels cell Q-switch용 구동기의 설계

Q-switching 기술에 있어서 결정체 또는 액체에서의 전기광학효과를 이용하면 전기적으로 제어된 매우 빠른 광셔터를 실현할 수 있다. 전기광학적인 Q-switching은 전기장에 따라 굴절률이 변화되는 복굴절 재료와 편광자를 레이저 공진기 내에 삽입하여 손실을 발생시키므로서, 의도적으로 공진기의 Q값을 낮추어 여기된 빛의 강도를 증가시키고 레이저 발진은 일어나지 않으며 에너지는 축적된다. 이러한, 복굴절 재료와 편광자에 의해 발생한 손실을 전기장의 제어에 의해 제거하여 Q값을 크게 하면 축적된 반전 분포에서 순간적으로 유도방출이 발생되어 거대한 첨두출력을 얻게 된다. 이러한 전기광학적인 전환은 기계적인 전환방법에 비해 신속하므로 짧은 지속시간의 펄스를 주며, 또한, 최대의 반전분포를 주는 상태를 얻는 시간과 서로 일치하게 잘 맞출수 있어 시간적 조절이 용이하다. 하지만, Q값을 변화시켜 얻은 고첨두 출력은 Q-switch를 동작시키지 않은 출력인 보통 출력에 비해 커지는 것이 아니고, 단지 보통 출력의 에너지를 단시간에 압축하여 나오는 고첨두 출력이다. Pockels cell을 사용하는 Q-switching 된 고체레이저는 $1.5 \sim 2.5 \times 10^{-8}$ 초의 펄스시간이 10^6 W정도의 첨두출력을 낸다.[5] Pockels cell을 이용한 Q-switching에는 off-switching 방식과 on-switching 방식의 두가지 구동방식이 있는데, 본 연구에서는 on-switching 방식을 채택하여 시스템을 동작시키도록 하였다. 이 방식은 Pockels cell에 전기장을 인가하지 않을때 레이저 공진기는 레이저 발진을 일으키지 못하고, 전기장이 인가 되었을때 매우 짧은 고첨두의 출력을 발생시키는 것이다

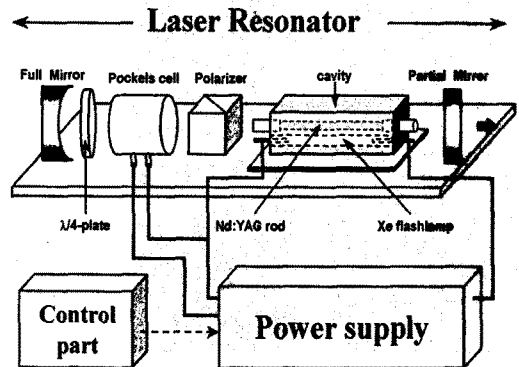


그림 1. Q-switch 레이저 시스템 개략도
 Fig. 1 Schematic diagram of laser system with Q-switch

그림 1은 레이저 공진기 내에 전기광학 Q-switching을 할 부굴절체이인 Pockels cell과 편광자의 배치를 나타낸다.

Pockels cell에 전기장이 인가되지 않은 상태에서는 rod로부터 방출된 광이 편광자에 의해 선형 편광되고 Pockels cell을 어떤 편광도 없이 거쳐 $\lambda/4$ -판을 통해 원형 편광된다. 전반사경에 의해 반사된 광은 다시 $\lambda/4$ -판을 통과하면서 다시 선형 편광되지만, 편광자에 의해 선형 편광된 광파는 수직을 이루고 있어 모든 광이 편광자에 흡수되고, 공진기의 Q값은 낮아져서 레이저 발진은 일어나지 않는다. 활성 매질 내에 반전분포가 최대가 될 때 빠르게 전기장을 Pockels cell에 인가하게 되면 Pockels cell은 제2의 $\lambda/4$ -판으로 동작하게 되고, 2개의 $\lambda/4$ -판은 하나의 $\lambda/2$ -판을 생성시켜, 반사경에서 반사된 광은 편광자에 의해 선형 편광된 광파 일치하게 되고 레이저 공진기의 Q값이 급격히 상승하게 되어 매우 짧은 레이저 펄스가 방출된다.

2.1.1 Q-switch용 구동기의 회로

전기광학적으로 Q-switching 된 레이저의 구동에 있어서는 결정재료, 기하구조와 광파장에 따라 1.5kV에서 15kV의 범위에서 전기적으로 전압을 스위칭하는 것이 필요하다. Pockels cell의 구동기는 반드시 고속도, 고전압 스위치이어야 하고, 또, 꽤 큰 전류를 전달해야 한다. Pockels cell은 수 ns안에 수 kV를 충·방전하는 수 십 pF의 용량을 가지므로, 10~20A 정도의 전류가 흐른다.

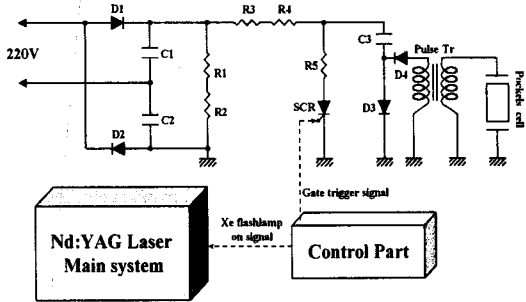


그림 2. Pockels cell Q-switch용 구동기의 회로
Fig. 2 The circuit of driver for Pockels cell Q-switch

그림 2는 본 연구에서 설계, 제작된 Pockels cell Q-switch 구동기의 회로도이다. 이는 기존의 Pockels cell Q-switch 구동기보다 더 단순한 구조로 실현하기 위하여 SCR과 TTL IC 및 펄스 트랜스로 설계 및 제작하였다. Pockels cell에 인가하는 1/4-파장 전압은 Pockels cell의 type에 따라 달라지는데 본 연구에서 사용된 Pockels cell은 중형 KD*P 결정으로 제작된 것으로 Nd:YAG 레이저의 1064nm의 광파장에 대하여 약 3.4kV(20°C 상온기준)에서 동작하는 것이다. 또, 그 1/4-파장 전압은 주위 온도가 1°C 상승함에 따라 약 50V씩 상승하는 것으로 되어 있으므로, 이를 동작시키기 위한 최종 1/4-파장 전압은 실온 24°C를 기준하여 약 3.6kV로 정하였다. 회로의 동작은 상용전원 220V를 2배압 회로를 거쳐 약 600V의 DC로 만들고 이를 C2에 충전시켜 SCR의 turn-on에 의해 펄스 트랜스로 승압된 고압 펄스를 Pockels cell에 전달하게 되어 있다. 이때, SCR의 turn-on 시기는 Nd:YAG 레이저 시스템의 Xe 플래쉬 램프의 점등에 대하여 일정 delay time을 가진다. 이 delay time의 조절은 74LS123을 이용하여 구현하였다. 그림 3은 74LS123으로 구성된

delay time 제어회로를 나타낸다.

Delay time 제어회로의 동작은 우선 Nd:YAG 레이저 시스템의 Xe 플래쉬 램프를 점등시키는 신호를 Nd:YAG 레이저 시스템과 제어회로의 pin2번에 동시에 입력시키면 입력된 신호의 상승 edge에서 R1과 C1에 의해 결정된 시간동안 pin13에서 구형파가 출력된다. 이 구형파가 다시 pin9번에 입력되면 이 구형파의 하강 edge에서 R2와 C2에 의해 결정된 시간동안 pin5에서 구형파가 출력되는데, 이 신호가 SCR을 turn-on시키는 게이트 트리거 신호가 된다. 따라서, R1과 C1에 의해 결정되는 구형파(pin13) 펄스폭의 조절에 의해 delay time을 제어할 수 있게 된다.

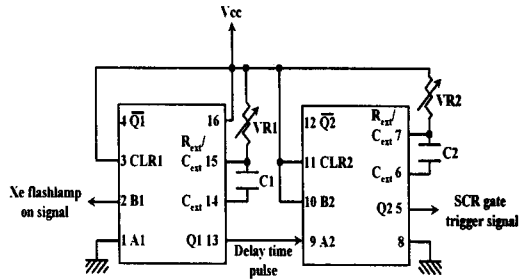


그림 3. Delay time 제어회로
Fig. 3 Delay time control circuit

2.1.2 Q-switch용 구동기의 동작특성

그림 4는 delay time 제어회로의 동작파형을 나타낸다. 파형 A는 Xe 플래쉬 램프를 점등시키기 위한 Nd:YAG 레이저 시스템으로 입력되는 신호이고, 파형 C는 Pockels cell에 1/4-파장 전압을 인가하기 위한 구동회로의 SCR의 게이트 트리거 신호이다. 또, 파형 B는 delay time을 나타내는 제어회로의 pin13의 출력 파형이다.

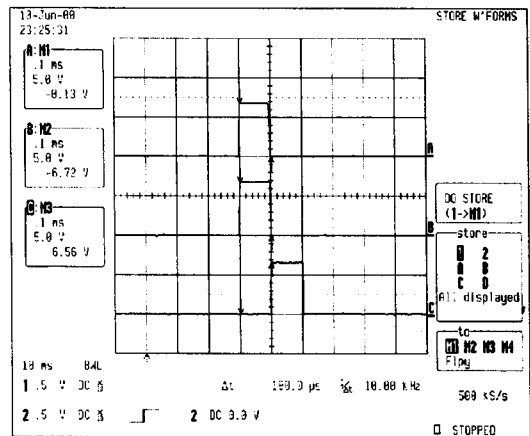


그림 4. Delay time 제어부의 동작 파형
Fig. 4 Operating waveforms of delay time control part

파형 A에 의해 Xe 플래쉬 램프가 점등된 후 파형 B의 펄스폭 만큼의 지연되어 파형 C에 의해 Pockels cell에 1/4-파장 전압이 인가되며, Q-switch가 동작하게 된다. 이러한 제어회로에 의한 Nd:YAG 레이저 시스템의 Xe 플래쉬 램프의 전류 펄스 파형과 일정

delay time 후의 구동기에 의한 Pockels cell에 인가 되는 1/4-파장 전압 파형을 그림 5에 나타낸다.

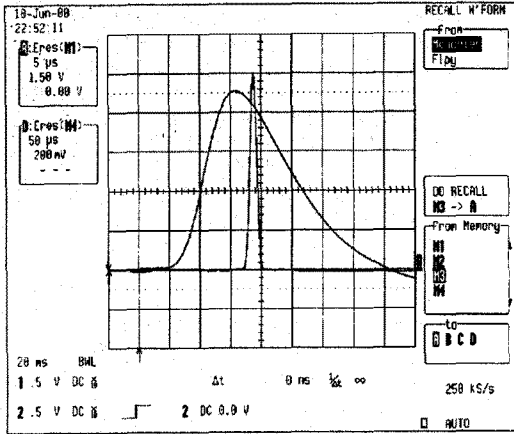


그림 5. Xe-flashlamp 전류파형 및 Pockels cell의 1/4-파장 전압 파형

Fig. 5 Xe-flashlamp current waveform and Pockels cell 1/4-wave voltage waveform

파형 A는 충전 전압 850V일 때 Xe-플래쉬 램프에 흐르는 전류 파형이다. 이 플래쉬 램프의 전류를 측정하는데 사용된 펄스 변류기는 0.001V/A의 환산치를 가진 것으로 측정된 플래쉬 램프의 전류 최대치는 약 850A에 달하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그 펄스폭은 약 150μs(FWHM)이다. 파형 D는 delay time 120μs일 때 Pockels cell에 인가되는 1/4-파장 전압 파형이다. 이 1/4-파장 전압의 측정에는 500:1의 응답특성을 가진 PT를 사용하였다. 따라서 약 2μs의 짧은 펄스폭을 가진 3.6kV의 전압임을 알 수 있다.

2.2 실험결과 및 검토

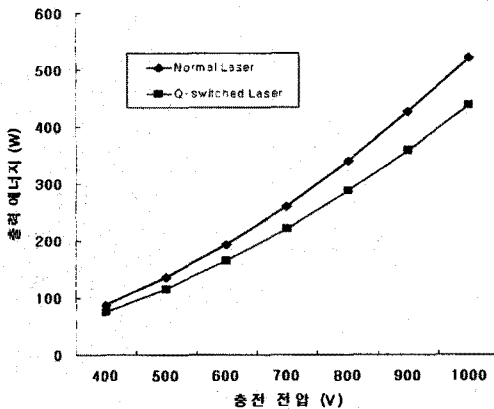


그림 6. 충전 전압에 대한 보통 레이저 출력 및 Q-switch된 레이저 출력

Fig. 6 Charging voltage vs. normal laser output and Q-switched laser output

실험은 입력에너지를 가변시켜 가면서 각 입력에너지에 대한 Q-switch가 없는 보통의 레이저 출력과 같은

조건하에서 Q-switching 된 레이저의 출력을 비교하며 실험하였다. 그림 6은 Nd:YAG 레이저 시스템의 충전 콘덴서의 충전 전압에 따른 Q-switching 된 레이저 출력과 그렇지 않은 레이저 출력의 그래프이다. 이 출력 에너지는 에너지미터 (model : Scientech D200C)로 측정하였다. 여기서, Q-switching 된 레이저의 출력은 delay time을 조절하여 최대 출력이 나올때의 값이다. 그래프에서 알 수 있듯이 Q-switching 된 레이저 출력의 Q-switching 되지 않은 레이저 출력에 대한 비율은 입력 에너지가 상승하면 감소하는 경향을 보인다. 하지만, 그 비율은 거의 평균 85% 정도에 이르고 있다. 이 Q-switching 된 레이저 출력은 Q-switching 되지 않은 레이저 출력에 비해 약 85%의 출력이지만 그 펄스폭은 수 십 ns에 달한다고 알려져 있어 그 첨두치는 수 십 MW에 이를 것으로 예상된다.

3. 결 론

본 연구에서는 레이저 Q-switch를 전기광학효과를 가진 Pockels cell로 구현하기 위하여 보다 단순화된 Pockels cell Q-switch용 구동기를 설계하고 이를 제작하였다. 또한, 그 특성을 알아보기 위하여 Nd:YAG 레이저 시스템에 설치하여 실험하였다. 이 구동기는 SCR, TTL IC, 펄스 트랜스를 사용하여 매우 간단한 구조로 회로 구성을 하였고, Xe-플래쉬 램프의 점동에 대한 1/4-파장 전압의 delay time을 손쉽게 제어할 수 있게 하였다. 이 구동기에서 출력되는 1/4-파장 전압은 약 2μs의 펄스폭을 가진 3.6kV의 전압이다. 또, 그 전압의 Xe-플래쉬 램프의 점동에 대한 delay time은 30μs~3ms의 가변 범위를 가진다. 이러한 구동기에 의해 Nd:YAG 레이저 시스템에 설치된 Pockels cell Q-switch는 동작되고, 그 때의 보통의 레이저 출력은 Q-switching 되지 않은 레이저 출력의 약 85% 정도에 달하였다. 하지만, 이 Q-switching 된 레이저 출력은 수 십 ns의 펄스폭을 가지므로, 그 첨두치는 수 십 MW로 예상된다. 차후 더 많은 자세한 실험을 진행하여 정확한 Q-switching 된 레이저 빔 모양 및 첨두치를 측정하고, 계속적인 실험을 통하여 설계된 구동기의 회로를 계속적으로 보완해 갈 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 田幸敏治, 大井みさきは, "レーザー入門", 光學技術シリーズ12. 共立出版株式會社, p39~40, 1985年
- [2] Frank L. Pedrotti, S. J., Leno S. Pedrotti, "Introduction to optics", Prentice-Hall Inc., p547~551, 1993
- [3] Walter Koechner, "Solid-state laser engineering", Springer, chapter 8, 1999
- [4] W.R. Hook, R.P. Hilberg, R.H. Dishington, "High efficiency electrooptic Q-switching using slow risetime SCR-transformer drive", Proceedings of the IEEE, vol.59, no.7, p1126~1128, July 1971
- [5] 김희재, 진윤식, 이홍식, 정상진, "시머회로를 이용한 펄스형 Nd:YAG 레이저의 Q스위치 동작특성", 전기학회 논문집, 44권 3호, p397~p399, 1995년 3월