

LLC 공진형 컨버터를 사용한 다용도 Nd:YAG 레이저 전원장치 설계

Research on the Multi - purpose Nd:YAG Laser Power System using LLC Converter

정 도* · 김 희 제** · 이 재 철*** · 허 국 성†
(Tao Zheng · Hee-Je Kim · Jae-cheol Lee · Guo-Cheng Xu)

Abstract - LLC resonant converter has been widely used because of its high efficiency and high energy density. In this paper, we designed a LLC resonant converter as the main power supply of the Nd:YAG pulse laser. First harmonic approximation (FHA) is used to model the LLC resonant converter. FHA equivalent circuit model and the transfer function of the LLC resonant converter is proposed. Soft start technology is also used to suppress the surge current. The laser output simulation test result is identical with the practical test, the laser energy of every pulse can reach up to 2.5J, and the pulse per second (PPS) can be adjusted from 6 to 18. The power system is verified stable and reliable by both of the simulation and experiment results.

Key Words : Nd:YAG laser, FHA, LLC resonant converter, Soft start, Zero voltage switching, PPS

1. 서 론

20세기 3대 발명의 하나인 '레이저'는 밝음도가 높고, 방향성이 좋으며, 색상 단일성이 좋은 광학 특성이 있어 응용 광학 영역에서 매우 큰 변혁을 일으키고 있기 때문에 군사, 공업, 통신, 가정 등 많은 영역에서 응용되어 왔다. 레이저 기술은 의학에서 가장 초기에 응용 되었을 뿐만 아니라 가장 광범위하고 가장 활약적인 영역이라고 할 수 있다.[1][2] 다양한 영역에 응용되는 레이저 시스템에 있어서 전원장치 설계는 아주 중요한 부분이다. 80년대 이후 반도체 다이오드 레이저를 Nd:YAG레이저의 펌핑 광원으로 사용하는 연구가 많이 진행되어 왔다. 그러나 전통적인 펌핑 광원과 비교할 때 반도체 레이저로 구성된 펌핑 광원은 구조가 복잡하고 단가도 비싸다. 그러므로 다수의 경우는 여전히 xenon lamp를 펌핑 광원으로 사용한다. 펌핑 광원을 점등하기 위한 전원회로 설계에 있어서 어떤 토폴로지를 선정하는가에 따라 전원회로의 효율, 안정성, 그리고 부피와 무게방면에 다양한 차이가 있다. 종래의 연구를 살펴보면 참고문헌[3]에서는 half bridge inverter를 전원으로 사용했

고 참고문헌[4],[5]에서는 Cuk컨버터, full bridge 인버터를 전원토폴로지로 선정하였다. 이런 토폴로지들은 각각 장점이 있으나 대용량 전원으로 설계될 경우 보편적으로 효율을 높이기 어렵고 스위치에 흐르게 되는 대 전류를 감수해야 됨으로 IGBT를 사용하는 경우가 많다. 따라서 전원장치의 무게나 부피 면에서 육중한 단점이 있다. 반면에 LLC 공진형 컨버터는 풀 부하 범위에서 ZVS(Zero Voltage Switching)이 가능하며 정류다이오드에서 영전류 턴 오프(Zero Current Switching)가 가능하여 손실이 상대적으로 적고 스위칭 주파수를 높게 설계할 수 있음으로 전원 부피가 줄어들고 가벼워지는 장점이 있다.[6] 이런 장점들을 적용하여 본 논문에서는 2kW급 LLC 공진형 컨버터를 펌핑 전원으로 펄스형 Nd:YAG레이저 전원장치를 설계하였으며 출력 주파수 6 PPS~18 PPS 선택을 통해 광 출력을 최대 2.15J 까지 파워조절이 가능함으로 한 개 전원으로 레이저 여러 가공분야에 적용하도록 하였다.

2. 본 론

2.1 Nd:YAG레이저 전원장치 구성

Nd : YAG레이저 광원인 제논램프 점등을 위해 보편적으로 simmer/trigger회로, 메인전원회로, 에너지 충/방전회로, 및 각 부분을 제어하기 위한 제어회로가 필요하다. 따라서 본 논문에서는Nd : YAG레이저 발진원리 및 동작특성에 맞추어 레이저 전원 장치를 그림 1과 같이 설계하였다. 여기서 Rectifier 와 LLC

† Corresponding Author : Monitech Co., Ltd, Korea.

E-mail:hurkooksung@hotmail.com

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Korea.

** Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Korea.

Received : December 08, 2014; Accepted : May 28, 2015

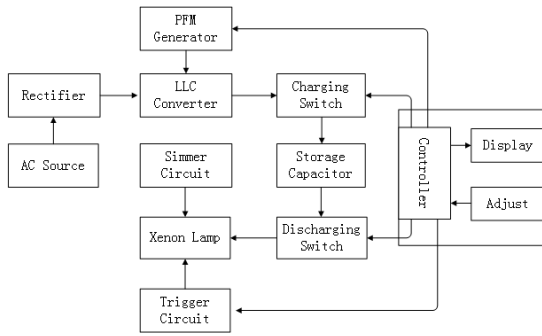


그림 1 레이저 파워시스템 구성도.
Fig. 1 The design scheme of laser power system

Converter 는 메인회로 부분에 해당되고 Charging/Discharging Switch 및 Storage Capacitor는 에너지 충전/방전회로에 해당된다. 메인회로의 제어기는 UCC25600 를 사용해 PFM Generator로 실현하였으며 ATmega128 제어보드로 에너지 충전/방전 제어를 실현하였다. simmer/trigger회로는 제품 MD235를 사용하였다. 전반적인 설계에 있어서 본 논문은 LLC 공진회로 설계 PFM 제어기 분석 및 에너지 충전/방전 시간 제어에 중점을 두고 구체적인 계산 방법과 설계사양을 제시한다.

2.2 UCC25600 PFM 발생기 및 주변회로 설계

Nd:YAG 레이저원 메인회로에서 충전/방전 커패시터에 충전을 할 때 보통 순간 돌입전류가 발생한다. 돌입전류에 대한 제한이 없을 경우 일부 소자의 수명에 영향을 주거나 심지어 스위치의 파괴로 인해 전체 시스템이 파손될 수 있다. 본 논문에서는 TI회사의 UCC25600 IC를 사용하여 soft start기능을 적용하였다. LLC 공진형 컨버터는 동작특성상 주파수가 높을수록 이득이 낮아지고 전류제한 효과도 선명하기 때문에 그림 2에서 보여준 바와 같이 포토커플러를 통해 커패시터의 충전이 시작되기 직전에 LLC 컨버터의 스위칭 주파수를 약 2.5배 이상 높이는 방법으로 돌입전류를 제한하였다.[7][8]

그림 3은 soft start 시 MOSFET 게이트 신호파형을 보여준다. 그림 3.b는 3.a 파형을 일부를 확대하여 보여준 것이며 두 그림을 비교하여 관찰해보면 충전신호(yellow line) 시작 전 약 400us

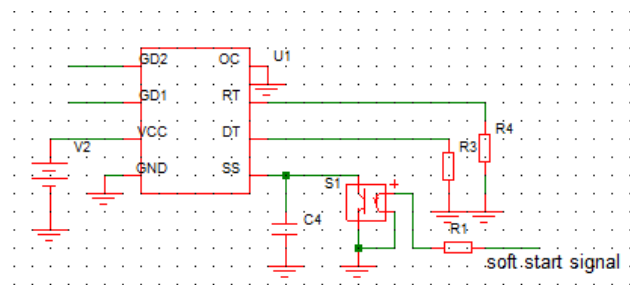
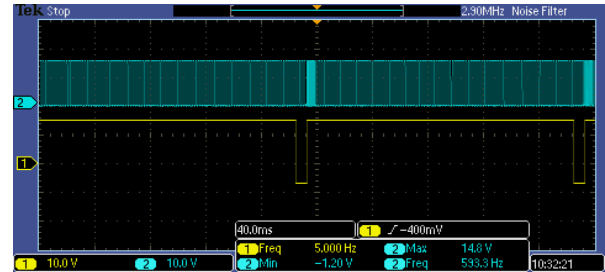
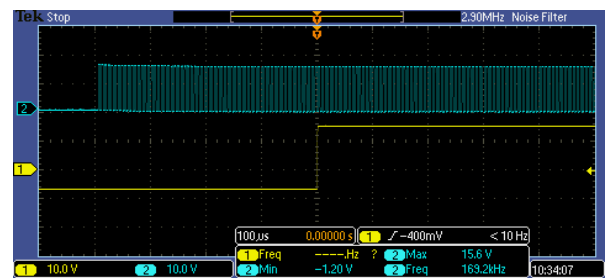


그림 2 soft start 회로
Fig. 2 Soft start circuit

시점에서 soft start가 시작 되서 충전이 시작한 후 약 35ms까지 유지됨을 알 수 있다. 이와 같은 방법을 통해 돌입전류가 발생하는 순간만 전류제한을 걸고 다시 정격주파수로 회복시킴으로 전원시스템의 정상적인 출력에 거의 영향이 없도록 하였다.



(a)



(b)

그림 3 soft start 신호 파형

Fig. 3 Waveform of the soft start signal

그림 4는 메인회로인 LLC 공진형 컨버터를 보여준다. 메인회로는 full bridge 구조로 설계 되었으므로 스위치 Q1, Q4와 Q2, Q3는 교차적으로 turn on/turn off 된다. 이 토폴로지의 장점은 풀 부하 범위에 걸쳐 ZVS가 가능함과 동시에 2차측 정류기에서 ZCS(영전류 스위칭)가 가능하기 때문에 대용량 전원설계에 있어서 상대적으로 손실이 적어 효율이 비교적 높다. 다음은 기본과 분석법 (First Harmonic Approximation) 에 근거하여 Nd:YAG 레이저 발진조건에 부합되는 LLC 컨버터 회로의 전반 설계과정을 수식적으로 설명하였다.[9]

스위칭 주파수를 f 로 표시하면 그림 4에서 V_N 은 주파수가 f 이고 폭이 V_{in} 인 구형파로 나타낼 수 있다. 다시 푸리에 전개를 하면 결과는 수식(1)과 같다.

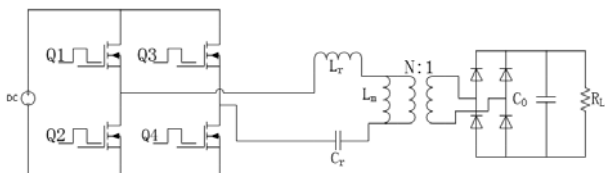


그림 4 Full-bridge LLC 공진형 컨버터

Fig. 4 Full-bridge LLC resonant converter

$$V_N = \frac{4}{\pi} V_{in} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \sin(n2\pi ft) \quad (1)$$

그 중 기본파만 표시하면 수식(2)와 같다.

$$V_{N,RMS} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{in} \quad (2)$$

출력단 정류회로에서 정류다이오드의 입력전압의 기본파는 수식(3)으로 주어진다.

$$V_{o,rect} = \frac{4}{\pi} V_o \sin(2\pi ft - \varphi) \quad (3)$$

그러므로 RMS 값을 계산하면 아래 식이 얻어진다.

$$V_{o,RMS} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_o \quad (4)$$

같은 방법으로 정류회로의 입력전류를 계산하면 수식(5)와 같다.

$$I_{o,rect} = \sqrt{2} I_{o,RMS} \sin(2\pi ft - \varphi) \quad (5)$$

$I_{o,RMS}$ 전류 기본파의 RMS값이다.

위의 식에서 출력전류 평균값을 계산하면 식(6)과 같다.

$$I_o = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} |I_{o,rect}| dt = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{o,RMS} = \frac{P_o}{V_o} = \frac{V_o}{R_o} \quad (6)$$

P_o 는 부하가 R_o 일때 전력을 표시한다. $V_{o,rect}$ 및 $I_{o,rect}$ 로부터 정류회로의 등가저항을 계산하면 식(7)과 같이 표현된다.

$$R_{o,ac} = \frac{V_{o,rect}}{I_{o,rect}} = \frac{V_{o,RMS}}{I_{o,RMS}} = \frac{8V_o^2}{\pi^2 P_o} = \frac{8R_o}{\pi^2} \quad (7)$$

여기서 변압기의 권수비를 고려하여 1차측으로 등가하면 최종 아래 식(8)로 표시할 수 있다.

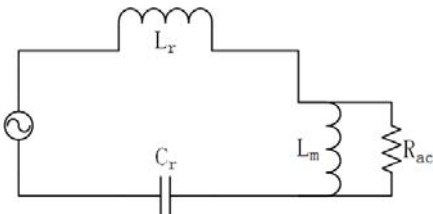


그림 5 LLC 공진형 컨버터 등가모델
Fig. 5 The equivalent circuit of the LLC resonant converter

$$R_{ac} = N^2 R_{o,ac} \quad (8)$$

그림 5는 교류모델링을 위한 LLC 공진형 컨버터의 등가 회로이다. 는 위의 식8로 부터 계산할 수 있다.

그림 5의 등가회로에서 입력 출력 전달함수를 계산하면 식(9)와 같다.

$$H(s) = \frac{n V_{o,RMS}(s)}{I_{o,RMS}(s)} = \frac{R_{ac} // sL_m}{\frac{1}{sC_r} + sL_r + R_{ac} // sL_m} \quad (9)$$

여기서 주파수 특성은 :

$$H(j\omega) = \frac{-L_m C_r R_{ac} \omega^2}{-j\omega^3 L_r C_r L_m - \omega^2 C_r R_{ac} (L_m + L_r) + j\omega L_m + R_{ac}} \quad (10)$$

DC gain은 :

$$M_{dc} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\pi V_{o,RMS}}{2\sqrt{2}} \frac{2\sqrt{2}}{\pi V_{N,RMS}} = \frac{|H(j\omega)|}{n} \quad (11)$$

$$= \frac{1}{n} \left| \frac{-L_m C_r R_{ac} \omega^2}{-j\omega^3 L_r C_r L_m - \omega^2 C_r R_{ac} (L_m + L_r) + j\omega L_m + R_{ac}} \right|$$

표 1은 최종 설계값을 보여준다.

표 1 LLC 공진형 컨버터 설계사양

Table 1 Parameters of the LLC resonant converter

Maximum input voltage	212V	Rated input voltage	184	Rated output voltage	450V
Rated power	2025W	Resonant frequency	55kHz	Resonant capacitor	188nF
Resonant inductor	44.42uH	Magnetic inductor	228.22 uH	Transformer turns ratio	1:2.5
Switching frequency	64K Hz				

3. 실험결과

그림 6은 본 논문에서 설계된 Nd:YAG레이저 전원장치의 시제품 사진이며 그림7과 그림8에서 전원회로에 대한 시뮬레이션 파형과 시제품 실측정 파형을 비교하여 보여준다. 그림7의 a, b, c, d 4개 파형은 충전/방전 속도가 각각 18, 14, 16, 6 PPS일 때 IGBT 게이트 방전신호와 충전/방전 커패시터Co(그림4)의 전압파형이다. 시뮬레이션 결과로 볼 때 18 PPS 시 커패시터의 충전전압이 362V 정도 되며 방전 후 341V로 떨어진다. 그리고 14, 10, 6 PPS에서는 충전전압/방전 후 전압 형태로 표현하면 각각 364V/336V ; 368V/331V ; 345V/290V이다. 측정파형 그림8의 결

과를 살펴보면 8, 14, 10, 6 PPS 에서 각각364V/346V ;
364V/338V ; 366V/332V ; 344V/294V정도의 결과를 보여주며 시
뮬레이션 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

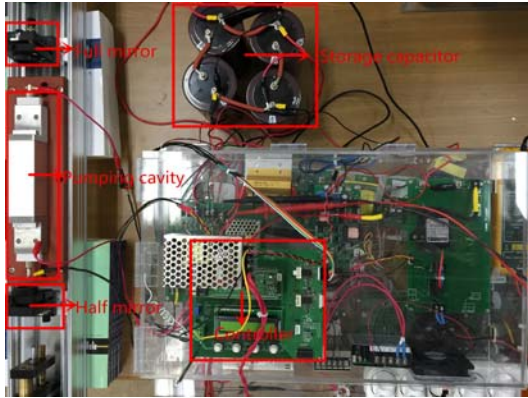


그림 6 Nd:YAG 레이저 파워 시스템 시제품
 Fig. 6 The power supply system of Nd:YAG laser

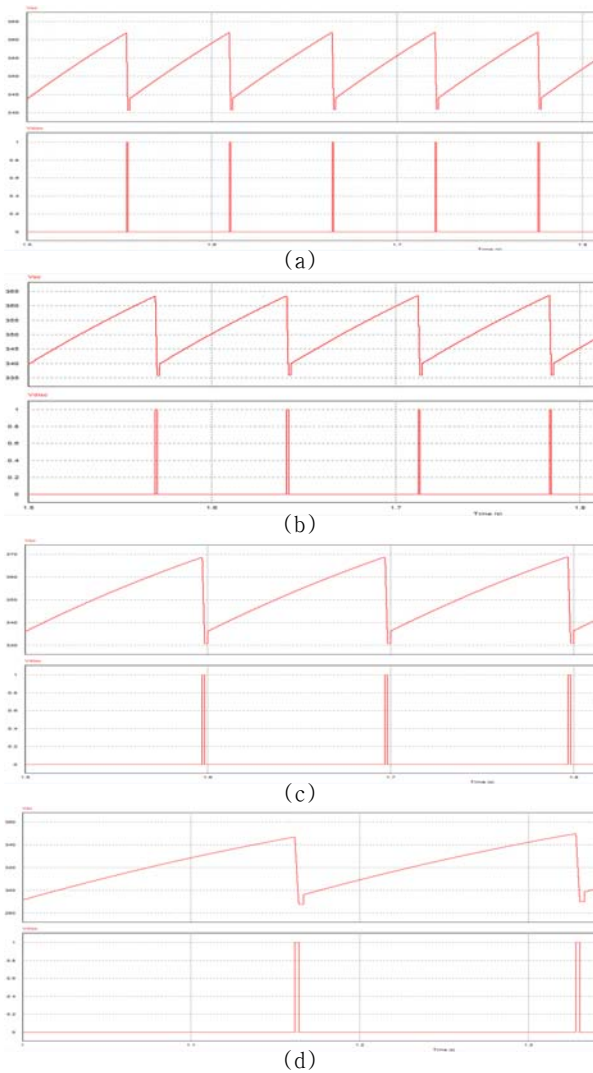
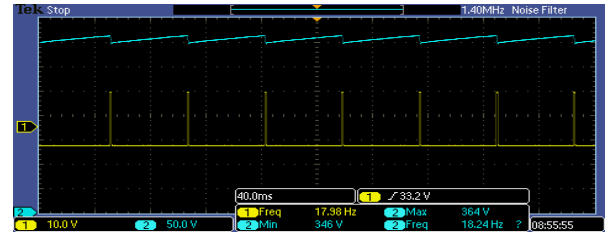
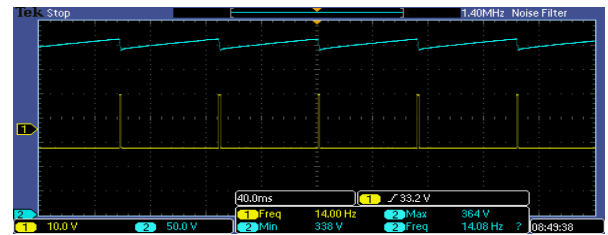


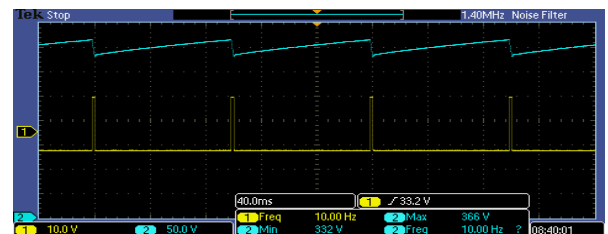
그림 7 방전 신호 및 방전전압 시뮬레이션 파형
 Fig. 7 Simulation waveform of the discharge signal and discharge voltage



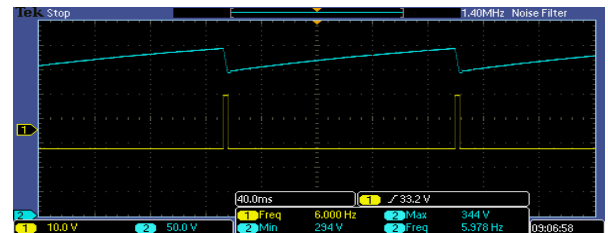
(a)



(b)



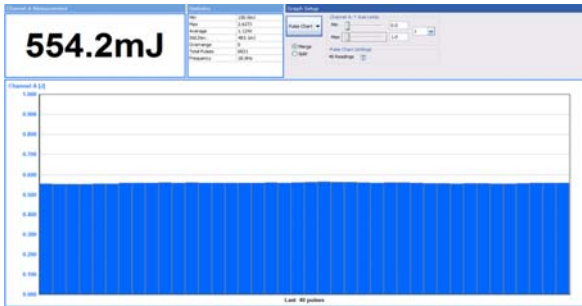
(c)



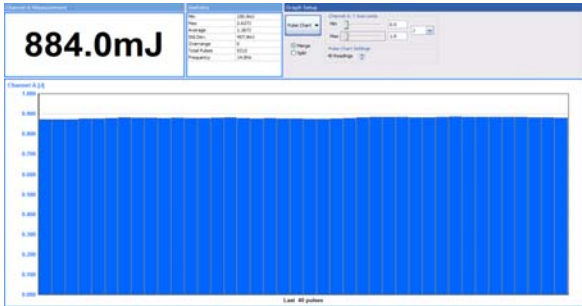
(d)

그림 8 방전신호 및 방전전압 측정파형
 Fig. 8 Measured waveform of the discharge signal and discharge voltage

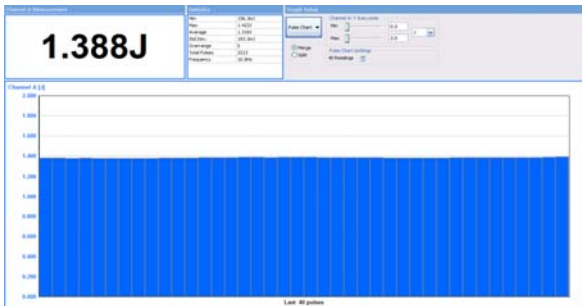
그림 9에서 a, b, c, d 4개 파형은 충전/방전 속도가 각각 18, 14, 16, 6 PPS일 때 Nd:YAG 레이저 빔의 광 출력을 측정된 결과이다. 4개 파형을 관찰해보면 레이저 광 출력은 PPS가 낮을수록 에너지가 커짐을 알 수 있다. 원인은 시뮬레이션의 결과에서 보여주듯이 PPS가 낮을수록 충전전압에서 방전 후 전압을 뺀 전압차가 크기 때문이다. 본 실험에서 Nd:YAG 레이저의 최대 출력은 2.51J이며 PPS를 변화하여 다양한 출력에너지를 낼 수 있기에 경우에 맞게 절단공정이나, 식각공정, 용착 등 영역에 적용할 수 있다.



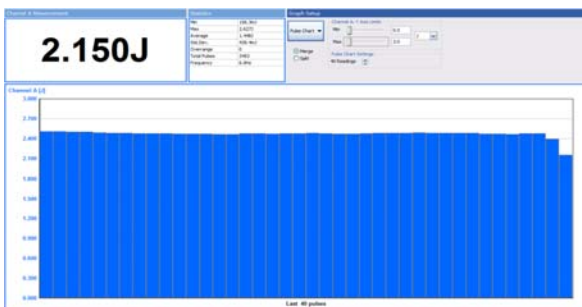
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 9 Nd:YAG 레이저 광 출력 측정파형
Fig. 9 Measured output energy of the Nd:YAG laser pulse

4. 결 론

본 논문에서 LLC 공진형 컨버터를 Nd : YAG레이저 전원장치의 메인 회로로 설계하였으며 ZVS , ZCS, soft -start등 반도체 스위치에 대한 스위칭 기법을 적용하여 에너지 손실을 줄이고 펄스형 고체레이저 작동시 돌입전류 제한방법을 주파수 제어의 측면에서 제시하고 실험을 통해 보여주었다. 그리고 레이저 전원회로에 대한 시뮬레이션 결과와 실측정 파형의 비교를 통해 본 논문에서 제안한 설계방법의 타당성을 증명하였다. 본 논문에서 설계 제작된 Nd : YAG레이저 전원장치는 펄스출력 6~18pps까지 가변되며 최대 광 출력은 2.15J정도이다. 실험결과에서 pps 와 Nd : YAG레이저 출력에너지 관계 분석을 하였으며 단일용도에 따른 전용레이저 설계가 아니라 작동방식의 변환을 통해 절단 공정, 식각, 용착등 다양한 용도로 사용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

감사의 글

본 논문은 BK21플러스, IT기반 융합사업 창의인력양성사업단에 의하여 지원되었으므로 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Haken, Hermann, and H. Haken. Laser theory. Vol. 984. Heidelberg: Springer-Verlag, 1984.
- [2] Shao-chun, HONG. "Technological study on the applications of Nd:YAG laser to the medicine." Journal of Jilin Institute of Chemical Technology (2004).
- [3] Xiaohua, JIANG. "The Development of Pulsed Laser Power Supply."Jornal of Hanghn N of O and Fn Mhan (2003).
- [4] CHEN, Xiao, et al. "New power supply with high performance for pulse laser."Chinese Journal of Quantum Electronics 6 (2005): 006.
- [5] CHEN, Hong-hai, et al. "Design of hardware circuit of YAG pulsed laser power supply." Electronic Design Engineering 4 (2011): 029.
- [6] Huang, Hong. "Designing an LLC resonant half-bridge power converter." TI Power Supply Design Seminar SEM1900. 2010.
- [7] Texas Instruments, Dallas. "UCC25700: 8-pin high performance resonant mode controller." (2008).
- [8] Fan, Y. A. N. G., and Y. A. N. G. Yu-gang. "Design of LLC resonant converter based on UCC25600 [J]." Chinese Journal of Power Sources 6 (2010): 028.
- [9] Huang, Hong. "LLC Resonant Half Bridge Converter." Texas Instruments (2009).

저 자 소 개



정 도(Tao Zheng)

2009년 Qingdao University(China) 사범대학 물리학과 졸업. 2012년 South China Normal University 대학원 물리전자정보공학과 석사졸업 현재 부산대학교 전기컴퓨터공학과 박사과정 재학 중



김 희 제(Hee-Je Kim)

1955년 10월 23일 1980년 부산대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 부산대학교 대학원 전기공학과 석사졸업 1990년 규슈대학교 대학원 에너지공학과 박사졸업. 현재 부산대학교 전기공학과 교수 재직 중.



이 재 철(Jae-cheol Lee)

2014년 부산대학교 공과대학 전자전기공학부 졸업. 현재 부산대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사과정 재학 중.



허 국 성(Guo-Cheng Xu)

2006년 XiDian University(China) 공과대학 機電공학과 졸업. 2010년 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사졸업 2012년 부산대학교 전자전기공학과 박사수료. 현재 모니텍(주) 재직 중