

LED 구동 IC를 위한 능동 전류 조절기의 설계

Design of an Active Current Regulator for LED Driver IC

윤성진* · 오택준** · 조아라*** · 기석립§ · 황인철†
(Seong-Jin Yun · Tak-Jun Oh · Seok-Lip Ki · In-Chul Hwang)

Abstract - This paper presents an active current regulator for LED driver IC. The proposed driver circuit consists of DC-DC converter for supplying constant DC voltage to LED, active current regulator for compensating channel-to-channel current error from LED strings and feedback circuit for controlling duty ratio of the converter. The proposed active current regulator senses current of LED channels by equalizing both V_{DS} and V_{GS} at LED current control transistor. Because the proposed circuit directly measures the LED channel current without a sensing resistor and regulates all channel with same regulation loop, the power consumption and the current error are much smaller compared with previous works. The measured maximum efficiency of overall LED driver IC is approximately 94% and current error of LED channel-to-channel is under $\pm 1.3\%$. The proposed LED driver IC is fabricated using Dongbu 0.35 μ m BCD process.

Key Words : Active current regulator, Current mirror, LED driver IC

1. 서 론

최근 몇 년간 LED소자를 조명기구로 이용하기 위한 연구 및 기술개발이 활발히 진행되었다. 이러한 조명용 LED를 구동하기 위해서는 출력 전류를 정확하게 제어해야 한다. 왜냐하면 LED의 밝기는 전류와 비례해서 바뀌기 때문이다. 하지만 LED는 그 순방향 전압의 변화에 대해 지수함수적으로 전류가 바뀌는 특성을 가진 소자이다. 따라서 전압을 조절해서 여러 개의 LED를 구동하기 위해 직렬로 연결하는 방법이 가장 효과적이다. 하지만 이 방법은 LED의 순방향 전압이 축적되어 직렬 연결할 수 있는 LED의 개수가 제한된다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제는 LED를 병렬로 연결함으로써 해결할 수 있지만 각각의 LED는 공정 오차나 온도 특성에 의해 전압-전류 특성이 달라지기 때문에 별도의 전류 평형 방법을 사용하지 않으면 각각의 LED 열에 흐르는 전류를 동일하게 할 수 없다[1]-[3].

LED 열의 전류 평형을 맞추는 가장 고전적인 방법으로는 전류 제한 저항을 이용한 방법이 있다[1]. 이 방법은 가장 쉽게 구현이 가능하다는 장점이 있지만 전류 평형 특성이 나쁘고 효율이 떨어진다는 단점이 있다. 또 다른 방법으

로는 스위칭 레귤레이터나 선형 레귤레이터를 이용하는 방법이다[4]-[6]. 이 경우는 전류 평형 특성은 좋지만 추가적인 회로 및 저항을 필요로 하므로 면적 및 전력 소모가 추가된다는 단점이 있다. 마지막 방법으로는 일정한 기준 전류를 만들어주고 current mirror를 이용해 각 LED열에 복사해주는 방식이다[7], [8]. 이 방법은 저항이 필요 없으므로 효율 면에서 우수하다는 것이 장점이지만 current mirror의 출력 임피던스가 유한하기 때문에 복사하는 과정에서 오차가 발생할 수 있으며 트랜지스터 간의 mismatch가 존재할 수 있으므로 전류 오차가 발생하게 되는 단점이 있다.

본 논문에서는 새로운 구조의 능동 전류 조절기를 제안하여 LED 전류 조절기에서 발생하는 효율저하와 전류 오차를 개선하고자 한다. 제안하는 능동 전류 조절기는 on-chip current sensing 기법을 이용하여 LED 채널의 전류를 감지하는데 발생하는 전력 소모를 줄였으며 동일한 감지 트랜지스터에서 각 채널의 전류를 교번하여 감지함으로써 감지 오차가 발생하지 않도록 하였다. 따라서 기존의 방법과 비교하여 효율을 개선하고 LED 채널간의 전류 오차를 개선하였다.

2. 본 론

2.1 제안된 LED 전류 평형 기법

그림 1(a)는 일반적인 선형 레귤레이터를 보여주며 그림 1(b)는 current mirror를 사용한 방법을 보여준다. 각각의 방법을 사용할 때 LED열에 흐르는 전류는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

* 준 회원 : 강원대 공대 전기전자공학과 석사과정

** 준 회원 : 강원대 공대 전기전자공학과 석사과정

*** 준 회원 : 강원대 공대 전기전자공학과 석사과정

§ 준 회원 : 강원대 공대 전기전자공학과 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 강원대 전기전자공학과 부교수

E-mail : ihwang@kangwon.ac.kr

접수일자 : 2011년 12월 14일

최종완료 : 2012년 3월 8일

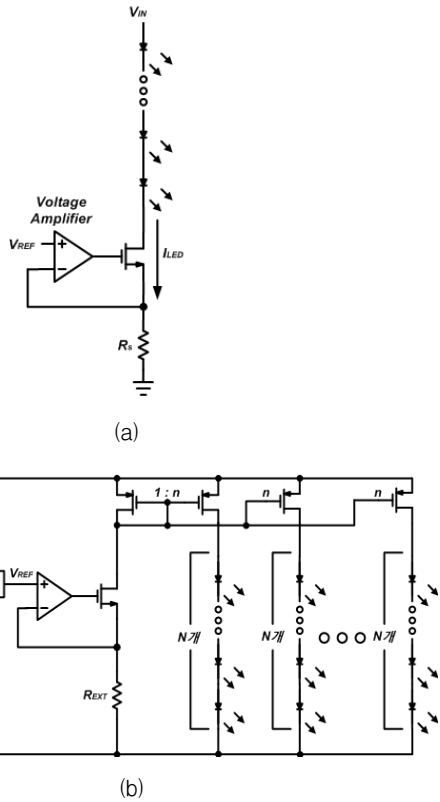


그림 1 LED의 전류 평형을 맞추기 위한 기존의 회로 (a)선형 레귤레이터, (b) current mirror
 Fig. 1 Traditional circuit for LED current balancing (a) linear regulator, (b) current mirror

$$I_{LED} = \frac{V_{REF}}{R_s} \quad (1)$$

$$I_{LED} = n \cdot \frac{V_{REF}}{R_{EXT}} \quad (2)$$

하지만 앞에서 설명한 바 있듯이 선형 레귤레이터의 경우 감지 저항인 R_s 에 의해 전력 소모가 발생하게 되는 단점이 있으며 current mirror의 경우 전력 소모는 선형 레귤레이터보다 적지만 트랜지스터의 mismatch와 유한한 출력 임피던스에 의해 전류 오차가 발생하는 단점이 있다. 따라서 전력 소모를 최소화 하면서도 전류 오차를 줄이는 방법이 필요하게 된다.

그림 2는 선형 전류 조절기의 개념도 및 on-chip current sensor의 회로도를 나타낸다. 그림에서와 같이 감지 저항 없이 전류를 감지하고 그 값을 전류 증폭기를 이용하여 I_{REF} 와 같게 만들어 주므로 전력 소모를 최소화 할 수 있다. On-chip current sensor는 연산 증폭기를 이용해 전류 조절 트랜지스터 M_1 과 감지 트랜지스터 M_{sen} 에 동일한 V_{GS} 와 V_{DS} 가 걸리게 함으로써 LED에 흐르는 전류를 감지한다. 또한 각 트랜지스터의 크기는 3000:1로 맞춰졌기 때문에 감지된 전류는 매우 작은 값이 된다. 그림 3(a)는 스위치에 걸리는 전압과 각 노드의 파형이며, 그림 3(b)는 제안된 선형 전류 조절기의 회로도이다. 그림 3(a)의 S1, S2, SB1, SB2는

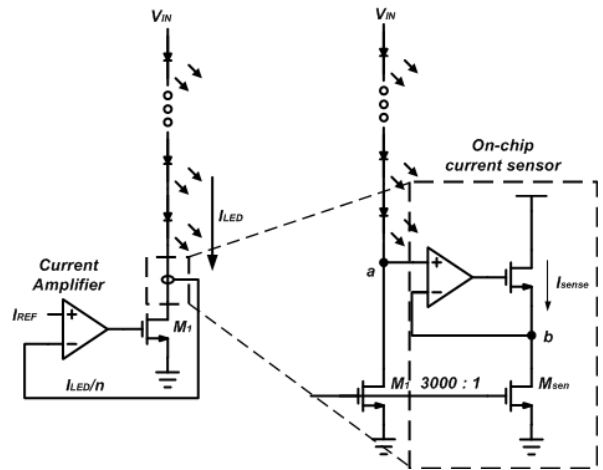


그림 2 능동 전류 조절기의 개념도 및 on-chip current sensor의 회로도.
 Fig. 2 Conceptual diagram of active current regulator and circuit diagram of on-chip current sensor

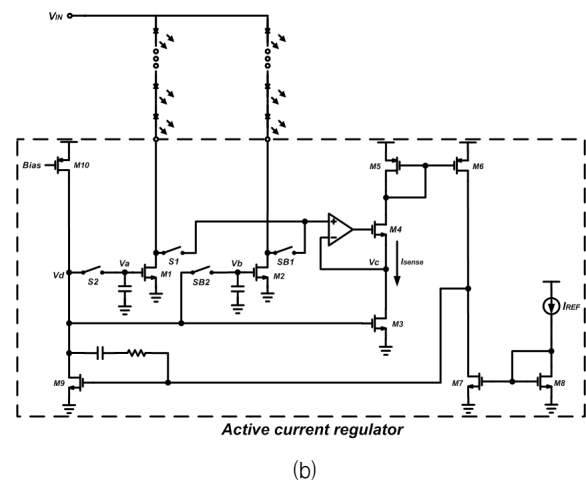
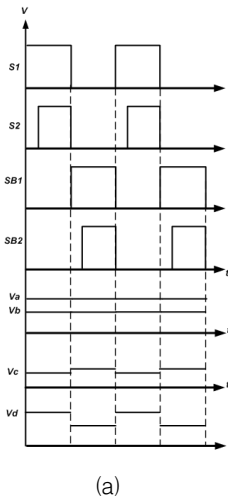


그림 3 (a) 각 스위치 및 노드의 파형 (b) 제안하는 능동 전류 조절기의 회로도
 Fig. 3 (a) Waveform of each switch and node (b) circuit diagram of proposed active current regulator

각 스위치에 인가되는 전압 파형으로 logic high에서 스위치가 on되고, logic low에서 스위치가 off된다. M1, M2는 각 LED 채널의 전류 조절 트랜지스터이며 감지 트랜지스터는 M3이다. 감지된 전류 I_{sense} 가 I_{REF} 전류와 서로 비교되어 전압이득을 얻어 V_d 로 변환 되면서 다시 M1, M2, M3의 V_{GS} 를 바꿔주게 된다. 그림에서 알 수 있듯이 M1과 M2의 V_{GS} 및 V_{DS} 전압은 동일한 M3로 번갈아 가면서 전달되고 동일한 제어 루프를 통해 조절되므로 감지 오차가 발생하지 않는다. 또한 채널이 늘어난다 해도 스위칭 신호만 더 만들어 주면 되므로 회로 역시 간단해진다. 최종적으로 LED 열간의 전류오차는 최소화되며 동일한 구조에서 1Ω의 감지 저항을 사용한 선형 레귤레이터에 비해 전체 시스템의 효율은 2%가량 향상된다.

LED 열에 흐르는 전류는 능동 전류 조절기의 동작에 의해 I_{REF} 전류의 크기를 따라가게 된다. 따라서 이 I_{REF} 전류를 조절해 줌으로써 LED의 전류를 조절할 수 있고 밝기를 조절해 줄 수 있게 된다. 본 LED 구동 IC는 외부에서 3bit 디지털 신호를 입력해 주어서 이 코드 값에 의해 I_{REF} 전류가 5uA~400uA까지 8단계로 조절되며 이 값에 따라 LED의 밝기도 8단계로 조절된다.

2.2 회로 설계

그림 4는 제안하는 능동 전류 조절기가 포함된 LED 구동 IC의 전체 블록도를 나타낸 것이다. 일반적인 전류 모드 동작하는 boost converter에 출력 단의 LED의 전류 평형을 맞추주기 위한 능동 전류 조절기가 추가된 구조이다. Step-up으로 동작하는 boost converter는 asynchronous mode로 동작하며 rectifier 소자로 schottky diode를 사용한다. 컨버터에 사용되는 인덕터, 다이오드, 출력 커패시터, frequency compensator에 사용되는 외부 저항과 커패시터 및 컨버터 출력 단의 LED를 제외한 모든 블록은 IC내부에 집적된다. 컨버터의 출력 단은 2채널에 각각 6개의 LED가 직렬로 연결된다. 능동 전류 조절기에 걸리는 2개 채널의 전압 중 낮은 전압이 주파수 보상기에서 기준 전압과 동일해지도록 피드백 루프를 통해 컨버터의 출력 전압이 정해진

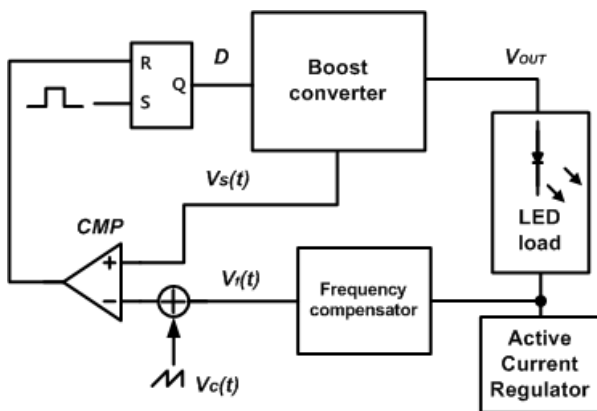


그림 4 제안하는 능동 전류 조절기가 포함된 LED 구동 IC의 블록도

Fig. 4 Block diagram of LED driver IC with proposed active current regulator

다. Frequency compensator에서는 내부 OTA의 이득과 외부에 연결되는 저항 및 커패시터 값을 통해 전체 LED 구동 IC의 동작이 안정되도록 주파수 보상을 해주며 control DC 전압인 $V_f(t)$ 와 램프 신호인 $V_c(t)$ 빼주어 일정한 negative slope를 가지는 DC전압으로 변환시켜서 스위칭 시비율이 50%를 넘어갔을 때 발생할 수 있는 발진 문제를 해결하였다. Comparator(CMP)에서는 앞 단에서 처리된 $V_f(t)-V_c(t)$ 와 Current sensor를 통해 감지된 인덕터 전류인 $V_s(t)$ 크기에 의해 RS-ratch의 reset신호가 생성되어서 최종적으로 컨버터의 시비율이 결정된다.[9]

2.2 시뮬레이션 결과

제안된 능동 전류 조절기를 포함한 LED 구동 IC는 동부 BCD 0.35μm 공정을 이용하여 설계하였다. 설계한 능동 전류 조절기는 전류 오차가 1.3%미만이 되도록 설계되었으며 기준전류를 조절함으로써 LED열의 전류를 60mA부터 400mA까지 조절되도록 제어할 수 있다. 집적회로로 구현된 회로의 사이즈는 능동 전류 조절기가 186μm X 96μm이며 전체 회로의 사이즈는 1.06mm²이다. 능동 전류 조절기는 간단한 회로 구성으로 구현이 가능하기 때문에 면적 소모가 매우 작은 것을 알 수 있다. 그림 5는 전체 회로의 chip layout 이다.

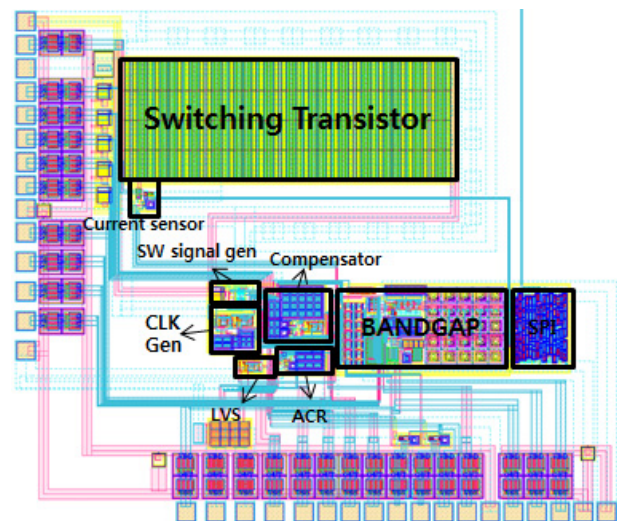


그림 5 제안하는 LED 구동 IC의 chip layout
Fig. 5 Chip layout of proposed LED driver IC

그림 6은 시뮬레이션을 통해 확인한 LED 전류 변화에 따른 각 전류 평형 기법들의 전류 오차를 나타낸 그래프이다. 각각은 LED를 정전압으로 구동했을 때, 선형 레귤레이터를 사용했을 때, current mirror를 사용했을 때, 그리고 제안하는 방법을 사용했을 때를 나타내며 모두 동부 BCD 0.35μm 공정을 이용해 동일한 조건에서 시뮬레이션 하였다. LED의 세팅은 두 개의 채널에 각각 6개의 LED를 직렬로 연결했으며 한 쪽 채널은 모두 순방향 전압이 3.6V인 LED를, 다른 한 쪽은 여섯 개 중 두 개의 LED만 3.2V인 LED를 사용하여 각 채널마다 전류 오차가 발생하도록 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 정 전압으로 구동 했을 때 LED 채

널 간의 전류 오차는 매우 크게 나타나지만 current mirror를 사용하면 약 2.5% 이내로 감소시킬 수 있고 선형 레귤레이터를 사용했을 때는 전류 오차가 0.1% 이내로 나타났다. 하지만 선형 레귤레이터의 경우에도 저항의 부정합을 고려한다면 시뮬레이션 결과보다는 오차가 더 발생할 것이다. 제안하는 능동 전류 조절기를 사용했을 때는 약 1.2% 이내의 전류 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 전류 오차는 다음과 같은 수식으로 구할 수 있다.

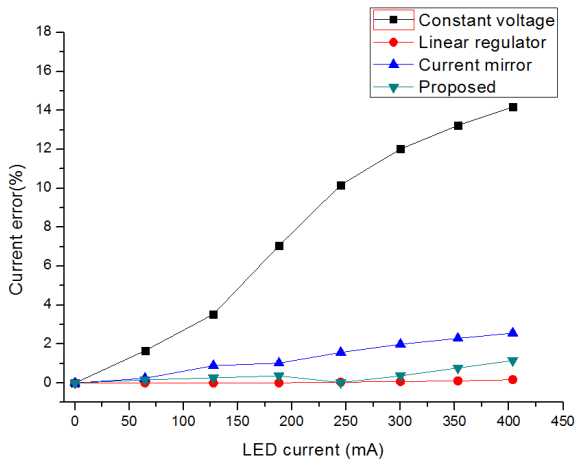


그림 6 LED 전류에 따른 채널 간의 전류 오차
Fig. 6 LED current versus current error between two channels

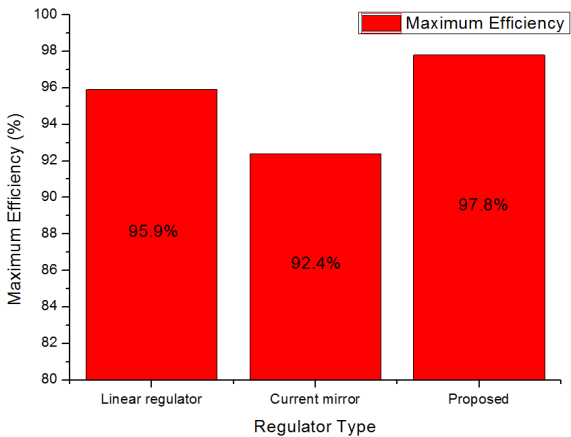


그림 7 레귤레이터 종류에 따른 최대 효율
Fig. 7 Regulator type versus maximum efficiency

$$Standard\ deviation = \sqrt{\frac{(I_{Ch1} - I_{ave})^2 + (I_{Ch2} - I_{ave})^2}{2}} \quad (4)$$

$$Current\ error(\%) = \frac{Standard\ deviation}{I_{ave}} \times 100 \quad (5)$$

여기서 I_{Ch1} , I_{Ch2} , I_{ave} 는 각각 채널1의 전류, 채널2의 전류, 두 전류의 평균 전류를 뜻한다. 그림 6(b)는 각 전류 평형 기법들의 최대 효율을 나타낸 그래프이다. 여기서 나타낸 효율은 컨버터의 효율은 100%라고 가정하고 출력단의 출력

전력 대비 LED의 소모 전력으로 계산하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 current mirror의 효율이 가장 떨어졌고 제안된 방법은 선형 레귤레이터에 비하여 약 2%가량의 효율 향상이 있는 것을 확인할 수 있었다. LED 구동 IC를 포함한 전체 시스템의 효율은 다음과 같이 나타났다.

$$Efficiency(\%) = \frac{LED\ power}{Input\ power + IC\ decipated\ power} \times 100$$

$$= \frac{18V \times 0.7A}{(12V \times 1.11A) + (5V \times 0.002A)} \times 100 = 94.5\% \quad (5)$$

표 1에서는 current mirror를 응용한 기존 연구와의 특성을 비교하였다.

표 1 기존 연구들과의 특성 비교
Table 1 Comparison with conventional studies

	[7]	[8]	제안하는 LED 구동 IC
설계 공정	Magnachip 0.25μm process	0.35μm high voltage process	Dongbu BCD 0.35μm process
공급 전압	9~16V	30V	12V
출력 전압	3V	10~20V	18~20V
인덕터	N/A	470uH	15uH
커패시터	N/A	10uF	6.6uF
스위칭 주파수	N/A	100kHz	200kHz
최대 효율	not given	87%	94%
전류 오차	0.18%	1.3%	1.15%
칩 면적	0.674mm ²	5.4mm ²	1.06mm ²

3. 결 론

본 논문은 개개 LED의 전압-전류 특성이 다른 것에 의해 LED 채널 간에 발생하는 전류오차를 감소시킨 능동 전류 조절기에 관하여 설명하였다. 본 논문에서 제안된 능동 전류 조절기는 감지 저항 없이 LED 열의 전류를 감지하며 순차적으로 모든 채널의 전류가 동일한 감지 트랜지스터 및 제어 루프에 의해 감지되고 제어된다. 따라서 기존 연구에서 사용하던 선형 레귤레이터나 current mirror를 이용한 방법에 비하여 효율을 향상시켰고 채널 간의 전류 오차를 줄였다.

제안하는 LED 구동 IC는 동부 BCD 0.35μm 공정으로 설계되었으며 칩 면적은 1.06mm²이다. 시뮬레이션을 통해 확인된 전체 시스템의 최대 효율은 94.5%이며 전류 오차는 1.15%로 current mirror를 사용한 방법과 비교하여 1.4%가량 향상되었다.

감사의 글

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원 사업의 연구결과로 수행되었음”(NIPA-2012-H0401-12-1002)

참 고 문 헌

[1] Y. Hu and M. M. Jovanovic, "A New Current-Balancing Method for Paralleled LED Strings," IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), pp. 705-712, March, 2011.

[2] H. Mu, G. Li and J. Liu, "A High Precision Constant Current Source Applied in LED Driver," Symposium on Photonics and Optoelectronics, pp. 1-4, May. 2011.

[3] Y. Hu and M. M. Jovanovic, "LED Driver with Self-Adaptive Drive Voltage," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 6, pp. 3116-3125, Nov. 2008.

[4] M. Doshi and R. Zane, "Digital Architecture for Driving Large LED Arrays with Dynamic Bus Voltage Regulation and Phase Shifted PWM," IEEE Applied Power Electronics Conference(APEC), pp. 287 - 293, Feb. 2007.

[5] E. C. Kang, D. K. Kwon, J. E. Yeon, D. S. Kim and W. Oh, "A New Low Voltage Detecting Method for Multi-String LED BLU Circuit," European Conference on Power Electronics and Applications(EPE '09), sept. 8-10, 2009.

[6] K. I. Hwu and Y. T. Yau, "Applying One-Comparator Counter-Based Sampling to Current Sharing Control of Multi-Channel LED Strings," IEEE Applied Power Electronics Conference(APEC), pp. 737-742, Feb. 21-25, 2010.

[7] J. H. Lee, L. Y. Jin, L. Z. Li, P. B. Ha, and Y. H. Kim, "Design of Parallel Backlight LED Driver IC," IEEE International conference on ASIC(ASICON), pp. 1125-1128, Oct. 2009.

[8] 박재현, 윤형도, 황성민, "자기 최적화된 능동 정전류원을 갖는 다중 채널 LED 드라이버의 설계," LED 학회지 제1권, 1호, pp. 70~78, 2009. 12.

[9] R. W. Erickson, and D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics," 2nd ed. Boston, MA:Kluwer, 2001.



오택준 (吳澤俊)

2011년 2월 강원대학교 전기전자공학전공 졸업. 2011년 2월 ~ 현재 강원대학교 전기전자공학과(석사과정)
Tel : 010-3118-4290
E-mail : tjoh@kangwon.ac.kr



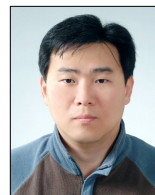
조아라 (趙娥嬴)

2011년 2월 강원대학교 전기전자공학전공 졸업. 2011년 2월 ~ 현재 강원대학교 전기전자공학과(석사과정)
Tel : 010-2971-6346
E-mail : arco@kangwon.ac.kr



기석립 (奇石立)

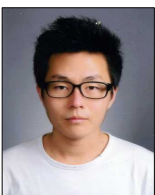
2011년 2월 강원대학교 전기전자공학전공 졸업. 2011년 2월 ~ 현재 강원대학교 전기전자공학과(석사과정)
Tel : 010-4401-0398
E-mail : slki@kangwon.ac.kr



황인철 (黃仁哲)

1993년 고려대학교 전자공학 졸업. 1995년 고려대학교 공학석사 졸업. 2000년 고려대학교 공학박사 졸업. 2000년 ~ 2001년 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign에서 박사후 연구원. 2001년 ~ 2007년 삼성 Sys. LSI 책임연구원. 2007년 ~ 현재 강원대학교 전기전자공학전공 부교수
Tel : +82-33-250-6299
E-mail : ihwang@kangwon.ac.kr

저 자 소 개



윤성진 (尹星珍)

2010년 2월 강원대학교 전기전자공학전공 졸업. 2012년 2월 강원대학교 전기전자공학과(석사과정) 졸업. 2012년 2월 ~ 현재 동부하이텍 디스플레이 사업부 연구원.
Tel : 010-6506-8841
E-mail : seongjin.yun@dongbu.com