

Thermal Characteristics of a Heat Sink with Bypass Structure for GaN-based Laser Diode

Byeong-Gwan Ji, Seung-Gol Lee, Se-Geun Park, and Beom-Hoan Oh[†]

School of Information and Communication Engineering, Inha University,
253 Younghyun-dong, Nam-gu, Inchon 22212, Korea

(Received June 21, 2016; Revised manuscript October 4, 2016; Accepted October 11, 2016)

The thermal characteristics of a laser diode TO package has been analyzed using a commercial computational fluid dynamics (CFD) tool, and the thermal bypass structure was optimized. Comparison of device temperature and the estimated thermal resistance of the resultant structure showed that the bypass structure relieved the thermal bottleneck, and improved the thermal characteristics quite efficiently.

Keywords: LD, Thermal resistance, Heat flow

OCIS codes: (230.0230) Optical devices; (230.3670) Light-emitting diodes; (140.2020) Diode Laser

열 우회 구조를 적용한 GaN 레이저 다이오드 패키지의 열특성 분석

지병관 · 이승걸 · 박세근 · 오범환[†]

인하대학교 정보통신공학과
22212 인천시 남구 인하로 100

(2016년 6월 21일 받음, 2016년 10월 4일 수정본 받음, 2016년 10월 11일 계재 확정)

레이저 다이오드 TO 패키지 내부의 주요 부분과 히트싱크 구조의 열전달 특성을 전산모사를 통해 분석하고, 개선구조의 효율적 적용방안을 제안하였다. 열 병목 현상을 개선하기 위해, 레이저 다이오드 상부에 열 우회를 도모할 수 있는 방열구조물을 설치하는 것을 제안하였고, 열저항 단순모델 기대치와 비교하여 그 우회 효율 개선 정도를 더욱 향상시키는 적용 범위를 파악하였다. 열 병목을 감안하여 방열 도움 구조물을 적절히 추가함에 따라, 통상적인 기대 수준보다 더욱 향상된 열 우회 효율을 얻을 수 있었음을 보고한다.

Keywords: 레이저 다이오드, 열저항, 열유동

OCIS codes: (230.0230) Optical devices; (230.3670) Light-emitting diodes; (140.2020) Diode Laser

I. 서 론

GaN 기반의 레이저 다이오드 (LD)는 광 저장장치, 광통신 및 차세대 광원등으로서 사용이 늘어나면서 점차 고출력 사용환경에서의 신뢰성도 요구되고 있다.^[1,2] 고온 사용 환경은 레이저 다이오드의 광 출력력을 약화시키며, 잠재적으로 소자의 신뢰성과 수명에 큰 문제를 발생시키므로, 반도체 기반 레이저 다이오드의 방열 특성을 개선하는 것은 고출력 광소자의 성능과 수명에 매우 중요하다. 레이저 다이오드 패키지의 열흐름과 방열 특성은 각 구조적 성분들에 의해 결정되며, 점열원에 의한 열 병목현상이 생기므로 고출력 GaN 기

반의 레이저 다이오드에서 패키지의 방열 최적화 설계가 매우 중요해졌다^[3,4]. 방열 성능을 개선하기 위해, 다이오드와 히트싱크 사이에 Heat Spreader를 사용하여 열 전달 면적을 넓히는 방법과,^[5] 다이오드와 히트싱크 접합부의 Solder의 방열 성능을 개선시키는 방법 등이 사용되고 있으나,^[6] 수직 구조로 설계된 레이저 다이오드 좁은 발열부에서는 구조 전체를 효율적으로 이용하지 못하고, 다이오드와 히트싱크 등 접합부의 물리적 크기 차이에 의한 병목현상으로 방열특성 개선에 한계가 있다. 접합부의 병목현상을 개선하기 위해 수평 방향의 우수한 열전도도를 갖는 그레핀층을 접합부에 추가하는 방법^[7]이 있지만 상용제품의 반도체 패키지 과정에서

[†]E-mail: obh@inha.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

바로 적용하기에 어려움이 있다.

본 논문에서는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 전산모사를 통해 GaN 기반의 LD(Laser Diode) TO 패키지의 방열 특성을 분석하고, 방열 성능을 효과적으로 개선하는 단순한 히트싱크 구조를 제안하여, 통상적인 기대수준 이상으로 열우회 효율을 개선하는 결과를 보고한다.

II. GaN-based Laser Diode Simulation Model

방열 특성 분석을 위해 통상적으로 활용되는 열흐름 방정식은 아래와 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = q_v + \kappa \nabla^2 T \quad (1)$$

여기서, T 는 온도, ρ 는 밀도, c 는 비열, t 는 시간, q_v 는 단위면적당 발생되는 열량을 나타내며, κ 는 열전도도이다. 전산모사는 Finite element method (FEM)을 이용한 상용 프로그램인 Computational Fluid Dynamics (CFD) ANSYS Icepak을 이용하였다.

분석될 GaN 기반 LD의 TO 패키지 구조는 그림 1(a)와 같은 형태이고, 전산모사 영역은 TO 패키지 내의 LD와 히트싱크 부분으로 한정한다. 전산모사 조건은 정상상태, $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, 자연 대류이고, 주변부 공기의 열전도도는 0.025 W/mK

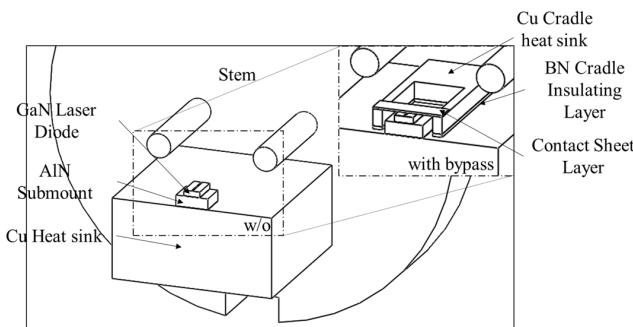


Fig. 1. Brief structure of typical LD (Laser Diode) Package and the proposed thermal bypass structure (inset).

Table 1. Layer thickness and corresponding thermal conductivity for GaN-LD package^[9]

Component in the structure	Material	Thickness(μm)	κ ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
P-contact layer	Au	30 μm	423
Active region	In _{0.15} Ga _{0.85} N/GaN MQWs	4 μm	70
Substrate(Buffer layer)	GaN	100 μm	130
Submount	AlN	200 μm	170
Heat sink	Cu	1500 μm	400
Cradle Heat sink	Cu	302 μm	400
Cradle insulating layer	Boron nitride	10 μm	55

으로 설정되었고, 히트싱크 와 Stem이 연결되는 부분은 40°C 로 설정하였다.

전산모사의 온도분포 결과로부터 LD와 heatsink를 구성하는 각 층의 유효 열저항을 얻어내고, 이를 간단한 열저항 근사기대치와 비교하여, 병목현상에 의해 열저항수치의 과장이 심해진 곳을 알아보고 전체적인 열 전달 특성을 파악하였다. 전산모사 온도분포로부터 얻어내는 각 층의 유효열저항 R 은 아래 식 (2)를 사용한다.

$$R = \nabla T / Q \quad (2)$$

여기서, ∇T 는 각 부위의 온도 차이, Q [W]는 그 부위를 통과하는 열 전달량이며, 전체 열저항은, 직렬연결된 전기저항의 단순근사식과 유사하게, 직렬연결 모델로 근사하였다.

또한, 단순히 균일한 열 흐름을 가정하여 ‘단순균일 열 흐름 근사’가정으로, 아래 식 (3)을 사용하여 각 층의 단순한 열저항 기대치를 산출하여, 이를 비교 기준치로 두었다.

$$R = L / kA \quad (3)$$

여기서 $k(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$ 는 열전도도, A 는 구조체의 열 흐름단면적 (열전달 경로상 열 흐름 방향에 수직한 면의 유효단면적), ‘ L ’은 열전달 경로상의 길이(구조체의 높이)이다. LD의 출력은 2 W로 두고, 활성층의 표면 발열을 가정하고 발열량은 1W로 설정하여 전산모사하였다. 대상으로 설정한 LD 패키지는 AlN Submount 위에 GaN 기반의 LD를 탑재시킨 구조이며, 그 아래에 Cu 히트싱크가 있는데, LD의 구조 중에서 P층과 N층의 두께 100 nm이하의 상세구조는 간단히 Active layer로 통합하여 전산모사를 진행하였다. 각 층의 상세 구조 변수는 표 1에 정리하였다.

상기 구조의 광원 패키지에 대해 열학산 전산모사한 온도분포 결과는 그림 2(a)에 보였으며, 다음 절에 적용된 요람형 전극 겸 방열 구조물을 추가한 온도분포 결과를 그림 2(b)에 비교하여 나타내었다. 그림 2(a)에서 TO 패키지 내부 최고온도는 80.4°C , 전체 열 저항은 40.4 K/W 로 얻어지며, 열분포 등고선 형태으로부터 LD의 P-contact 층 근처에서 등고선

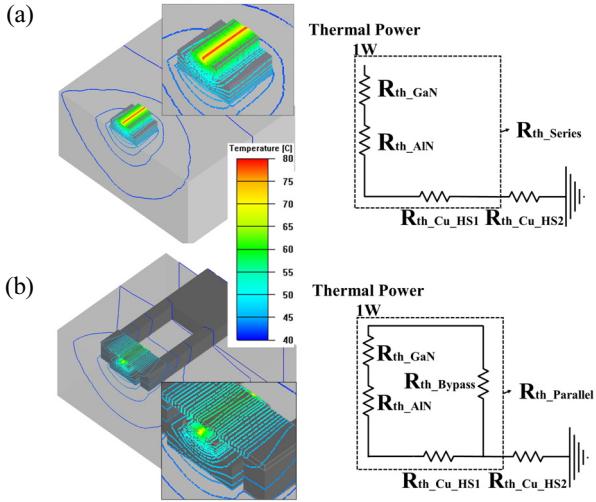


Fig. 2. Comparison of simulated results and the simple resist diagram between (a) typical LD package (b) the proposed structure.

이 등글게 촘촘한 것을 확인 할 수 있다. 이는 LD 상부로의 열전달은 매우 제한되어 있고, 하부구조로의 열전달은 ‘단순균일 열흐름 근사’와는 매우 다른 분산형태의 열흐름에 의해 열전달 병목현상이 생기고 있음을 의미한다. 그에 따라 GaN 층의 열 전달 유효 단면적은 ‘단순균일 열흐름 근사’로 가정된 구조상의 열흐름단면적에 비해 몹시 작아져 내부 열전달 경로상의 병목현상이 발생해 온도가 높아지게 된 것이다^[18]. 이제, GaN 레이저 다이오드 패키지 상에서 열전달 효율의 방열성능을 개선하고, 그 효율을 높이는 방안을 제안하고, 그 적용범위를 파악한다.

III. A Heat Sink with Additional Thermal Bypassing Cradle Structure

우선, 통상적으로 방열구조 설계 상 가장 먼저 고려되는 Cu 히트싱크의 두께에 따른 방열 성능의 영향을 보기 위해 Cu 히트싱크의 두께를 500~1600 um까지 바꿔가며 방열 성능 개선 정도를 확인하였다. 그림 3의 두 자료 곡선 중에 상부 곡선에 나타나듯이, 두께를 500 um에서 2~3배 이상 높여도 열저항의 감소는 ~10% 정도로서 기대 수준 50%, 67%에 현저히 미치지 못하고 있다. 즉, 단순히 방열판의 두께를 키우는 방식의 개선방식은 그 효과가 매우 비효율적임을 알 수 있다.

LD는 좁은 띠 형태의 활성층 구조로 인해 열전달에 있어 필연적인 열 병목을 가져오며, 그 근처는 단순한 방열설계상 기대치의 2-3배 이상 높은 열저항을 보이고 있고, 하단부에 계속되는 구조층에서도 열저항수치가 높게 나타나는 현상이 존재한다. 이러한 열병목 현상을 저감하기 위해 여러 시도가 가능하지만 본고에서는, LD 상단에 열 전달 우회경로를 추가할 수 있는 요람 모양의 구조물을 추가하고 상부 전극의

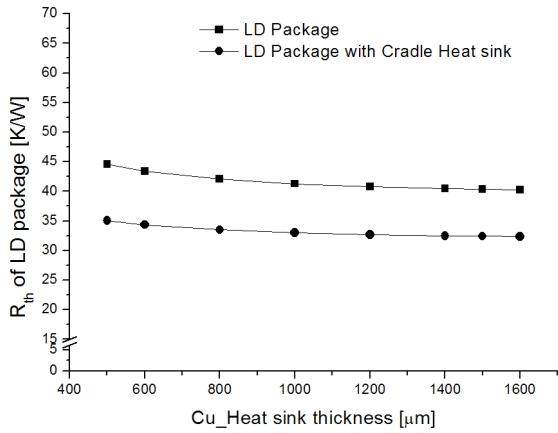


Fig. 3. Comparison of effective total thermal resistance values between the typical LD package and the proposed structure as a function of Cu-heatsink thickness.

너비에 따른 열우회 효과를 확인한다. 그림 1의 오른쪽 상단에 삽입된 그림처럼, LD 주변에 요람 모양의 방열 구조물을 추가하고 상부전극을 연결하여 발열부에 가장 가까운 위치에 열 전달 우회경로를 두었다. 그림 3의 하부 곡선에서 보여주듯이, 추가된 열우회경로(전극폭 400 μm)로 인하여 그래프 상의 모든 경우에 ~20% 정도의 전체 열저항 개선을 보이고 있다. 열우회 요람구조는 레이저 다이오드 후방에 모니터용 포토 다이오드의 공간을 남겨두고 레이저 다이오드 상부에 가깝게 접근하기 위해 양쪽 사이드를 LD 가까이 접근하는 것을 가능하게 한다. 요람구조와 히트 싱크의 전기적 분리를 위해 요람구조 하단에는 10 um의 절연층이 추가된 구조를 가정하였다.

그림 3의 전체 열저항 개선은 열 전달 경로를 단순화하여 1차원적 열 저항 연결 모델로 기술된다. 상용 LD 패키지에서는 GaN LD와 AlN submount, Cu 히트싱크가 직렬로 연결된 것으로, $R_{th_Series} + R_{th_Cu_Heat_sink}$ 로 두고, 요람 구조를 적용한 LD 패키지는 GaN-LD의 활성층에서부터 Cu Heat sink 후반부까지 열을 우회 전달해주는 bypass 경로(R_{th_bypass})를 추가한 병렬 열저항과 같이 다루어, 그림 2(b)의 $R_{th_Parallel} + R_{th_Cu_Heat_sink}$ 로 둔다. 기본 구조의 단순 직렬 열저항에 있어서, 각층의 단순한 열저항 수치(Simply estimated Result, SeR)는 식 (3)으로 산출하였고, 전산 모사의 결과(CFD simulated Result, CsR)는 식 (2)를 통해 열저항 수치를 도출하였다. 전체 열저항 합계는 아래 식 (4)와 같다.

$$R_{th_total} = R_{th_GaN} + R_{th_AlN} + R_{th_Cuheatsink1} + R_{th_Cuheatsink2} \quad (4)$$

$$R_{th_series} = R_{th_GaN} + R_{th_AlN} + R_{th_Cuheatsink1}$$

이렇게 산출한 각 부분의 열저항 및 패키지의 총 열저항은 그림 4와 표 2에 비교하여 나타내었다. 단순열저항 산출수치(SeR)와 전산모사 산출수치(CsR)의 내역을 상세히 확인하면,

$R_{th_Series}(SeR) = 15.5$ (K/W)이고, $R_{th_Series}(CsR) = 40$ (K/W)로서, CsR 수치는 SeR 수치에서 기대하는 수준의 성능을 갖지 못하며, 이는 전술된 바와 같이, 필연적인 열 병목현상에 의해 유효 열 전달 면적이 기본적인 단순 근사모델 방식에서 기대한 정도에 미치지 못함을 의미한다.

이제 요람 구조를 통해 설치된 열 우회경로의 경우는, 병렬저항의 경우와 같이, 식 (5)로 기술한다.

$$R_{th_total} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{th_GaN}} + \frac{1}{R_{th_AlN}} + \frac{1}{R_{th_Cuheatsink1}} \right)} + R_{th_Cuheatsink2}$$

$$R_{th_parallel} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{th_GaN}} + \frac{1}{R_{th_AlN}} + \frac{1}{R_{th_Cuheatsink1}} \right)} + \frac{1}{R_{th_bypass}} \quad (5)$$

이때, 열 우회경로의 우회 열 저항(R_{th_bypass})이 병렬 연결 성능에 중요한 역할을 하며, 식 (2)에서 면적을 고려하여 bypass 저항(R_{th_bypass})에 큰 영향을 미치는 부분은 크래들 구조와 LD를 연결해주는 상부접촉면의 폭(Contact sheet width)이 된다. 상부접촉면의 폭을 100~600 μm로 바꿔가며, SeR과

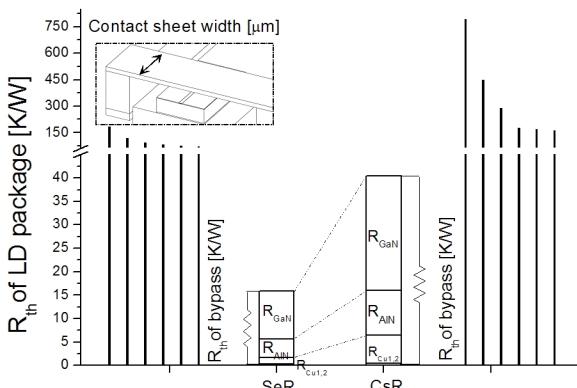


Fig. 4. Comparison of the thermal R values of each layer for modeled SeR(Simply estimated Result) and CsR(CFD simulated Result), and the bypass R for SeR and CsR.

CsR 방식으로 산출한 R_{th_bypass} 의 수치를 그림 4에 비교하여 나타내었다. 이때, CsR과 SeR 방식으로 산출된 각각의 수치 자체는, 열병목 현상에 의해, 서로 많이 다를 수 밖에 없지만, 상부접촉면 폭 증가에 따른 $R_{th_bypass}(SeR)$ 의 감소 비율과 $R_{th_bypass}(CsR)$ 의 감소비율은 유사해야 할 것이 기대되었고, 그 경향의 유사성은 그림과 같이 유사하게 나타났다. 다만, 상부접촉면의 폭 400 μm 이상부터 $R_{th_bypass}(CsR)$ 의 감소는 유의미한 감소는 보이지 않고 있다. 이는 구조상 상부접촉면의 폭이 LD 길이와 같아지면 상부 열우회경로의 열병목 개선이 포화되기 때문으로 판단되며, 표 2에 수치가 정리되어 있다. 또한, 유사하게 나올 것이 기대되는 총열저항의 감소 경향은 유사하면서도 의미 있는 차이를 보이고 있어 매우 흥미롭다. 즉, SeR 방식의 개선 기대수준과 CsR 방식으로 확인된 개선 효과 간에 결과가 역전되는 경향이 있었고, 이는 그림 5에 나타낸 상부접촉면 폭 증가에 따른 열우회비율의 변화 경향에 잘 나타난다.

상부접촉면 폭 100~300 μm 까지는 열 우회로가 담당하는 열 우회 효율(Thermal Bypass Ratio)의 단순 산출방식(SeR)

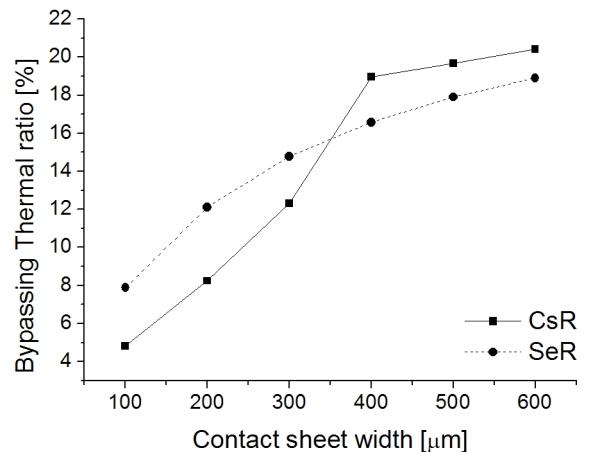


Fig. 5. Comparison of the variation curves of bypassing thermal ratio as a function of contact sheet width between SeR (Simply estimated Result) and CsR (CFD simulated Result).

Table 2. Comparison of the thermal resistances estimated according to the variation of the width and corresponding bypass ratio of thermal load between SeR (Simply estimated Result) and CsR (CFD simulated Result)

	CsR (CFD Simulated Result)			SeR (Simply Estimated Result)			
	Contact sheet width [μm]	R_{bypass} [K/W]	R_{series} [K/W]	Thermal Bypass Ratio [%]	R_{bypass} [K/W]	R_{series} [K/W]	Thermal Bypass Ratio [%]
100	790.4	40	40	4.8	181.1	15.5	7.89
200	444.7			8.3	112.4		12.1
300	284.9			12.3	89.5		14.8
400	171.1			19	78		16.6
500	163.4			19.7	71.1		17.9
600	156			20.4	66.5		18.9

수치가 전산모사 결과(CsR) 수치보다 높게 나와서, 열병목을 해결하는 방식으로 효율적이지 못하다는 판단이 되게 한다. 하지만 상부접촉면 폭이 400 μm 이상이 되면, SeR수치로 16.6%에 지나지 않던 열우회효율 기대보다 전산모사 결과(CsR)가 19%로 더 높게 나와서, 열우회효율 개선 효과가 우수해지고 있음을 나타내고, 이는 상부 열 우회로의 열병목이 하부 열 병목보다 완화되어 있으며, 열 우회 역할을 단순 기대 이상으로 잘 감당하고 있음을 의미한다. 즉, 열 우회경로를 추가 설치할 경우는 효과적으로 열 병목을 해소한 경로를 병렬 사용해야 효율적이 된다는 것이다.

IV. 결 론

GaN 기반의 Laser Diode (LD) TO 패키지를 대상으로 열 전달 특성을 분석하여, 전산모사 결과를 기반으로 병목현상이 심한 부분을 파악하고 열우회로를 효율적으로 설치하는 개선 방안과 그 효율변화를 분석하였다. LD 주변에 요람구조의 구조물을 설치하고 상부전극을 통해 열우회경로를 추가한 패키지가 전체 유효열저항을 효과적으로 개선하며, 적절한 경우에 단순기대 이상으로 방열 성능을 개선하는 것을 확인하였다.

GaN 기반의 LD 패키지 상에서 요람형 방열도움 구조물을 적용함으로써 방열 성능을 대폭 개선하게 되므로, GaN 기반의 LD 패키지 제작에 있어서의 방열구조물의 소형화에 큰 도움이 될 것이며, 고출력 레이저 다이오드의 제작에 있어 경제성과 기능성을 개선시키는 방안으로 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

“본 연구는 중점연구소 지원사업(2010 한국연구재단, 2010-0020163)의 지원을 받아 수행되었습니다.”

References

- W. J. Hwang, T. H. Lee, O. H. Nam, H. K. Kim, J. S. Kwak, Y. J. Park, and M. W. Shin, “Thermal analysis of GaN-based laser diode package,” *Phys. Status Solidi C* **3**, 2174-2177 (2006).
- O. H. Nam, K. H. Ha, J. S. Kwak, S. N. Lee, K. K. Choi, T. H. Chang, S. H. Chae, W. S. Lee, Y. J. Sung, H. S. Paek, J. H. Chae, T. Sakong, J. K. Son, H. Y. Ryu, Y. H. Kim and Y. Park, “Characteristics of GaN-based laser diodes for post-DVD applications,” *Phys. Status Solidi (a)* **201**, 2717-2720 (2004).
- P. Wen, D. Li, S. Zhang, J. Liu, L. Zhang, K. Zhou, M. Feng, Z. Li, A. Tian, and H. Yang, “High accuracy thermal resistance measurement in GaN/InGaN laser diodes,” *Solid-State Electron.* **106**, 50-53 (2015)
- M. Kuc, R. P. Sarzala, and W. Nakwaski, “Thermal crosstalk in arrays of III-N-based Lasers,” *Mater. Sci. Eng., B* **178**, 1395-1402 (2013).
- M. Kuc, M. Wasiak, and R. P. Sarzala, “Impact of Heat Spreaders on Thermal Performance of III-N-Based Laser Diode,” *IEEE Transaction on Components, Packaging and Manufacturing Technology* **5**, 474-482 (2015).
- B. M. Choi, S. H. Hong, Y. B. Jeong, K. B. Kim, S. G. Lee, S. G. Park, and B. H. O, “Improved Thermal Resistance of an LED Package Interfaced with an Epoxy Composite of Diamond Powder Suspended in H₂O₂,” *Korean J. Opt. Phot.* **25**, 221-224 (2014).
- B. G. Ji, and B. H. O, “Heat Conduction Analysis and Improvement of a High-Power Optical Semiconductor Source Using Graphene Layers,” *Korean J. Opt. Photon.* **26**, 168-171 (2015).
- B. G. Ji, S. G. Lee, S. G. Park, and B. H. O, “Simple Thermal Diverging Model of The Thin Epitaxial Layer of InP Laser Diodes,” *J. Koran. Phys. Soc.* **67**, 1175-1178 (2015).
- M. X. Feng, S. M. Zhang, D. S. Jiang, J. P. Liu, H. Wang, C. Chang, Z. C. Li, H. B. Wang, and H. Yang, “Thermal analysis of GaN laser diodes in a package structure,” *J. Chin. Phys. B* **21(8)**, 084209 (2012).