

Modified Thermal-divergence Model for a High-power Laser Diode

Hyeon Joong Yong, Young Jae Baek, Dong Il Yu, and Beom Hoan O[†]

*Department of Information and Communication Engineering, Inha University,
LED Smart Technology Advanced Research (LED-STAR) Center, 100, Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea*

(Received May 30, 2019; Revised July 2, 2019; Accepted July 10, 2019)

The design and control of thermal flow is important for the operation of high-power laser diodes (LDs). It is necessary to analyze and improve the thermal bottleneck near the active layer of an LD. As the error in prediction of the thermal resistance of an LD is large, typically due to the hyperbolic increase and saturation to linear increase of the thermal resistance as a function of thickness, it is helpful to use a simple, modified divergence model for the improvement and optimization of thermal resistance. The characteristics of LDs are described quite well, in that the values for simulated thermal resistance curves and the thermal cross section followed are almost the same as the values from the model function. Also, the thermal-cross-section curve obtained by differentiating the thermal resistance is good for identifying thermal bottlenecks intuitively, and is also fitted quite well by the model proposed for both a typical LD structure and an improved LD with thin capping and high thermal conductivity.

Keywords: Laser diode, Thermal resistance, Bottleneck, Thermal cross-section, Thermal divergence model

OCIS codes: (140.2020) Diode laser; (140.3320) Laser cooling

고출력 레이저 다이오드 광원의 열저항 개선을 위한 하부층 두께 의존성 수정 모델

용현중 · 백영재 · 유동일 · 오범환[†]

인하대학교 정보통신공학과, 고성능 LED 조명모듈 핵심기술 연구센터(LED-STAR)
Ⓣ 22212 인천광역시 미추홀구 인하로 100

(2019년 5월 30일 받음, 2019년 7월 2일 수정본 받음, 2019년 7월 10일 게재 확정)

고출력 레이저 다이오드 광원의 안정적 구동을 위한 방열 관리는 필수적이며, 발열부인 활성층 근처의 열흐름에 있어 병목이 심하므로 그 부분의 열저항을 분석하고 설계에 적용하여 개선하는 것이 매우 중요하다. 띠형 발열구조를 갖는 레이저 다이오드 광원은 열전달층 두께에 따라 열저항이 지수함수적으로 급격하게 증가하다가 점점 선형적으로 포화되므로 열저항을 분석함에 있어서 오차가 큰 어려움이 있으며, 보다 정확한 열저항 모델링이 필요하여 수정된 두께의존성 모델함수를 제안하고 그 정확성을 검증하였다. 또한, 전산모사로 얻어낸 열저항의 변화경향성을 미분하여 열전달-단면적의 변화를 구하여 열병목 부위가 직관적으로 파악되게 하였고, 제안하는 모델함수의 열전달-단면적 결과와도 비교하여 분석모델의 예측 정확성을 부연 확인하였다. 고열전도 보조층을 활용하여 열저항이 개선된 구조에 대하여도 그 열전달-단면적 변화경향과 열저항 개선효과를 높은 정확도로 분석한 결과를 소개한다.

Keywords: 레이저 다이오드, 열저항, 병목현상, 열전달 단면적, 열 유동 모델

OCIS codes: (140.2020) Diode laser; (140.3320) Laser cooling

I. 서 론

다양한 분야에 고출력 광원의 필요성이 증가하면서, 레이저 다이오드(laser diode, LD)의 높은 효율, 단색성, 고출력 신뢰성, 그리고 소형화 제작가능 등의 장점이 더욱 주목받고 있다. 이에 따라, LD는 의학용 레이저, 광정보저장기기, 자유

공간 광전송(free-space optics, FSO), 절단기술 등 다양한 산업에서 활용되고 있다. 고출력 광원으로서의 LD는 활성층의 온도조절을 위해 방열설계가 매우 중요하다^[1]. 활성층의 온도가 높아질수록 광특성과 전-광 변환 효율이 저하되고, 수명이 단축되며, 동작조건이 열화된다. 따라서 활성층 근처의 온도분포를 정확히 파악하고, 안정적으로 조절하는 것은 매

[†]E-mail: obh@inha.ac.kr, ORCID: 0000-0001-9992-7911

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

우 중요하지만, 소자크기($0.1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$)가 매우 작고, 내부온도의 직접 측정은 불가능하기 때문에 필요한 경우에는 전자분포를 간접적으로 파악하여 활성층 온도를 산출하거나 전체 구조를 전자기적-열적 전산모사하는 방법이 쓰인다^[2]. 띠형 구조의 고효율 발열체에 대하여 열저항을 개선하고자, 외부 온도와 발열량 정보를 통해 내부의 온도를 역산하는 기본모델이 제안되어 미세 발열체의 열병목 부위를 분석한 바 있으며^[3], 열병목을 개선하기 위한 상부층 효과가 제안되어, 그 개선효과도 잘 알려지고 있다^[4]. 이제, 이러한 기본 열저항 모델을 기반으로, 열병목 부위에서의 열전달 유효폭의 변화를 확인하면 더욱 직관적인 열저항 개선이 가능할 것으로 기대되어, 본 연구진은 활성층 근처 열전달층 두께에 따른 열저항 변화를 전산모사하여 확인하고, 열전달 유효폭의 변화를 도식화하여, 수정된 열저항 모델을 제안하고 그 유용성을 검증하고자 한다. 사용된 전산모사는 상용 CFD (computational fluid dynamics) 프로그램을 이용하여, 두께에 따른 열저항 변화를 얻어내고, 이 결과를 준연속함수화하는 필터링을 시행하고 미분처리하여 열전달 유효폭의 변화거동을 구하여 수정모델식과 비교 분석하였다. 또한, LD 광원 상부층에 고열전달물질을 적용한 개선구조의 분석을 통해 다양한 경우에 적용이 가능한 수정모델의 유용성과 적합성을 확인하였고, 추가적으로 개선된 열저항 수치는 병목 부위에서의 열전달 유효폭이 넓어진 사실에 기인한다는 것을 직관적으로 파악할 수 있게 하였다.

II. 본 문

2.1. 띠형 LD 광원 구조 설정과 열저항 거동

LD 광원의 활성층에서 발생한 열은 기판을 거쳐서 주로 방열판(heat sink)으로 이동해 외부로 내보내는 방열과정을 거친다. 방열판까지 열의 이동은 주로 전도에 의하며, 고효율 발열소자의 배치 설계에 있어서 이 열저항(R_{th}) 분석 및 최적화가 매우 중요하다^[4]. 단순한 열전달 구조에 있어서 열저항은 전기저항과 유사하게 아래와 같은 단순군사식으로 표현할 수 있다.

$$R_{th} = \frac{1}{\kappa} \frac{d}{S} \tag{1}$$

여기서, κ ($W/m \cdot K$)는 재료의 열전도도, d 는 열전달 경로의 길이, 그리고 S 는 열전달 단면적이다. 구조와 물성이 복잡하여 상기 단순식만으로 표현하는데 어려움이 있어서, 측정된 온도나 전산모사 결과를 토대로 발열체 두 위치 간의 열저항 값을 구할 때는 아래와 같은 단순한 식으로 얻을 수 있다.

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P} \tag{2}$$

여기서, $\Delta T(K)$ 는 열전달 경로의 온도차, $P(W)$ 는 전달된 발

열량을 의미한다. 이때, 중간에서 열흐름의 손실이 없다는 전제가 필요하다. 통상적인 LD의 구조와 발열부(활성층 띠 구조), 열전소자 등에 접합될 기판 하단부는 그림 1에 나타난 구조와 같이 단순화할 수 있다. 여기서 L 은 단순화된 LD의 공진기 길이에 해당하며, d 는 LD 활성층부터 PCB 접합 부까지의 두께, W 는 LD 활성층 공진기 부분의 폭, W_b 는 LD 바닥층의 폭, R_{th} 는 LD의 두께에 따라 변하는 LD의 열저항, W_{eff} 는 두께에 따라 변하는 LD의 유효열전달폭을 의미한다.

이러한 실제 경우에 열전달단면적은 두께 d 의 변화에 따라 변화하며, $S(d)=LW_{eff}(d)$ 이 되고, 상기 식 (1)은 더 이상 간단히 적용되지 않으므로, 뒤에 소개할 간단한 모델식으로 근사하는 것이 유용하다^[3]. 이는 그림 1에 단순화된 띠형 발열체에 의한 열확산에 대하여, 가장 간단한 단순군사로서, 전달 방향 변화를 무시하고 열전달단면적의 변화만을 고려한다. 이 단순모델로 그 변화함수를 구하면, 식 (1)의 면적 S 를 상기 $S(d)=LW_{eff}(d)$ 를 대입하여 두께에 대해 적분하면 쉽게 구해지며, 아래와 같이 $R_{th}^{pre}(d)$ 로 표현되었다^[3]. 여기서, 수식에 명시된 h 는 지수함수의 이완거리 제어용 변수로 사용되었으며, 길이의 차원을 갖는다.

$$R_{th}^{pre} = \frac{1}{\kappa L} \left\{ \frac{d}{W_b} + \frac{h}{W_b} \ln \left[\frac{W + (W_b - W)e^{-d/h}}{W} \right] \right\} \tag{3}$$

이 단순모델은 열확산의 파면굴곡을 고려하지 않아서, 확산구조체의 모든 경우(크기와 두께 조건)에 근사가 성립되는 것은 아니다. 특히, 하부층 두께에 비해 W_b 가 월등히 커지는 경우에, 열이 전달되어야 할 경로로서의 두께가 늘어나면서 파면 굴곡에 의한 유효폭 근사의 오차가 당연히 조금씩 커지게 되므로, 그 차이를 고려해야 한다. 따라서 파면굴곡을 무시하는 근사에 의해 유효폭이 다소 크게 산정되었으므로, 그 영향을 현상론적으로 감안한 무차원 유효폭보정변수 h' 을 도입한 수정모델로서 아래 수식을 제안한다.

$$R_{th} = \frac{1}{\kappa L} \left\{ \frac{d}{W_b} + \frac{h}{W_b} \ln \left[\frac{W + (W_b - W) \left(1 - \frac{d}{hh'}\right) e^{-d/h}}{W} \right] \right\} \tag{4}$$

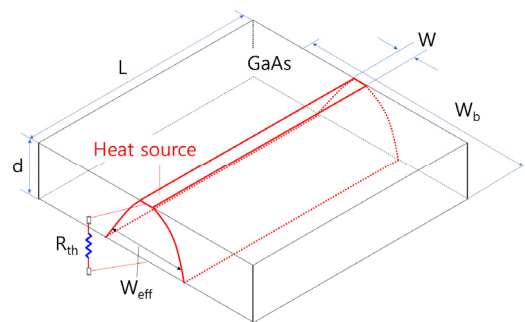


Fig. 1. Simplified structure of the high-power LD, where L is the cavity length of LD, W is the width of heat source (active region), W_b is the bottom width of LD.

이 때, $h' \gg d/h$ 인 극한 조건(열전달 두께와 이완제어변수 h 의 비율보다 훨씬 클 경우)에서 $R_{th}(d)$ 는 $R_{th}^{pre}(d)$ 으로 환원되는 함수임을 쉽게 알 수 있으며, 수식상 식 (3)과 식 (4)의 차이는 지수함수 앞에 곱해진 확산폭 제어인자($1-d/hh'$)이다.

고출력 LD의 열흐름 특성변화를 구하여 상기 수식의 결과와 비교 분석하기 위하여, 두께 변화에 따른 온도분포를 SOLIDWORKS로 전산모사하였다. 전산모사에 사용된 각 부분의 열전도도와 길이는 표 1과 같으며, LD 활성층의 발열량은 통상 ~10 W급 이상의 고출력 LD를 가정하여 10 W, GaAs 기판의 아랫면 온도는 0°C로 두었다. 상기 구조의 발열체에 있어서 두께 d 가 증가함에 따라 발열체인 고온부의 온도가 급격히 증가하는 것은 전형적이며, 상기 식 (2)를 적용하여 열저항 변화로 산출하여 그림 2에 나타내었다. 전산모사 결과를 ■표식으로, 식 (3)이 적용된 결과를 점선으로, 식 (4)가 적용된 결과를 실선으로 표시하였으며, 그래핀층을 적용한 개선구조에 관한 내용을 □표식 및 초록색 점선과 실선으로 표현하였다.

두께를 늘여가면서 전산모사된 열저항 변화는 전형적인 역쌍곡선 함수 형태로 나타나고 있으며, 두께 증가에 따라 급격한 선형증가를 보이는 $d \ll h$ 영역, 증가 기울기가 점점 낮아지는 $d-h$ 영역, 최저기울기로 선형증가하는 $d > h$ 영역으로 나누어 기술할 수 있다. 이러한 열저항 거동은 이전에 제안된 단순모델 함수 $R_{th}^{pre}(d)$ 로 대체로 잘 기술되며, 확산변수 $h = 2.95$ mm를 적용한 곡선(점선)을 함께 비교하였다. $d \ll h$ 영역에서 유사하며, $d-h$ 영역에서 다소 차이가 있고, $d > h$ 영역에서 다시 유사해지며, 특히 $d = 5$ mm 이상에서 일치된다. 이러한 열저항 모델의 변화거동은, 열전달층 박막의 최적두

께 d 산출에 많은 도움을 주지만, d 가 얇을 때 열저항 자체는 작아도 열저항의 두께 의존성이 역쌍곡선 함수 형태이므로 d 에 따른 열저항 변화가 극심하여 $d < 0.1$ mm 이하 박막 설계의 경우에는 전산모사 결과와 차이가 20% 이상이 되기도 하며, 최적 두께 예측에 오류가 적지 않음을 알 수 있다. 이에 반해, 이번엔 수정 제안된 수정모델 함수 $R_{th}(d)$ 에 확산변수 $h = 2.83$ mm, 파면굴곡보정변수 $h' = 1.1$ 을 적용한 현상론적 해석모델 함수 결과(실선)와 비교하면, 모든 d 에 대해 열저항이 거의 일치하고 있으며, 최적 d 산출오차를 대폭 개선하고 있다.

또한, 그림 1의 기본구조에 열전도도가 큰 그래핀 등의 물질로 상부 덮개층을 형성하여 열저항을 개선하고자 제안된 개선구조^[4]를 단순화($\kappa \sim 5$ W/mm·K)하여 전산모사하였고, 그 열저항 산출 결과도 그림 2에 □표식으로 함께 나타내었다. 이 개선된 구조체는 기본구조 최상부에 마이크론 두께의 그래핀 박막을 둔 것만으로 모든 두께에서 열저항이 반 이하로 대폭 개선되었고, 두께 0.05 mm의 경우에는 1 K/W (기본구조체)가 0.2 K/W (개선구조체)로 1/5 정도로 개선된 것을 확인할 수 있다. 또한, 이 개선된 구조체의 열저항 변화거동 결과 역시, 이전의 단순모델 함수 $R_{th}^{pre}(d)$ 에 $h = 1.78$ mm를 적용한 결과와 유사하며($d = 5$ mm에서 일치), 수정모델 함수 $R_{th}(d)$ 에 확산변수 $h = 1.7$ mm, $h' = 1.5$ 를 적용한 결과와는 거의 일치하고 있어서, 이 수정모델이 열전달층 설계에 더욱 유용하게 사용될 수 있음을 재확인하고 있다.

이상의 결과로, 간단한 상부 덮개층의 존재만으로 열저항이 대폭 개선되는 것을 볼 수 있었고, 이는 열흐름의 병목부에서 열전달 단면적이 개선된 결과인 것을 다음 장에서 논의하고자 한다. 열저항의 두께변화 곡선을 두께변수로 미분한 것은 단순구조 열저항의 유효 열전달단면적의 역수에 비례하므로, 이제 이를 이용하여, 두께 변화에 따른 유효 열전달 단면적의 변화함수를 구하고 열병목을 직관적으로 파악하고자 한다.

Table 1. Reference structure factors, size and thermal conductivity

κ (W/mm·K)	W_b (mm)	W (mm)	L (mm)
0.047	10	0.05	10

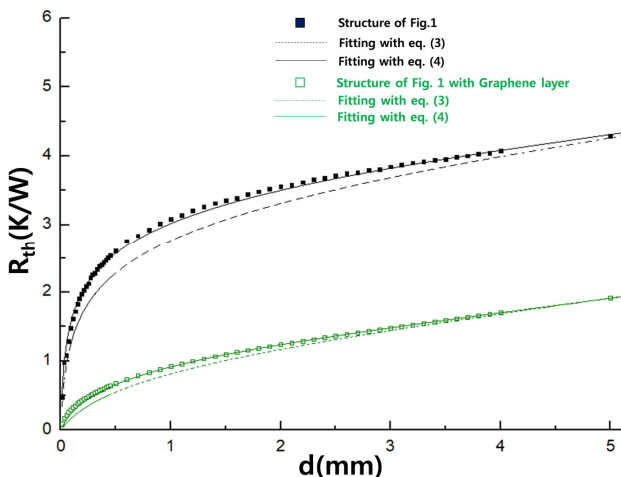


Fig. 2. Comparison of thermal resistance variation with lower-layer thickness.

2.2. 열전달 단면적(유효폭) 변화 거동

선형적으로 길이방향으로 속박된 열흐름을 갖는 단순한 열저항의 경우에는 열전달 단면적 $S = d/(\kappa R_{th})$, 열전달 폭 $W = d/(\kappa R_{th}L)$ 로 상수이지만, 복합적으로 열확산되는 발열체의 경우에는 열전달 단면적과 전달방향이 변화된다. 전달방향의 변화를 무시하는 단순근사로 열저항을 함수 $R(x)$ 로 나타내면^[3], 식 (1)은 $R_{th} = \int_0^d \frac{1}{\kappa L W_{eff}(x)} dx$ 으로 근사되므로, 이를 ‘열전달경로 길이’(즉, 막두께 d)로 미분하면, 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta R_{th}}{\Delta d} = \frac{1}{\kappa L} \frac{\partial}{\partial d} \int_0^d \frac{dx}{W_{eff}(x)} = \frac{1}{\kappa L W_{eff}(d)} \quad (5)$$

상기의 근사적 관계를 이용하여 전산모사로 구한 기본구조체(basic) 및 개선된 구조체(improved)의 열저항 수치를 변환

한 열전달단면적의 유효폭 $W_{eff}(d)$ 의 변화(기본구조■ 및 개선구조□)를 그림 3에 보이고 있다.

두께 d 가 증가함에 따라 열저항이 급격하게 커지는 $d \ll h$ 영역에서는 두 구조 모두 선형적으로 유효폭이 증가하고 있음을 보여주며, $d-h$ 영역에서는 유효폭 증가가 둔해지면서 포화한계인 ‘현재 검증모델 구조상 최대폭($W_b = 10$ mm)’으로 수렴하고 있다. 전산모사된 수치를 활용하여 변화기울기의 역수를 구하므로, 작은 기울기 오차가 크게 반영되어, 기본구조체의 경우, 유효폭 변화가 매끄럽지 못하지만, 개선된 구조체의 유효폭 변화는 오차가 개선되어 부드러운 곡선적으로 산출되었다. 열저항이 개선되기 전인 기본구조체는 $d = 0.05$ mm에서 유효폭이 ~ 0.2 mm보다 작으며, $d = 0.2$ 정도까지 늘어도 유효폭은 ~ 0.7 보다 작은 정도 밖에 확장되지 못한다. 개선된 구조체는 $d = 0.2$ 에서 유효폭이 ~ 1.7 정도로 기본구조에 비해 2배 이상으로 확장되었다. 이와 같이, 유효폭변화를 시각화하여 발열부 근처에서의 열병목이 개선된 이유를 보다 직관적으로 파악할 수 있게 되었다.

또한, 각 열저항모델 수식에서도 유효폭 변화함수를 구할 수 있으며, 현상론적으로 제안된 기존의 단순 유효폭 모델함수 $W_{eff}^{pre}(d)$ 와 이번에 제안하는 수정모델함수 $W_{eff}(d)$ 는 아래와 같으며, 이는 식 (5)를 활용하여 두께 d 로 적분하면 식 (3)과 식 (4)를 바로 얻게 된다. (혹은, 식 (3)과 식 (4)를 두께 d 로 미분하면 아래 수식을 바로 얻게 된다.)

$$W_{eff}^{pre}(d) = W_b - (W_b - W)e^{-d/h} \tag{6}$$

$$W(d) = \frac{\left\{ W_b - (W_b - W) \left(1 - \frac{d}{hh'} \right) e^{-d/h} \right\}}{\left\{ 1 + \left(1 - \frac{W}{W_b} \right) \frac{1}{h'} e^{-d/h} \right\}} \tag{7}$$

열저항의 curve fit 변수 h 와 h' 를 그대로 사용하여 얻어진 유효폭 모델 곡선 두 가지도 각 구조마다 그림 3에 함께 비

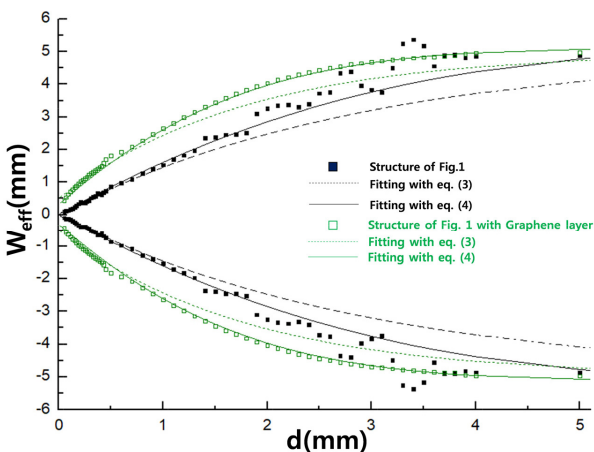


Fig. 3. Comparison of effective width variation with lower-layer thickness.

교하였다. ($W_{eff}^{pre}(d)$ 는 점선 및 $W_{eff}(d)$ 는 실선) 기본구조체의 경우에 $W_{eff}^{pre}(d)$ 보다 $W_{eff}(d)$ 가 모든 d 영역에서 데이터와 유사한 경향을 보인다. 개선된 구조체의 $W_{eff}(d)$ 는 더욱 일치도가 높으며, 현상론적 수정모델의 신뢰도를 높이고 있다. 기본구조체와 개선된 구조체의 유효폭은 $d = 0.05$ mm에서 0.18 mm과 0.86 mm으로 약 5배 증가된 것을 보여주며, 이는 앞에서 열저항이 $\sim 1/5$ 로 개선된 결과와 맥을 같이 한다. 또한, 개선된 구조체는 열전달유효폭이 모든 d 영역에서 증가되었으며, 특히 얇은 d 에서도 확장시키는 효과가 우수한 것이 시각화 및 구체화되었다.

III. 결 론

고출력 광원인 락형 LD 광원에 대하여 비선형 열흐름의 확산 특성을 고찰하기 위하여, 단순화된 구조체의 열분포를 전산모사하여 두께변화에 따른 열저항 변화를 구하고, 열저항이 개선된 구조체에 대하여 거동변화 특성을 비교하였다. 열병목을 개선하는 효과가 있음을 직관적으로 보여주는 열전달 유효단면적 개념을 제안하였고, 유용성을 검증하였다. 또한, 기존의 단순 모델링이 열전달과면의 굴곡을 감안하지 못하는 점을 보완하여, 현상론적으로 보완된 ‘두께-열저항’ 모델링을 제안하여, 전산모사 결과와 더욱 일치함을 보였고, W_{eff} 개념의 유효성도 확인하였다. 소형-고출력 LD 광원 등 소자 발열설계에 있어서 본 모델을 적용하여 열저항을 개선하고 두께를 최적화하는 것은 향후 매우 유용할 것으로 기대된다.

감사의 글

“본 연구는 국방과학연구소 지원사업(2016 고효율 레이저 특화연구실, 2016-11-1496)의 지원을 받아 수행되었습니다.”

References

1. B. G. Ji, S. G. Lee, S. G. Park, and B. H. O, “Bypass heat sink analysis for a laser diode bar with a top canopy,” *Curr. Opt. Photon.* **1**, 113-117 (2017).
2. Z. Deng, J. Shen, W. Gong, W. Dai, and M. Gong, “Temperature distribution and thermal resistance analysis of high-power laser diode arrays,” *Int. J. Heat Mass Transfer* **134**, 41-50 (2019).
3. 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. Korean Phys. Soc.* **67**, 1175-1178 (2015).
4. 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).