

피봇 점 위치를 고려한 파장 가변 외부 공진기 다이오드 레이저의 개발

Development of Wavelength Tunable External-Cavity Diode Laser by Considering the Pivot Point Location

김기철^{1,2}, 서용범^{1,3}, 김영식^{1,3,#}, 이혁교^{1,3}
Gi-Chul Kim^{1,2}, Yongbum Seo^{1,3}, Young-Sik Ghim^{1,3,#}, and Hyug-Gyo Rhee^{1,3}

¹ 한국표준과학연구원 우주광학센터 (Center for Space Optics, Korea Research Institute of Standards and Science)

² 한양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang University)

³ 과학기술연합대학원대학교 측정과학과 (Department of Science of Measurement, University of Science and Technology)

Corresponding Author / E-mail: young.ghim@kriss.re.kr, TEL: +82-42-868-5678, FAX: +82-42-868-5131

KEYWORDS: Wavelength tunable external-cavity diode laser (파장 가변 외부공진기 다이오드 레이저), Pivot point (피봇 점)

Tunable lasers have played an important role in a variety of industrial fields, by supplying stable output over a wide range of wavelengths. The external-cavity diode laser (ECDL) is widely used, because it provides a relatively broad tuning range, compact configuration, and easy control. In this paper, a new design is proposed for the Littman ECDL. The new design possesses a mode-hop-free single mode which is capable of tuning over a wide range of 17 nm, as a result of reconfiguring the pivot point location. Simulation and experimental studies were performed to verify our proposed method.

Manuscript received: January 11, 2017 / Revised: March 28, 2017 / Accepted: April 17, 2017

1. 서론

반도체 다이오드 레이저 광원은 효율이 높고 가격이 저렴하여 광통신을 비롯하여 다양한 물질들의 특성을 확인하는 분광학, 피부 치료의 목적인 의학, 그리고 계측분야 등 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있다.^{1,2} 하지만 다중모드로 발진되고 파장의 선평이 넓어 레이저 광원으로 활용하기에는 많은 제한 점을 가지고 있다. 따라서 지난 수십 년간 광원의 선평을 줄이고 사용 목적에 따라 단일 파장의 광원을 고속으로 변조시키려는 연구가 진행되어 왔다. 레이저 광원의 파장을 임의로 변조시키는 여러 방법 중에 가장 대표적인 방법은 외부 공진기를 이용한 파장 변조 방법이다. 외부 공진기형 파장 가변 레이저(External Cavity Diodes Laser, ECDL)는 다른 레이저의 파장 가변 방식에 비해 가변 범위가 넓고, 파장 조절이 용이하다는 장점이 있다. 기존의 Littman식 구성에서 가동부로 압전소자인 PZT를 이용할 경우 파장을 변화시키는 속도가 제한적이며, 피봇 점을 중심으로 미러를 회전시키

기 때문에 공진기 구성이 복잡해지고 크기가 커진다는 단점이 있다.³ 그래서 파장 변조 속도를 개선시키기 위해 가동부를 갈바노 미러(Galvanometer Mirror)를 이용해 공진기를 구성하는 연구가 수행되었다.^{4,5} 하지만 거울이 피봇 점(Pivot Point)을 중심으로 회전하지 않아 모드 호핑(Mode Hopping)현상이 발생하게 되고, 이는 레이저 출력에 불안정한 영향을 준다. 따라서 본 논문에서는 갈바노 미러의 회전 중심을 피봇 점에 위치시킴으로써 모드 호핑 현상을 최소화시키고 빠른 속도의 파장 변조가 가능하도록 콤팩트(Compact)한 구성의 파장 가변 외부 공진기 다이오드 레이저를 개발하였다.

2. 파장 가변 외부 공진기 다이오드 레이저

2.1 Littman형 파장 가변 다이오드 레이저의 구성

외부 공진기형 파장 가변 레이저는 Fig. 1과 같이 Littrow와

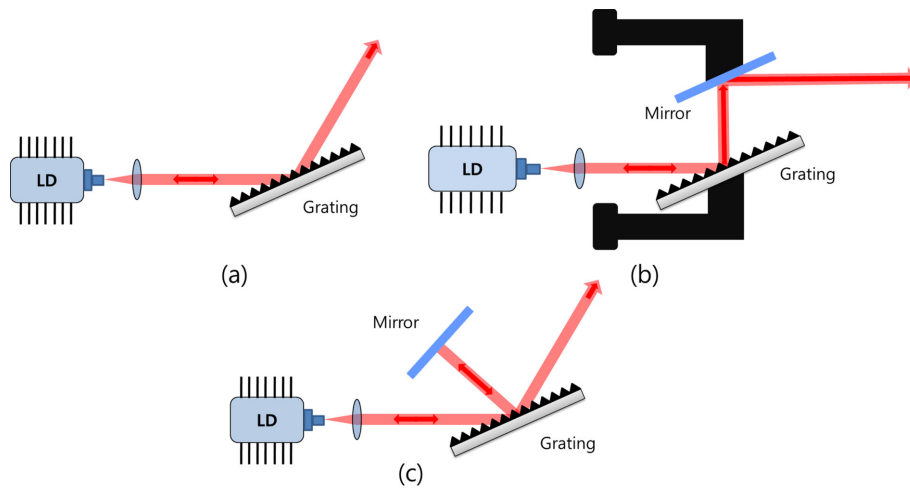


Fig. 1 Tunable external-cavity diode lasers: (a) Littrow configuration, (b) Modified Littrow configuration, (c) Littman configuration

Littman형의 두 종류의 구성으로 이루어져 있다. Littrow형의 공진기는 크게 광원과 회절격자로 구성되며, 회절격자의 회전에 따라서 공진되는 파장이 달라지게 된다. Littman형의 공진기는 광원과 회절격자와 거울로 구성되며, 거울의 회전 각도에 따라서 서로 다른 파장이 공진된다. 회절격자의 특징을 이용해서 Littrow나 Littman 구성에서 파장에 따라 달라지는 회절각도를 이용해 공진되는 파장을 바꿀 수 있다.⁶⁻⁸ Littrow형 공진기는 발진되는 파장이 달라짐에 따라, 레이저의 출력방향 또한 달라지게 된다. 이러한 문제점을 해결하고자 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 레이저의 출력 방향에 미러를 회절격자와 서로 평행하게 마주보게 설치하여 회절격자의 회전각도와 동일하게 미러를 회전시키게 된다.⁹ 또 다른 방법으로는 미러 대신에 프리즘을 이용하기도 한다.¹⁰ 이들 방법 모두 레이저의 출력 방향이 고정되는 장점이 있지만 부가적인 시스템으로 인해 구동 메커니즘이 복잡해지고 파장 변조 속도가 느리다는 단점이 있다. 이와 달리, Littman형 공진기는 파장 가변에 대해서 고정된 레이저 출력 각도를 가질 뿐만 아니라 구조가 단순하여 빠른 속도로 미러를 회전시켜 파장을 변조시킬 수 있게 된다. 레이저 다이오드(Laser Diode, LD)에서 나온 빔은 회절격자에 맞아서 1차 회절각을 따라 거울로 진행하고, 거울에 반사된 빔은 다시 1차 회절각을 따라 회절격자에 반사되어 레이저 다이오드로 돌아가게 되어 이 과정 중에 공진이 일어나게 된다. 공진된 빔은 다시 회절격자에 맞아 0차 반사각을 따라 출력방향으로 진행하게 된다.

거울이 회전함에 따라 회절격자와 공진 길이에 의해 결정되는 파장이 달라질 경우, 두 파장이 다르게 결정되므로, 회전에 의한 파장 변화와 공진 길이에 의한 파장 변화가 같아야 한다. 두 파장은 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_g &= d(\sin \phi + \sin \theta) \\ \lambda_m &= \frac{2}{q}(L_f + L_t) = \frac{2}{q}(L_f + L_p \sin \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 λ_g 는 회절격자에 의해 결정되는 파장이다. 회절 격자

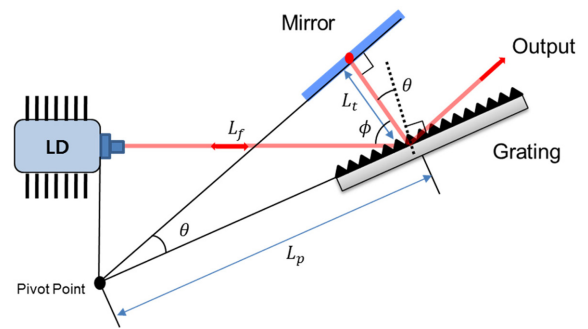


Fig. 2 Schematic of Littman ECDL considered the pivot point location

식에서 1차 회절만 고려한 형태이다. 이 식에서 ϕ 는 회절 격자의 입사각, θ 는 회절 각, d 는 회절 격자의 간격을 나타낸다. 아래의 λ_m 은 공진 길이에 의해 결정되는 파장이다. 여기서 q 는 공진 모드인 임의의 정수이고, L_f 는 LD에서 회절 격자까지의 거리, L_t 는 회절 격자에서 거울까지의 수직 거리, L_p 는 피벗 중심점에서 회절 격자까지의 거리를 나타낸다. 이때, 피벗 점은 회절격자 표면의 연장선과 LD의 발진 방향과 수직되는 연장선의 교점이 된다. 식(1)에서 보듯이 λ_g 와 λ_m 의 두 파장은 회절 각이자 거울의 회전 각도인 θ 값에 의해서만 변하므로 거울의 회전 각도에 따라 발진되는 파장이 결정된다. 거울의 회전 각도에 의해 파장이 변하게 될 때, 두 발진되는 파장이 다르게 되면, 회절격자에 의한 이득과 공진길이에 의한 이득이 일치하지 않게 되고, 이로 인해 모드 호핑 현상이 일어나게 된다. 이러한 모드 호핑 현상은 파장 가변 광원의 성능 저하를 야기하며, 측정 데이터의 비선형성과 반복능력에도 악영향을 미치게 된다. 이러한 모드 호핑 현상을 피하기 위해서는 거울 회전각에 대해 두 파장의 변화가 일정하게 변화도록 공진기를 구성해야만 한다.

Fig. 2에서 Littman형 공진기 구성을 살펴보면 공진길이는 회절격자와 거울의 수직거리, 회절격자와 LD의 거리에 의해 결정되므로 거울의 회전 각도에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 회절

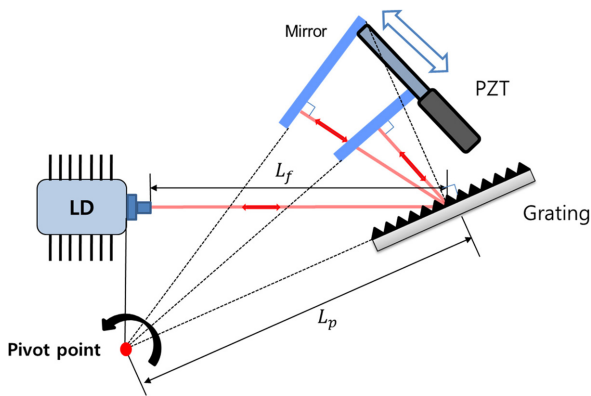


Fig. 3 Schematic of typical Littman configuration using a PZT actuator

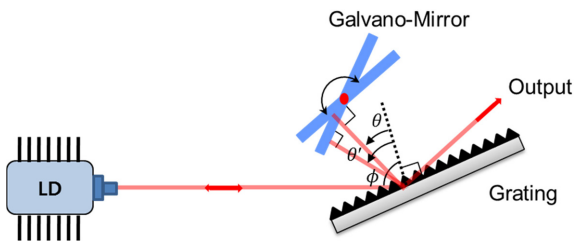


Fig. 4 Schematic of typical Littman configuration using a galvanometer mirror scanner

격자의 파장식과 공진길이에 의한 파장식을 비교하면, Fig. 2와 같이 피봇 점(Pivot Point)이 회전 중심이 되어 한다는 것을 알 수 있다. 또한 L_f 와 L_p 는 식(2)와 같은 관계를 가지고 있어야 한다.

$$L_f = L_p \sin \phi \quad (2)$$

또한 식(2)를 식(1)에 대입해보면, 식(3)과 같이 미러의 회절각도인 θ 와 관계없이 모드 번호 q 는 항상 일정하게 유지된다는 것을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} d(\sin \phi + \sin \theta) &= \frac{2}{q}(L_p \sin \phi + L_p \sin \theta) \\ q &= \frac{2}{d} L_p \end{aligned} \quad (3)$$

식(2)와 식(3)의 조건을 식(1)에 적용하게 되면 거울의 회전 각도와 무관하게 λ_m 와 λ_g 가 항상 같게 된다. 따라서 피봇 점을 중심으로 거울이 회전하게 되면 모드 호핑 현상을 근본적으로 피할 수 있게 된다.

2.2 피봇 점을 고려한 외부 공진기 구성 방안

피봇 점을 중심으로 거울을 정밀하게 회전시키기 위해서는 높은 분해능과 구동 특성이 좋은 PZT나 갈바노 미러를 주로 이용한다.

PZT 구동기를 이용하는 경우는 Fig. 3에서 보듯이 피봇 점을

Table 1 Simulation conditions of case A, B, C

	A	B	C
Grating line # (Grooves/mm)	2400	2400	1200
Tuning range (nm)	758-777	758-777	758-777
L_f (mm)	52	52	52
L_t (mm)	60	34	34

중심으로 긴 막대를 연결해 끝부분에 거울을 달고, 그 뒤에 PZT를 부착하여 변위를 주게 된다. 이로 인해 거울이 피봇 점을 중심으로 회전을 함으로서 외부 공진기가 구성된다. 이와 같은 공진기 구성은 정렬이 쉬운 편이고, PZT 제어가 단순하다는 장점이 있다. 하지만, 막대의 길이만큼의 회전반경이 늘어나 공진기 크기가 커지게 되고, PZT 변위가 회절각도와 비선형적으로 변하므로 선형적인 파장 조절을 위해서는 비선형적인 PZT 변위/속도제어가 필요하다. 반면에, 갈바노 미러는 입력 전압에 따라 회전 각도를 빠르게 변화시킬 수 있는 장치로 전압과 각도의 선형적인 제어가 가능하다는 장점이 있다.

갈바노 미러를 이용한 Littman형 공진기 구성은 Fig. 3과 마찬가지로 피봇 점 위치에 거울의 회전 중심을 위치시켜 구성해야 된다. 하지만 이러한 구성은 LD와 회절격자 사이에 거울이 위치하게 되어 빔의 경로를 차단하게 된다. 따라서 일반적으로 갈바노 미러를 이용한 가변레이저 구성은 Fig. 4와 같이 보통 피봇 점이 아닌 회절격자 앞에 갈바노 미러의 회전 중심을 위치시켜서 공진기를 구성하게 된다. 하지만 이러한 구성은 갈바노 미러의 회전 각도에 따라 모드 호핑이 쉽게 발생하여 발진하는 레이저의 파장이 불안정하게 된다. 따라서 외부 공진기의 구성이 복잡하지만 안정적인 레이저 광원을 얻기 위해서는 모드 호핑의 영향이 이론적으로 없는 Fig. 3과 같은 외부 공진기를 구성하게 된다.^{11,12}

모드 호핑이 일어나지 않는 외부 공진기를 제작하기 위해서는 피봇 점의 위치에 갈바노 미러의 회전중심이 있어야 한다. 또한 앞서 언급한 빔의 경로를 차단하는 현상을 막기 위해서는 원하는 파장 범위가 90도에 가까운 회절 각에서 발진할 수 있도록 회절격자의 밀도를 결정해야 한다. 본 논문에서는 미러의 회전 중심이 피봇 점에 위치하도록 구성함으로써 모드 호핑의 영향을 최소화 시킴과 동시에 갈바노 미러를 사용함으로써 기존의 PZT 구동기를 활용한 Littman형 공진기 보다 콤팩트한 구조를 가지면서 고속의 파장 변조 제어가 가능하도록 하였다. 갈바노 미러의 회전 중심점의 위치에 따른 공진기의 모드 수의 변화를 살펴보기 위해 회전 중심점의 위치가 피봇 점의 경우(A점 위치), 피봇 점과 회절격자의 연장선상의 임의의 위치에 있을 경우(B점 위치), 그리고 일반적인 구성으로 회절격자 바로 앞에 거울이 위치할 경우(C점 위치)의 세 가지 경우에 대해서 발진 모드에 대한 모의실험을 진행하였다. 이때 모의 실험의 조건은 Table 1과 같다.

Fig. 5에서 보듯이 초기 발진하는 파장($\lambda_0 = 758 \text{ nm}$)에 해당하는 모드 번호를 기준으로 약 20 nm의 파장이 변조될 때의 모드 번호의 변화를 분석해 보았다. A의 경우는 이상적인 Littman형

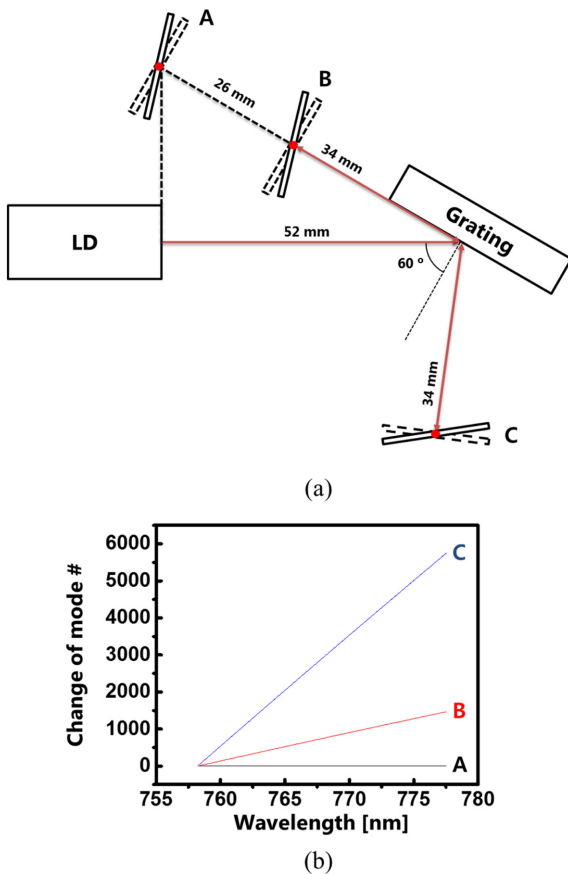


Fig. 5 Simulation results: (a) Geometric conditions in our simulation, (b) Change of the mode number according to the wavelength change

공진기 구성을 따르며, 그 결과 회절격자에 의한 모드와 공진 길이에 의한 모드가 파장에 관계 없이 같다는 것을 알 수 있다. 이와 반대로 B와 C의 경우에는 모드 호핑 현상이 일어나게 된다. 두 경우에는 공진 길이는 동일하지만 미러의 회전 중심의 위치가 달라져 동일한 파장 범위를 얻기 위해서는 밀도가 틀린 회절 격자를 사용하였다. 이때, B의 경우는 C에 비해서는 비교적 피봇 점 근처에 위치하고 있어 같은 파장 범위를 변화시키더라도 더 적은 모드 차이를 보이고 있다. 이러한 경향으로 보아, 회전 중심이 피봇 점에 가까울수록 초기 모드와 최종 모드의 차이가 적어져 모드 호핑 현상이 줄어들음을 알 수 있다.

3. 실험 결과 및 분석

본 실험에서는 중심 파장 770 nm에서 40 nm의 파장 폭을 가진 50 mW의 LD를 광원으로 사용하였다. 2장에서 기술된 공진기 구성을 만들기 위해 적당한 입사각을 회절격자의 파장 식을 이용해서 찾은 후 회절된 빛이 피봇 점 부근의 거울에 맞을 수 있도록 입사각을 다시 조정하였다. 또한 직경 20 mm거울을 $\pm 20^\circ$ 범위로 회전이 가능한 Galvanometer Mirror를 사용하였고, 회절격자는

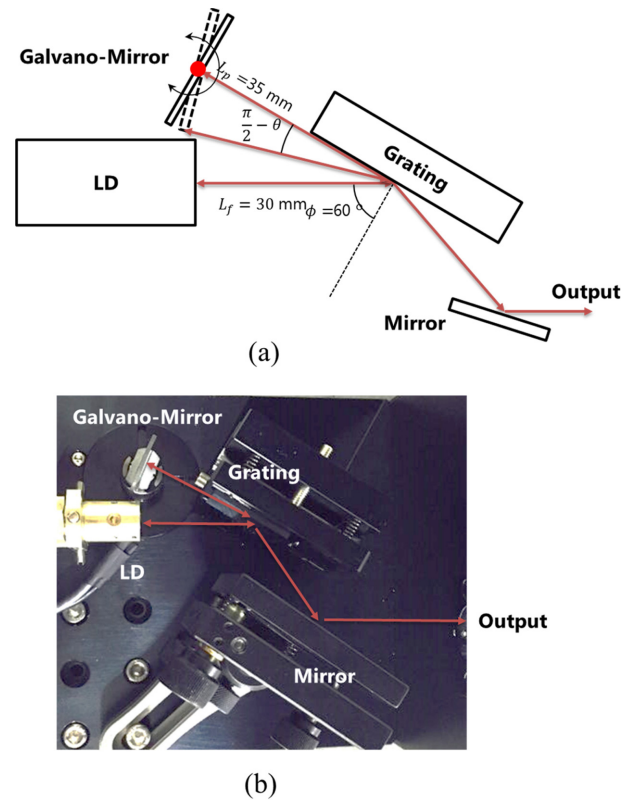


Fig. 6 Experimental set-up: (a) Schematic of our proposed Littman ECDL, (b) Our prototype system

회절각을 고려하여 2400 Grooves/mm의 밀도를 가진 회절 격자를 이용하였다. 이러한 LD, 회절격자, 갈바노 미러의 위치를 고정시키기 위한 공진기를 제작하였다. 이때, ECDL 정렬 시에 꼭 필요한 자유도만 남기고 나머지는 구속하여, 실험 구성을 바꾸더라도 쉽게 다시 정렬할 수 있도록 제작하였다. 공진기 크기는 $50 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 로 제작했으며, LD 고정부분은 전기적 잡음을 막기위해 부도체로 제작하였다.

ECDL 제어는 C언어를 이용하여, 갈바노 미러를 회전시키고 그 파장 변화를 스펙트로미터에서 관찰해보았다. 갈바노 미러를 선형으로 각도를 변화 시키고 각도에 대한 최대 세기의 파장을 스펙트로미터를 통해 획득하였다. 본 실험에서의 레이저 공진기 구성은 약 17 nm 정도의 파장 가변 범위를 평균 8.7 mW의 출력으로 발전하도록 하였다. Fig. 6은 공진기 구성 요소들의 배치도와 실제 공진기 구성을 나타낸 것이다. 가변 레이저의 활용을 위해서는 파장이 선형적으로 출력되도록 제어할 수 있어야 한다. 먼저 갈바노 미러를 회전 시키면서 각도에 대한 파장을 스펙트로미터를 통해 측정한 뒤, 파장은 회절격자의 식에 의해 각도의 사인 함수 형태를 하고 있으므로, Sine Fitting을 통해 각도와 파장의 관계식을 구한다. 그 후에 필요로 하는 파장을 바로 각도를 회전 시키면 얻을 수 있도록 각도를 파장에 대한 함수로 만들어 놓는다. 이 함수는 공진기의 길이나 각도가 변하지 않으면, 파장을 제어하는데 계속 이용할 수 있다.

Figs. 7(a)와 7(b)에서는 이러한 과정을 통해서 ECDL 시스템을

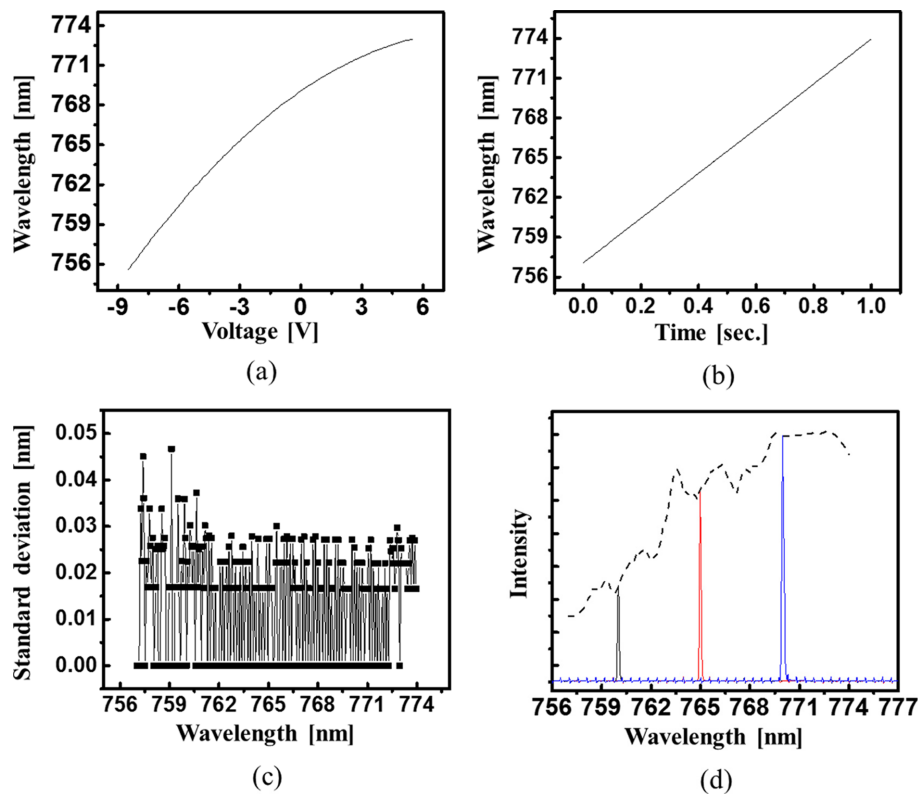


Fig. 7 Experimental results: (a) Output wavelengths according to an input voltage of the Galvano mirror, (b) Output wavelengths over time after sine fitting, (c) Repeatability for the linearity test of (b), (d) Spectrum analysis in case the center wavelength is 760 nm (Black solid line), 765 nm (Red solid line), 770 nm (Blue solid line)

구성하고 갈바노 미러의 인가 전압에 따라 발진되는 파장의 변화를 실험적으로 획득하였다. 획득된 파장을 바탕으로 출력파장이 선형적으로 제어될 수 있도록 구성한 후 약 1초 동안 17 nm의 파장 범위를 10회 반복하여 변조시킨 후, 평균 값에 대한 표준편차를 Fig. 7(c)에 나타내었다. 전 파장 대역에 걸쳐 대략 0.05 nm 이하의 표준 편차값을 보이고 있어 매우 안정적으로 원하는 파장을 변조시킬 수 있다. 이때, 파장 가변 시간은 갈바노 미러의 회전 속도를 증가시킬수록 짧아지게 되는데 대략 0.2초 이내로 가변시 파장의 표준편차 값은 대략 0.15 nm 이하로 측정되었다. 이는 ECDL 시스템의 파장을 빠르게 가변 시킬수록, 스펙트로미터를 이용한 측정간격 시간의 오차와, 파장과 전압 관계식을 구하는 초기 측정시의 오차로 인해 출력 파장의 선형성이 떨어져서 생긴 것으로 판단된다. 또한 각 파장 영역에서 레이저 발진시 단일 종모드를 확인하기 위해 스펙트로미터를 이용하여 임의의 파장 대역에 대해 중심파장을 측정한 결과 Fig. 7(d)와 같은 결과를 얻었다. 이때, 검은색 점선은 757 nm에서 약 17 nm로 파장이 변조될 때의 광 강도 분포를 표시한 것이고, 검은색, 빨간색, 그리고 파란색 실선은 중심 파장이 각각 760 nm, 765 nm, 770 nm로 발진된 레이저를 측정한 결과이다. 이들 세 파장에 대한 반치전폭은 모두 0.1 nm 이하로 측정되었는데 이는 사용된 스펙트로미터의 분해능 한계로 인해 그 이하의 측정값은 얻지 못하였다.

4. 결론

본 논문에서는 중심 파장 765 nm에서 약 17 nm의 파장 가변 범위를 갖고 평균 출력이 8.7 mW를 갖는 Littman형 외부 공진기 다이오드 레이저를 개발하였다. PZT 구동기 대신에 갈바노 미러를 이용하여 매우 빠른 속도로 파장을 변조시킬 수 있었고, 피봇점의 위치를 고려하여 공진기를 구성함으로써 안정적으로 레이저가 발진하도록 하였다. 모의실험을 통해 갈바노 미러의 회전 중심 위치에 따른 모드 호핑의 영향을 살펴보고 이를 통해 본 논문에서 제안한 공진기 구성에 대한 타당성을 검증해 보았다. 또한 실험을 통해 제안한 공진기의 특성도 살펴보았다.

REFERENCES

1. Wieman, C. E. and Hollberg, L., "Using Diode Lasers for Atomic Physics," Review of Scientific Instruments, Vol. 62, No. 1, pp. 1-20, 1991.
2. Coldren, L. A., Corzine, S. W., and Mashanovitch, M. L., "Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits," John Wiley & Sons, 2012.
3. Cunyun, Y., "Tunable External Cavity Diode Lasers," World Scientific, 2004.

4. Yun, S., Boudoux, C., Pierce, M., De Boer, J., Tearney, G., et al., "Extended-Cavity Semiconductor Wavelength-Swept Laser for Biomedical Imaging," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, No. 1, pp. 293-295, 2004.
5. Chinn, S., Swanson, E., and Fujimoto, J., "Optical Coherence Tomography Using a Frequency-Tunable Optical Source," Optics Letters, Vol. 22, No. 5, pp. 340-342, 1997.
6. Littman, M. G., "Single-Mode Pulsed Tunable Dye Laser," Applied Optics, Vol. 23, No. 24, pp. 4465-4468, 1984.
7. Littman, M. G., "Single-Mode Operation of Grazing-Incidence Pulsed Dye Laser," Optics Letters, Vol. 3, No. 4, pp. 138-140, 1978.
8. Littman, M. G. and Metcalf, H. J., "Spectrally Narrow Pulsed Dye Laser without Beam Expander," Applied Optics, Vol. 17, No. 14, pp. 2224-2227, 1978.
9. Hawthorn, C., Weber, K., and Scholten, R., "Littrow Configuration Tunable External Cavity Diode Laser with Fixed Direction Output Beam," Review of Scientific Instruments, Vol. 72, No. 12, pp. 4477-4479, 2001.
10. Takamizawa, A., Yonezawa, G., Kosaka, H., and Edamatsu, K., "Littrow-Type External-Cavity Diode Laser with a Triangular Prism for Suppression of the Lateral Shift of Output Beam," Review of Scientific Instruments, Vol. 77, No. 4, Paper No. 046102, 2006.
11. Repasky, K. S., Nehrir, A. R., Hawthorne, J. T., Switzer, G. W., and Carlsten, J. L., "Extending the Continuous Tuning Range of an External-Cavity Diode Laser," Applied Optics, Vol. 45, No. 35, pp. 9013-9020, 2006.
12. Loh, H., Lin, Y.-J., Teper, I., Cetina, M., Simon, J., et al., "Influence of Grating Parameters on the Linewidths of External-Cavity Diode Lasers," Applied Optics, Vol. 45, No. 36, pp. 9191-9197, 2006.