

짧은 펄스로 구동되는 반도체 발광소자의 파장측정에 관한 연구

김경식* · 김재창* · 조홍성** · 홍창희**

A Study on the Measurement of Spectral Characteristics of Semiconductor Light Sources driven by Very Short Pulse Currents

Kyung-Sik Kim, Jae-Chang Kim, Ho-Sung Cho, Tchang-Hee Hong

요 약

본 연구에서는 매우 짧은 전류펄스에 의해 구동되는 반도체 발광소자의 파장특성을 측정하기 위한 장치를 고안하였다. 이 장치는 600grooves/mm의 회절격자에 초점거리가 275mm인 분광기와 X-Y recorder 그리고 아날로그 분석을 위한 scanning motor와 최대값 검출기가 결합된 증폭기로 구성시켰다. 특히, 최대값 검출기는 짧은 펄스 신호를 연속적인 값으로 변환하기 위하여 사용하였다. 이 장치를 이용하여 상용화된 발광다이오드와 AlGaAs/GaAs LD 및 InGaAsP/InP BH-LD를 duty cycle이 0.01인 전류펄스로 구동하면서 그 파장특성을 분석한 결과 약 1Å 정도의 분해능과 10 μ W 정도의 수신감도를 가지는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a system has been proposed for the measurement of the spectral characteristic of semiconductor light sources driven by very short pulse currents. This system has been constituted a monochromator of 600 grooves/mm grating and of 275mm focal length, X-Y recorder, scanning motor which enables the system to get the analog data, and amplifier coupled with peak detector. Especially, peak detector was used to convert the short pulses signal to continuous one. In order to verify the resolution with slit width, several slits were made with hands. By using this system, th

* 부산대학교 전자공학과

** 한국해양대학교 전자통신공학과

spectra of commercial LEDs, AlGaAs/GaAs LD, and InGaAsP/InP BH-LD which were driven with pulse current (duty cycle=0.01%) were measured. From these measurements, it has been shown that the proposed system has about 1 Å resolution and 10μW resolution and 10μW sensitivity.

I. 머리말

광전자기술은 크게 네 가지로 분류된다. 첫째, 전기적인 에너지를 빛에너지로 변환시키는 전·광변환기술 둘째, 광에너지를 전기적인 에너지로 변환시키는 광·전변환기술 셋째, 광에너지 및 신호를 처리하고 전송하는 광정보처리 및 광전송기술 그리고 넷째, 광전집적회로(OEIC, Optical Electronic Integrated Circuit) 기술등이다. 특히 광섬유통신은 1.3μm와 1.55μm의 파장 영역에서 영분산 및 최저 손실의 광섬유가 개발되고, (1,2) 1.3μm 및 1.55μm의 발진파장을 가지는 반도체 레이저의 실온 연속동작이 성공되면서(3,4) 크게 발전하게 되었다. 따라서 광섬유통신용 발광소자인 반도체 레이저의 파장특성을 광섬유통신에 있어서 광섬유의 분산특성으로 인한 요소 중 하나로써, 이러한 광학적 특성을 조사하기 위해서는 고가의 파장분석장치가 필요하게 된다. 또한, 반도체 발광소자의 파장특성을 측정할 경우 주-울열(Joule heat)에 의한 소자의 온도상승을 배제시키면서 수행해야 할 때가 있으며, 이러한 경우에는 주기에 비하여 폭이 매우 짧은 전류펄스(duty cycle≤0.01)로 소자를 동작시켜야만 한다.(5) 이 때, 검출되는 광펄스의 강도가 충분히 크다면 시간평균 파장특성을 측정할 수 있으나, 광신호의 강도가 광검출기의 최저 수신감도 근처로 미약할 경우에는 샘플링스코프와 같은 고가의 장치가 필요하게 된다. 그러나 이러한 고가의 파장분석장치 및 샘플링스코프 등을 소규모 실험실에서 갖추기는 힘든 경우가 많다. 따라서, 본 연구에서는 소규모 실험실에서 비교적 쉽게 마련할 수 있는 분광기를 이용하여 1Å 정도의 분해능을 가지며 아날로그 그래픽이 가능한 파장분석장치를 구성하였으며, 또한 광검출기로부터 검출된 광펄스 신호를 펄스이 최대값에 해당하는 직류신호로 변환시키는 최대값 검출기(peak detector)가 결합된 광수신용 트랜지스터 증폭기를 제작하여 수십μW 미만의 광펄스 신호도 검출할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 현재 시판되고 있는 각종 발광다이오드와 AlGaAs/GaAs/ LD(Laser Diode) 및 InGaAsP/InP BH-LD의 파장특성을 측정하고 그 결과를 분석함으로써 이러한 장치들이 반도체 발광소자의 파장특성을 측정하는데 실용적으로 이용될 수 있음을 밝혀놓고 있다.

본 논문의 2장에서는 파장분석장치의 구성, 3장에서는 제작된 광수신용 증폭기의 특성 및 펄스 구동상태에서의 파장분석에 관하여 기술하였으며, 마지막으로 결론을 기술하였다.

II. 파장분석장치의 구성

파장분석장치에 사용되는 분광기는 입사슬릿을 통해 들어온 빛을 회절결자에 의해 각 파장에

따라 다른 각도로 회절시키고, 출사슬릿을 통해 나오는 스펙트럼의 파장을 표시하게 되어 있다. 이 때 스펙트럼의 형성은 회절빔의 광로차가 파장의 정수배가 될 때 일어나는 보강간섭의 결과이다.

회절격자에 의한 파장측정 원리가 그림 1에 나타나 있다. 그림 1로부터 회절빔의 광경로차를 구할 수 있으며, 스펙트럼의 파장과 입사각 및 회절각의 관계는 (1)식과 같이 주어진다.⁽⁶⁾

$$m\lambda = d(\sin\theta_i + \sin\theta_o) \quad (1)$$

(1)식에서 $m=0, 1, 2, \dots, \lambda$ 는 입사빔의 파장, d 는 회절격자의 주기, θ_i 는 입사각, 그리고 θ_o 는 회절각을 나타낸다. 여기서 θ_i 및 θ_o 는 회절격자의 법선으로부터 반시계 방향을 +로 하였다. 이 때 $m=0$ 인 0차 회절빔의 경우에는 $\theta_i = -\theta_o$ 로써 모든 파장에 대하여 입사각과 회절각의 크기가 동일하기 때문에 스펙트럼이 파장에 따라 분리되지 않는다.

일반적으로 파장이 다른 두 스펙트럼의 분리 정도를 각분산(angular disperison)이라 하며 (2)식과 같이 주어진다.⁽⁶⁾

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{m}{d \cos\theta_o} \quad (2)$$

(2)식에서 $\Delta\lambda$ 는 두 스펙트럼의 파장차이며, $\Delta\theta$ 는 두 스펙트럼의 회절각의 차를 나타낸다. (2)식으로부터 각분산은 회절격자의 주기에 반비례하고 회절빔의 차수에 비례함을 알 수 있다. 일반적으로 차수가 증가할수록 각분산은 커지는 반면 회절빔의 세기는 작아지기 때문에, 분광기에서는 이러한 각분산 및 효율을 고려하여 적당한 회절빔을 선택하게 된다.

실험에 사용한 분광기는 Fastie-Ebert mount 형태의 Jarrell-Ash 제품으로써 회절격자는 1mm 당 600 grooves이고, 600mm~2.0 μ m의 파장영역에서 사용되며, 반사경에서 출사슬릿까지의 초점거리는 275mm이며, nanometer 단위의 디지털카운터로 파장이 표시된다. 따라서 상용화되어

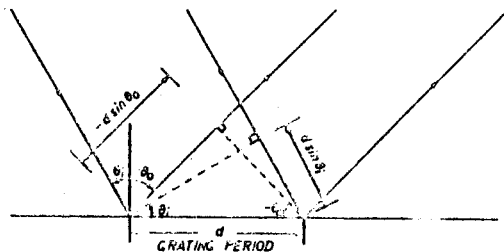


그림 1. 회절격자에 의한 파장측정 원리.

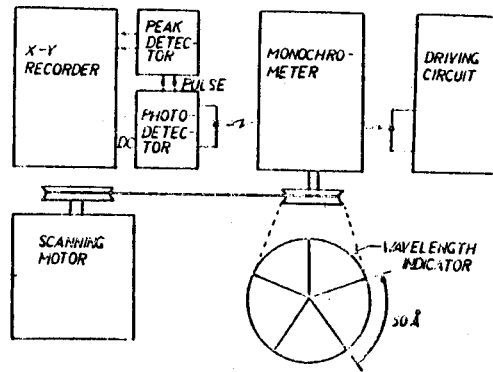


그림 2. 분광기를 이용한 파장분석 장치.

있는 이 분광기의 분해능은 10\AA 정도이다. 즉, 반도체 레이저의 스펙트럼의 모드간격이 보통 $2\text{\AA} \sim 20\text{\AA}$ 이므로 이 장치를 이용하여 반도체 레이저의 모드를 분해해내기는 거의 불가능하다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이 분광기에 scanning motor, 광검출기, 그리고 X-Y recorder를 그림 2와 같이 구성시켰다. 특히 정확한 파장 표시를 위하여 회전속도를 미세하게 조정할 수 있는 polyrecorder를 scanning motor로 사용하였으며, 50\AA 단위로 눈금을 표시하게 하였다.

한편, (2)식으로부터 구해지는 각분산에 초점거리를 곱하여 역수를 취하면 초점평면상에서의 빛의 분산을 구할 수 있다.⁽⁶⁾ 본 연구에서 사용된 분광기의 분산은 6nm/mm 이며, 출사슬릿폭에 대한 분해능은 출사슬릿폭과 분산의 곱으로 주어진다. 따라서 출사슬릿폭에 따른 분해능을 조사하기 위하여 슬릿폭이 각각 $10\mu\text{m}$, $25\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ 인 슬릿을 제작하고, He-Ne 레이저를 사용하여 분광기의 분해능을 측정하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

그림 3의 실험결과로부터 분광기의 분해능이 이론치와 거의 일치함을 알 수 있으며, $10\mu\text{m}$ 의 슬릿을 사용할때 약 1\AA 정도의 분해능이 얻어짐을 확인할 수 있다. 그림 3에서의 각각의 출사슬릿폭에 대한 He-Ne 레이저의 스펙트럼을 그림 4에 나타내었다.

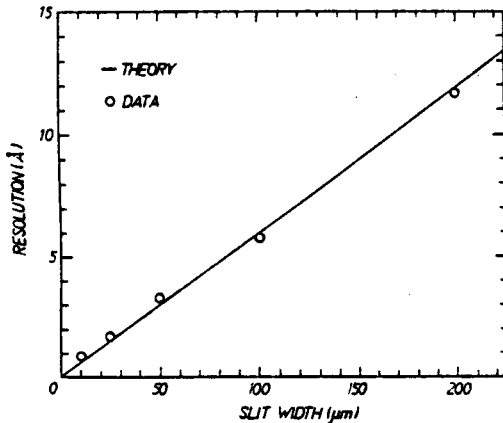


그림 3. 출사슬릿폭에 대한 분광기의 분해능.

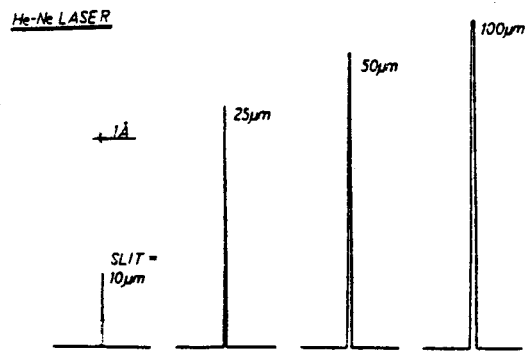
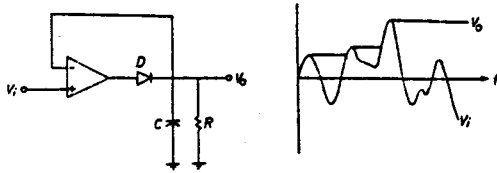


그림 4. 출사슬릿폭에 따른 He-Ne Laser의 스펙트럼.

III. 광수신용 증폭기의 제작

반도체 발광소자의 주-울열(Joule heat)에 의한 온도상승을 배제시키면서 소자의 파장특성을 측정하기 위하여, 소자들들 주기에 비해 폭이 매우 짧은 전류펄스(duty cycle ≤ 0.01)로 동작시켜야 될 경우가 종종 있다. 이 때 광펄스 신호의 강도가 광검출기의 최저 수신감도 근처로 미약하다면 시간평균 광검출에 의한 파장측정은 거의 불가능하며, 만일 샘플링스코프와 같은 장치가 있다면

광펄스 순시 피크값에 대한 파장을 측정할 수 있으나 현재 샘플링스코프는 대단히 고가이므로 소규모의 실험실에서 갖추기는 어려운 실정에 있다. 따라서 본 논문에서는 미약한 광펄스의 파장 특성을 측정할 수 있도록 광검출기로부터 검출된 광펄스 신호를 펄스의 최대값에 해당되는 직류 신호를 변환시키는 최대값 검출기(peak detector)를 고안하여 보았다.



(a) 최대값 검출기의 기본회로
(b) 최대값 검출기의 입·출력 관계
그림 5. 최대값 검출기의 원리.

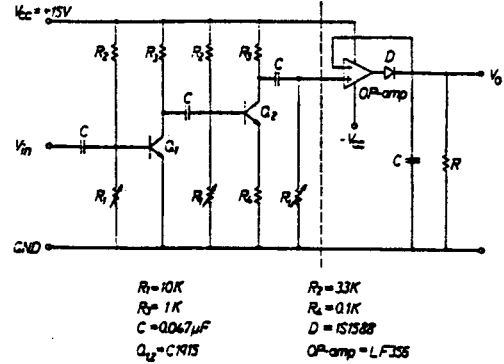


그림 6. 광수신용 증폭기의 회로도.

그림 5의 (a)는 입력신호의 최대값을 검출하기 위한 최대값 검출기의 일반적인 회로를 나타내었다.⁽⁷⁾ (b)는 (a)회로의 출력이 입력 V_i 의 양의 최대값으로 유지되고 있음을 보여주고 있다. 즉, 다이오드를 통해 들어오는 순방향의 입력전류가 출력단의 커패시터에 충전되어 출력전압이 입력전압의 최대값을 가지게 된다.

제작한 광수신용 증폭기의 회로도도 그림 6과 같다. 여기서 점선의 좌측부는 입력신호를 증폭하기 위한 TR증폭단이며, 우측부는 증폭된 신호의 최대값을 검출하기 위한 최대값 검출기이다. 제작한 광수신용 증폭기의 이득은 약 60dB이고, 차단주파수는 $f_L=4\text{kHz}$, $f_H=700\text{kHz}$ 로 나타났다.

그림 7은 그림 2의 장치를 이용하여 측정된 각종 발광 다이오드(LED)의 파장특성으로써 30mA의 직류전류를 인가하여 얻은 결과이다. 여기서 녹색 LED의 중심파장은 약 5750Å이었으며, 황색 LED는 약 5950Å, 그리고 적색 LED는 약 6950Å에서 중심파장이 나타났다.

그림 8은 주기 0.2ms(5kHz), duty cycle=0.01인 전류펄스를 LED에 인가하고, 그림 6의 광수신용 증폭기를 이용하여 측정된 각종 LED의 스펙트럼 분석결과이다.

그림 8에서의 각종 LED의 중심파장은 녹색 LED의 경우 약 5600Å, 황색 LED는 약 5800Å, 그리고 적색 LED는 약 6900Å이었으며, 그림 7의 직류구동의 경우와 비교해 볼 때 중심파장이 50Å~150Å 정도 단파장쪽으로 이동된 것을 알 수 있다. 이것은 직류구동의 경우 pn 접합면에서 온도상승으로 인해 에너지갭이 좁아진 결과로 생각되어진다.⁽⁸⁾

그림 9는 AlGaAs/GaAs LD를 주기가 0.2ms이고 duty cycle이 0.01일 때 전류펄스의 세기를 다르게 하면서 측정된 결과이다.

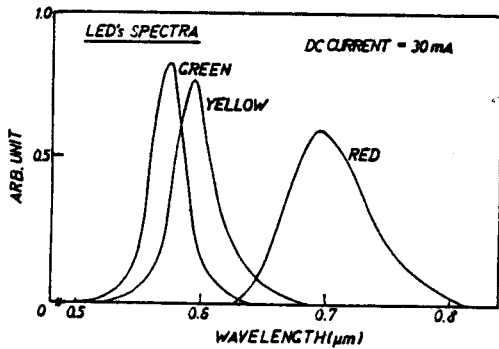


그림 7. 직류구동상태의 LED의 스펙트럼.

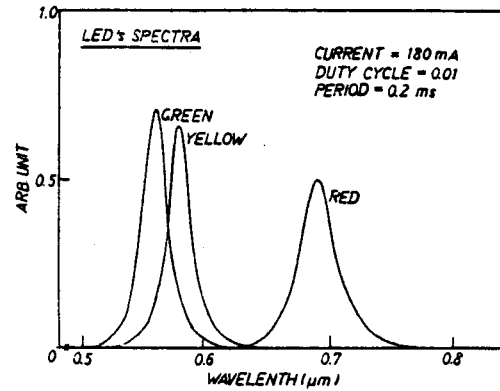


그림 8. 펄스구동상태의 LED의 스펙트럼.

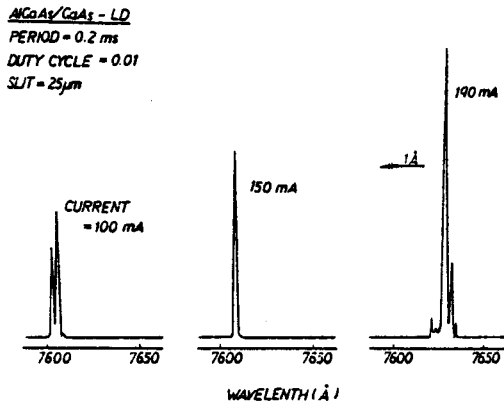


그림 9. AlGaAs/GaAs LD 스펙트럼.

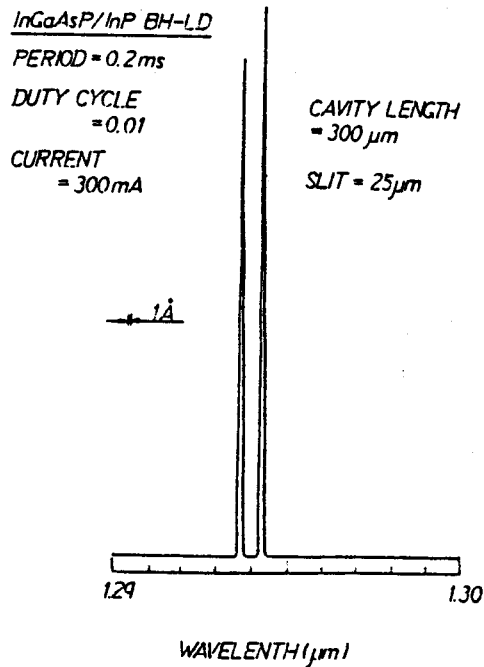


그림 10. InGaAsP/InP BH-LD의 스펙트럼

또한, 광섬유의 저손실 및 영분산특성에 부합하는 $1.3\mu\text{m}$ 영역의 InGaAsP/InP BH-LD의 파장 특성을 측정 한 결과의 그림 10에 나타나 있다.

그림 9와 그림 10의 결과로부터 발진모드 간격이 수 Å 정도인 반도체레이저의 경우에도 각 모드 불을 분해할 수 있음을 확인할 수 있다. 그리고 그림 10에서의 모드간격은 5.7\AA 임을 알 수 있다. 일반적으로 발진모드간격이 주어지면 유효굴절률(n_{eff} , effective refractive index)을 구할 수 있으며, 관계식은 다음과 같이 주어진다.⁽⁸⁾

$$n_{eff} = \lambda^2 / 2l\delta\lambda \quad (3)$$

여기서 λ 는 중심파장, l 는 공진기 길이, 그리고 $\delta\lambda$ 는 발진모드 간격을 나타낸다. 그림 10에서 $\delta\lambda = 5.7 \text{ \AA}$ 인 InGaAsP/InP BH-LD의 유효굴절률은 $\lambda = 1.2943 \mu\text{m}$, $l = 300 \mu\text{m}$ 을 (3)식에 대입하면 약 4.563이 얻어진다. 한편, 공진기 이론에서 유효굴절률은

$$n_{eff} = n_0 \{ 1 - (\lambda_0 / n_0) dn/d\lambda \} \quad (4)$$

으로 정의되며,⁽⁸⁾ 여기서 $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ 에 대한 InGaAsP의 $n_0 = 3.47$, $dn/d\lambda = -0.318$ 이므로⁽⁹⁾ $n_{eff} = 4.575$ 가 얻어진다. 따라서 실험을 통해 얻어진 유효굴절률의 오차는 약 2% 미만이다. 이러한 오차는 실험오차 영역에 들어간다고 볼 수 있으므로, 파장분석장치의 분해능의 개선을 통해 비교적 정확한 파장측정이 이루어졌음을 확인할 수 있다.

IV. 맺음말

광섬유통신에 있어서 광신호의 전달손실 등을 결정하는 중요한 요소 중 하나인 발광소자의 파장특성을 측정하기 위하여 분광기를 이용한 파장분석장치를 구성하고, 차단주파수 $f_L = 4 \text{ kHz}$, $f_H = 700 \text{ kHz}$ 에서 $10 \mu\text{W}$ 미만의 수신감도를 가지는 광수신용 증폭기를 제작하여 펄스구동상태의 광소자의 파장특성을 측정하였다. 각종 LED의 중심파장은 녹색 LED의 경우 약 5600 \AA , 황색 LED는 약 5800 \AA , 그리고 적색 LED는 약 6900 \AA 로써, 직류구동의 경우와 비교해 볼 때 중심파장이 $50 \text{ \AA} \sim 150 \text{ \AA}$ 정도 단파장쪽으로 이동됨을 확인하였다. 또한 600 grooves/mm 인 회절격자의 각분산을 고려하여 $10 \mu\text{m}$ 슬릿을 제작하여 사용하므로써, 1 \AA 정도의 선폭으로 분해되어진 반도체 레이저의 스펙트럼을 얻을 수 있었으며, 특히 광통신에 사용되는 장파장영역의 InGaAsP/InP BH-LD의 파장분석이 가능함을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 파장분석장치가 고가의 장비를 구입하지 못하는 소규모 실험실 등에서 광통신용 반도체발광소자의 파장분석장치로의 활용가치가 클 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 레이저 장려연구센터의 지원을 일부 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) M. Horiguchi and H. Osanai, Elect. Lett. 12(12), 310(1976).
- 2) T. Matsuoka, H. Nagai, Y. Itaya, Y. Noguchi, U. Suguki and T. Ikeagmi, Elect. Lett. 1(4) 106(1979).
- 3) K. Oe, S. Ando and K. Sugiyama, Japan. J. Appl. Phys. 16, 1273(1977).

- 4) H. Kawaguchi, T. Takahashi, Y. Toyoshima, H. Nagai and G. Iwane, *Elect. Lett.* 15, 669(1979).
- 5) Y. Suematsu and K. Iga, *Introduction to Optical Fiber Communications* (John Wiley & Sons, New York, 1982) p. 67.
- 6) F.A. Jenkins and H.E. White, *Fundamentals of Optics*(McGRAW-HILL, Singapore, 1981) pp. 355-377.
- 7) J. Millman and A. Grabel, *Microelectronics*(McGRAW-HILL, New York, 1987) p. 766.
- 8) 末松安晴, 半導体レーザと光集積回路, (オーム, 東京, 1982) p. 294.
- 9) K. Utaka, Y. Suematsu, K. Kobayashi, and H. Kawanishi, *Japan, J. Appl. Phys.* 19, L137(1980)