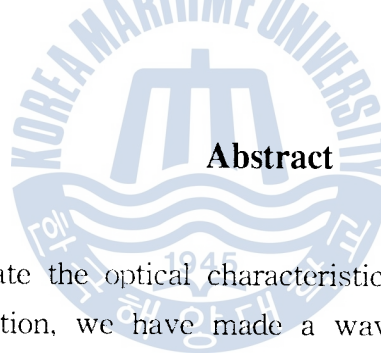


반도체레이저의 광 스펙트럼 측정을 위한 파장측정 장치의 제작에 관한 연구

오 수 환¹⁾, 홍 창 희²⁾

A study on the fabrication of wavelength measurement system for the spectrum analysis of laser diodes

Su-Hwan Oh, Tchang-Hee Hong



Abstract

In order to investigate the optical characteristics of semiconductor lasers for fiber optic communication, we have made a wavelength measurement system using computer. The advantages of this system are as follows: Analog output signal from a detector is displayed on C.R.T. through conversion to digital. The data displayed on C.R.T. can be saved on a disk. The more creditable data can be gotten with its ability of the exact calibration.

We have made an optical receiving amplifier using Op-amps which has about 60dB of gain and 50kHz of DC cutoff frequency. We have also made a peak detector with gain 1. Measuring with this system the wavelength characteristics, of various LEDs, 0.78 μm AlGaAs/GaAs MQW-TJS-LD and 1.55 μm InGaAsP/InP DFB SMQW-LD made by ERTI Korea an also analyzing the results, we show that the system can be practically used in measuring the wavelength characteristics of semiconductor light emitting devices

1) 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정 전자공학 전공

2) 한국해양대학교 전자통신공학과 교수

1. 서론

광섬유통신용 발광소자인 반도체레이저의 파장특성은 광섬유통신에 있어서 광섬유의 분산특성으로 인한 광섬유손실 및 최대 전송거리등을 결정하는 중요한 요소중 하나로써, 이러한 광학적 특성을 조사하기 위해서는 고가의 파장분석장치가 필요하게 된다. 그러나 이러한 고가의 파장분석장치는 소규모 실험실에서 갖추기 힘든 경우가 많다. 따라서 논문에서는 소규모 실험실에서 비교적 쉽게 마련할 수 있는 분광기를 이용하여 1Å 정도의 분해능을 가지며 아날로그 그래픽이 가능한 파장측정 장치를 구성하였다.⁽¹⁾

그러나 이렇게 시스템을 구성하여 calibration을 할 경우 스트립차트 레코더가 측정데이터를 아날로그 신호로 나타내기 때문에 정확한 calibration이 어렵다. 따라서 측정된 데이터의 신뢰성을 얻기 어려운 단점이 있을 뿐만 아니라 측정된 데이터의 저장 및 재현을 할 수 없었다. 이러한 단점을 없애기 위해 본 논문에서는 컴퓨터를 이용한 파장측정 장치를 구성하였다. 스트립차트 레코더에 입력되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 컴퓨터의 화면상에 나타낼 수 있도록 하였다. 화면에 나타난 데이터는 컴퓨터에 저장이 가능하게 함으로써 측정데이터의 재현 시킬수 있으며, 컴퓨터로 구성된 파장측정시스템을 calibration할 경우 측정데이터가 디지털신호로 컴퓨터 화면상에 나타나기 때문에 정확한 calibration이 가능하였으며, 이렇게 함으로써 신뢰성 있는 측정데이터를 얻을 수 있었다.

이렇게 하여 구성된 측정시스템을 이용하여 시중에 시판중인 각종 발광다이오드와 ETRI에서 제작한 반도체 레이저인 AlGaAs/GaAs MQW-TJS-LD(Multi Quantum Well Transverse Junction Stripe Laser Diode)와 InGaAsP/InP DFB SMQW-LD(Distributed Feedback Strained Multi Quantum Well Laser Diode)의 파장특성을 측정하고 그 결과를 분석함으로써 이러한 장치들이 반도체 발광소자의 파장특성을 측정하는데 실용적으로 이용될 수 있음을 밝혀 놓고 있다.

2. 파장측정 장치의 구성

2.1 파장측정원리

파장분석에 사용되는 분광기는 입사 슬릿을 통해 들어온 빛이 회절격자에 의해 각 파장에 따라 다른 각도로 회절되어, 출사슬릿을 통해 나오는 입사광의 파장을 측정하는 장치이다. 회절빔의 광로차가 파장의 정수배가 되는 각도를 이룰 때 보강간섭이 일어나게 되며, 이 조건을 만족하는 스펙트럼 성분이 검출되게 된다. 회절격자에 의한 파장측정 원리가 그림 2.1에 나타나 있다. 그림 2.1로 부터 회절빔의 광경로차를 구할 수 있으며, 입사광의 파장과 입사각 및 회절각의 관계는 다음과 같이 주어진다.⁽²⁾

$$m\lambda = a(\sin\theta_m - \sin\theta_i) \quad (1-1)$$

식(1-1)에서 $m=0, 1, 2, \dots$ 로서 회절빔의 차수를 나타내고, λ 는 입사광의 파장, a 는 회절격자의 주기, θ_i 는 회절격자의 수직면과 입사광이 이루는 입사각, 그리고 θ_m 은 회절각을 나타내며, 각도 θ_i 와 θ_m 은 회절격자의 회절위치에 의해 결정된다. 이때 $m=0$ 인 0차 회절광의 경우, 즉 $\theta_i = \theta_m$ 의 경우, 모든 파장에 대하여 입사각과 회절각의 크기가 동일하게 되어 스펙트럼이 분리되지 않는다.

일반적으로 파장의 변화에 따른 각도의 변화율을 각분산(angular dispersion)이라 하며 다음과 같이 주어진다.⁽²⁾

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{m}{a\cos\theta_m} \quad (1-2)$$

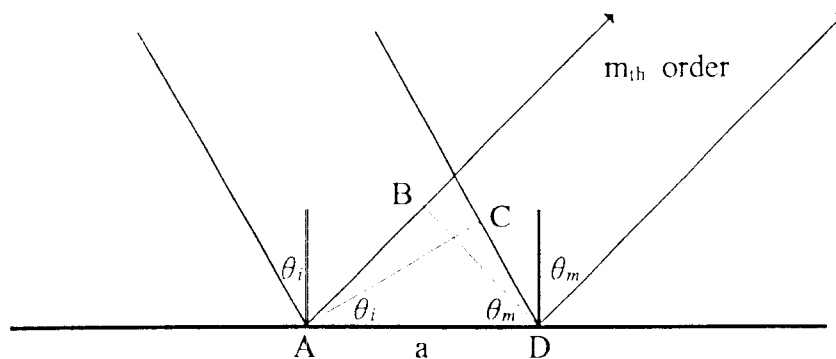


그림 2.1 회절격자에 의한 파장측정원리

단, $\Delta\lambda$ 는 두 스펙트럼의 파장간격이며, $\Delta\theta$ 는 두 스펙트럼의 회절각의 차이이고, a 는 회절격자의 주기를 나타낸다. 식 (1-2)로 부터 각분산은 회절격자의 주기에 반비례하고 회절광의 차수에 비례함을 알 수 있다. 일반적으로 차수가 증가할수록 각분산은 커져서 측정하고자 하는 2개 파장의 간격이 넓어지기 때문에 분해능은 증가하지만 회절빔의 세기는 작아지고 다른 파장과 접근하여 특정의 쌍을 생성하여 불확정성이 나타나게 된다. 따라서 분광기에서는 이러한 각분산 및 광강도를 고려하여 적당한 회절광을 선택하게 된다.

2.2 컴퓨터를 이용한 파장측정 장치의 구성

식(1-2)으로 부터 구해지는 각분산에 촛점거리를 곱하여 역수를 취하면 촛점평면상에서 빛의 분산을 구할 수 있다. 본 연구에 사용된 분광기는 Fastie-Ebert mount 형태의 Jarrell-Ash사 제품으로서 회절격자는 1mm당 600grooves이고, 600nm~2.0 μ m의 파장영역에서 사용되며 반사경에서 출사슬릿까지의 촛점거리는 275mm 분산은 6nm/mm이며, 출사슬릿폭에 대한 분해능은 출사슬릿 폭과 분산의 곱으로 주어진다. 따라서 폭 25 μ m인 슬릿을 사용한다면, 약 1Å 정도의 이론적인 분해능을 얻을 수 있는데, 시스템 구성상 오차가 개입하게 되므로 1Å까지 정확히 측정하기는 사실상 어렵다. 그러므로 이 분광기에 scanning motor, 광검출기, 스트립차트 레코더를 이용하여 그림 2.2와 같은 파장측정 장치를 구성하였다.⁽¹⁾ 이렇게 구성한 측정 장치에, 25 μ m슬릿을 사용한다면, 약 1Å 정도까지 측정할 수 있게 되었으며, 아날로그 그래픽이 가능한 측정 시스템을 구성할 수 있었다. 특히 정확한 파장표시를 위하여 회전속도를 미세하게 조정할 수 있는 poly recorder를 scanning motor로 사용하였으며, 분광기 옆에 붙어 있는 원형스위치에 50Å 단위로 기준점을 표시하게 하였다.

이렇게 구성된 파장측정 장치의 calibration을 위해 정확한 중심파장이 알려져 있는 He-Ne레이저로 calibration하였다. 25 μ m 슬릿을 사용하여 약 1Å 정도의 분해능으로 He-Ne레이저의 파장을 측정한 것이 그림 2.3에 나타나 있다. 그림 2.3은 스트립차트 레코더로 측정한 것으로서 He-Ne레이저의 중심파장을 알려면 그림에 나타나 있는 기준 펄스신호의 입력값을 알아야 하고, 그 입력 펄스값에서 중심파장까지 계산을 해야 하므로 절대 중심파장값에 대한 정확도가 떨어진다. 그리고 이렇게

파장측정 장치를 구성한 경우 측정오차에 의해 측정데이터의 신뢰성을 가질 수 없으며, 또한 측정된 데이터를 다시 재현한다거나 저장을 할 수 없다. 따라서 이러한 문제점들을 보완하기 위해 그림 2.4와 같이 파장측정 장치를 컴퓨터로 제어할 수 있도록 구성하여 광검출기를 통해 측정된 아날로그신호를 디지털신호로 변환하여 컴퓨터로 저장 및 출력을 할 수 있게 하였다.

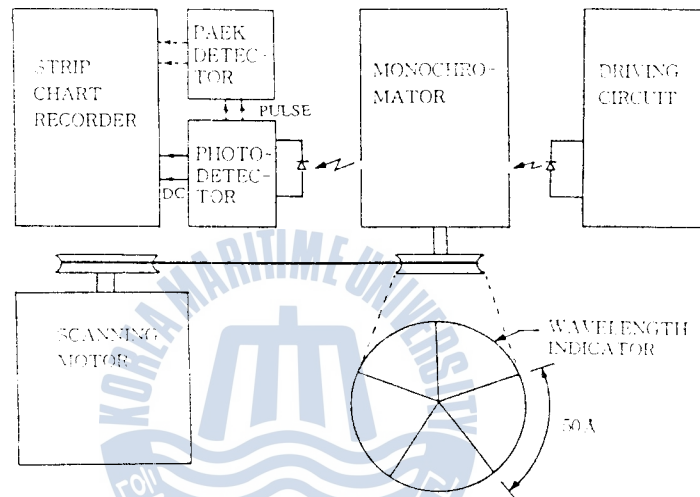


그림 2.2 스트립차트 레코더를 이용한 파장분석 장치

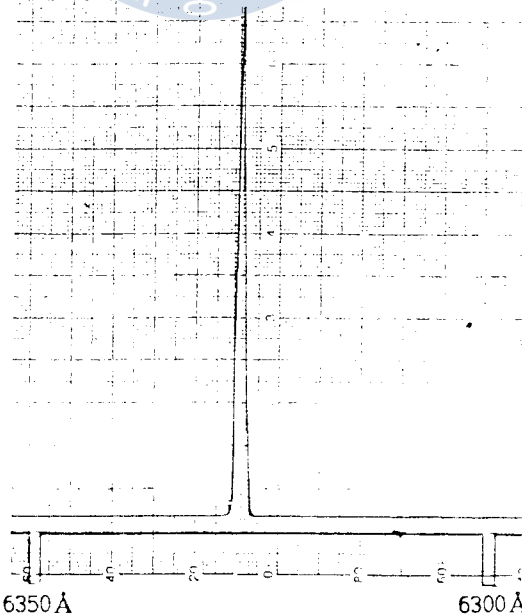


그림 2.3 스트립차트 레코더를 이용한 He-Ne레이저의 스펙트럼 측정

그림 2.4는 컴퓨터를 이용한 파장측정 장치이며 광검출기에서 검출된 아날로그 광신호는 A/D컨버터를 사용하여 디지털 값으로 변환하여 인터페이스부를 통하여 컴퓨터에 전달하도록 하였다. 그림 2.5는 입력신호를 처리하기 위한 구성도를 나타낸다. A/D 변환부는 측차비교형 A/D 컨버터인 ADC0804 IC로 구성되고, 인터페이스부는 A/D 컨버터(ADC0804)를 제어하기 위한 패럴렐 I/O포트(8255), 컴퓨터의 카드슬롯에서 나오는 어드레스 신호를 디코더하여 입출력포트를 제어하는 어드레스 디코더 부분, 데이터의 읽기 및 쓰기를 제어하는 부분, 그리고 데이터 전송부분으로 구성하였다.

A/D변환카드의 신호처리 및 데이터처리 시스템을 제어하는 프로그램은, A/D변환카드를 이용하여 측정된 아날로그 신호를 디지털 값으로 바꾸어 그 값을 화면에 표시하는 프로그램으로서 C언어로 작성하였다. 이 프로그램은 A/D변환카드를 컴퓨터 슬롯에 끼운 후에 실행시켜야 한다. 측정하고자 하는 광신호는 검출기에서 검출되어 0~5V사이의 아날로그 전압량으로 출력되는데, 이것이 아날로그 입력단자에 입력되면 그 값에 비례하는 디지털 값으로 변환되어 데이터를 화면에 표시해 준다. 이 프로그램의 기능은 크게 세 가지로 나누어진다. 첫째, 측정된 데이터를 A/D 변환하여 디스크에 저장하는 동시에 화면에 선으로 표시된다. 둘째, 광의 세기와 파장 측정범위의 조절이 가능하고, 셋째, 화면에 표시된 내용을 프린터에

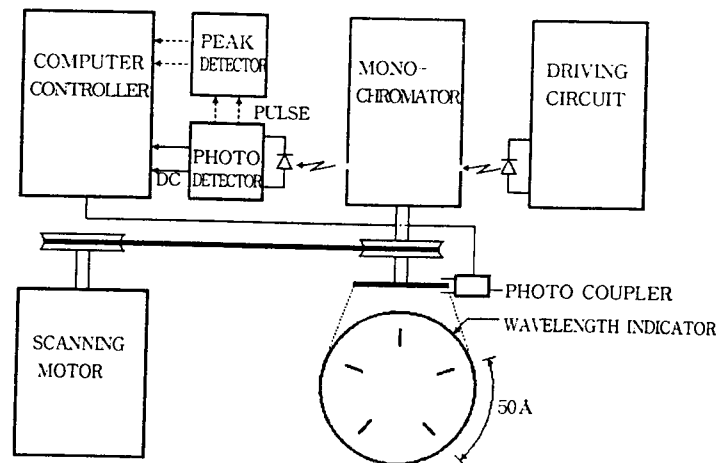


그림 2.4 컴퓨터를 이용한 파장측정 장치

출력할 수 있다. 그 밖에 화면에 글자를 넣을 수 있고 또한, 데이터는 1시간 동안 계속 입력받아 저장할 수 있도록 되어 있다. 정확한 파장측정을 위해서는 분광기 옆에 붙어 있는 원형스위치의 접점이 정확하게 이루어져야 한다. 그런데 그림 2.2의 파장측정 장치에서는 50A 단위로 붙어 있는 원형스위치의 ON/OFF가 기계적으로 작동되기 때문에 스위치가 ON되는 순간 chattering 잡음이 생겨 측정값에 오차로 작용하거나, 시스템 제어 프로그램이 잘못 실행되게 되는 등의 문제점이 있었다. 따라서 기계적 스위치에 의한 잡음이 생기지 않도록 이 부분을 광전자적 스위치로 대체하였다.

본 논문에서는 photo coupler를 TTL(74LS04)회로와 인터페이스 하여⁽³⁾ 그림 2.6과 같은 회로를 사용하여 광전자적 스위치를 만들었다. 그림 2.6에서 photo coupler사이에 끼어 있는 원형 평판이 회전하므로써 50A 단위로 표시된 원형평판의 눈금을 통해 나온 빛을 전기적 신호로 바꾸어 컴퓨터에 전달하여 컴퓨터가 50A 단위로 기준점을 인식하게 하므로써, 기계식으로 작동하는 스위치보다 정확한 중심파장값의 측정이 가능하게 하였다.

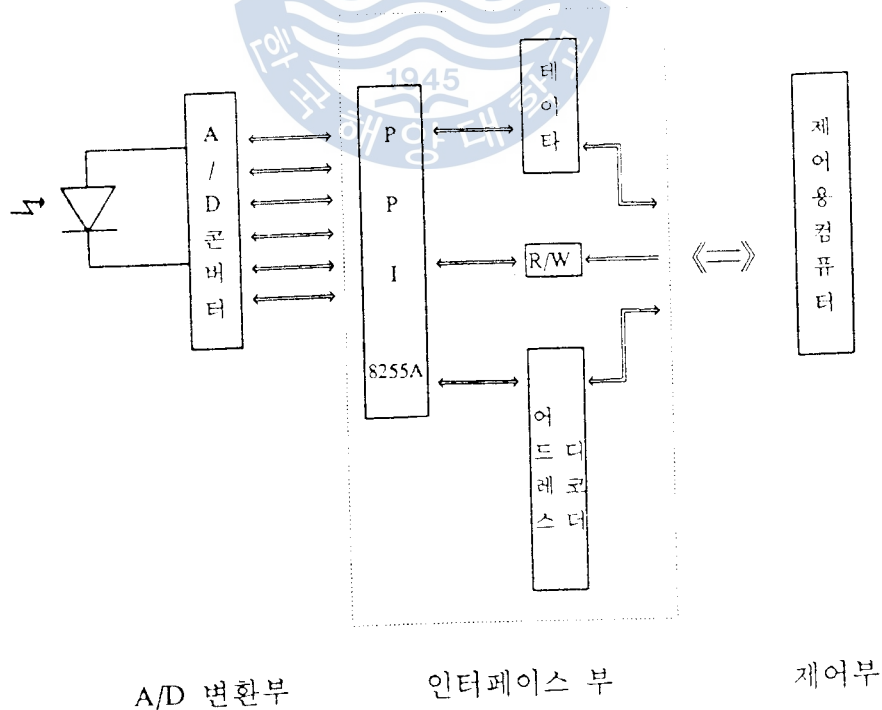


그림 2.5 A/D 변환 카드의 구성도

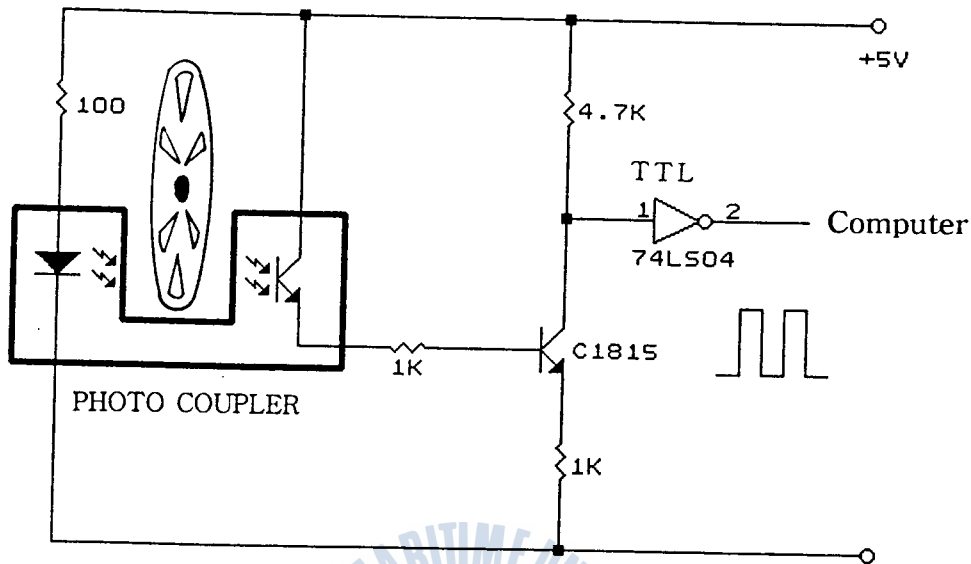


그림 2.6 Photo coupler를 이용한 회로도

2.3 발광소자의 파장측정

정확한 파장 측정을 위해 컴퓨터를 이용한 파장측정 시스템을 중심파장값이 알려져 있는 He-Ne레이저의 파장을 이용하여 파장측정 장치의 정확한 calibration을 하였다. 그림 2.2의 스트립차트 레코더를 이용한 파장측정과 같은 조건으로 파장을 측정하기 위해 약 1Å 정도의 분해능을 가지는 폭 $25\mu\text{m}$ 인 슬릿을 사용하여 He-Ne레이저의 파장을 측정하여 그림 2.7과 같은 측정 결과를 얻을 수 있었다. 그림에서 알 수 있듯이 측정된 He-Ne레이저의 중심파장이 6328Å 으로서, 이 측정시스템의 calibration이 정확히 되었음을 확인할 수 있다. 그리고 그림 2.3의 스트립차트 레코더를 이용한 파장측정 결과와 비교해 볼 때 컴퓨터를 이용한 파장측정장치에서는 중심파장값을 정확히 측정 해낼 수 있다.

이러한 파장측정 시스템을 이용하여 시중에 시판중인 발광소자의 중심파장을 측정하여 보았다. 본 실험에 사용된 PD(Photo detector)는 PN접합형 Si-PD를 사용하였다.

그리고, 보통 시판중인 LED의 광강도가 아주 미약하기 때문에 PD에 측정되는 신

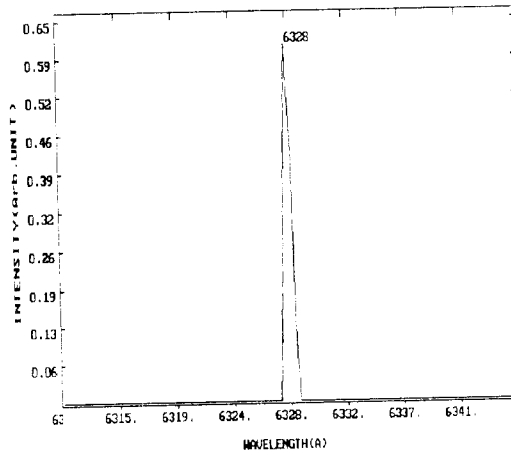


그림 2.7 컴퓨터를 이용한 Hc-Ne레이저의 스펙트럼 측정

호의 증폭이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 그림 2.8과 같은 광수신용 증폭기⁽⁴⁾를 제작하였으며, 특징은 이득이 약 60dB이고 차단주파수는 DC에서 50kHz를 얻을 수 있었다. 또한 증폭기 끝에 병렬로 100 μ F 정도의 콘덴서를 접속하여 수신된 펄스신호를 직류신호로 바꾸어 측정하였다. 그림 2.9, 2.10, 2.11에는 시판되고 있는 녹색, 황색, 적색 LED에 직류전류나 펄스신호를 인가하여 얻은 각각의 파장측정 결과가 나타나 있다. 그림 2.9, 2.10, 2.11의 (a)는 직류전류 30mA를 인가하여 얻은 파장특성으로서 중심파장이 각각 약 5670Å, 5810Å, 6935Å이며, 그림 2.9, 2.10, 2.11의 (b)는 주기 2ms(500Hz), duty factor가 1%인 펄스전류 120mA를 인가하여 얻

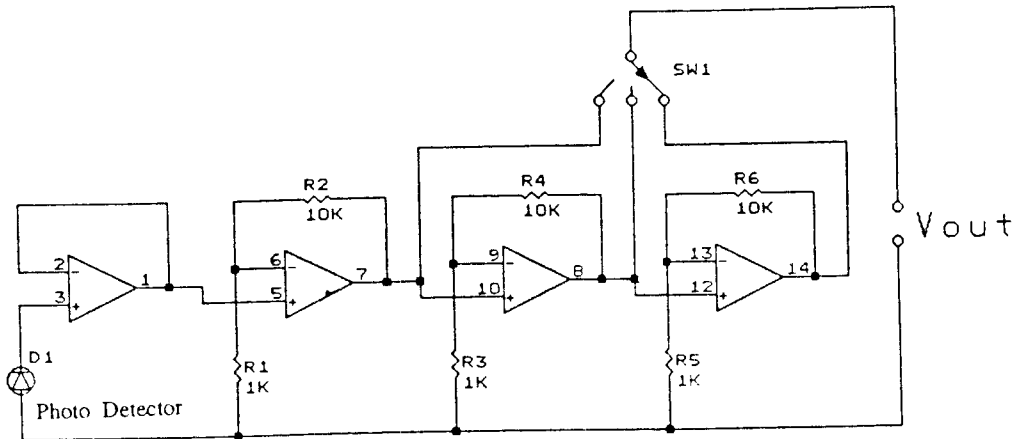


그림 2.8 광수신용 증폭기의 회로도

은 결과로서 중심파장이 각각 5600 Å, 5790 Å, 6900 Å로서 직류구동의 경우와 비교해 볼 때, 중심파장이 30~70 Å 정도 단파장쪽으로 이동된 것을 알 수 있다. 이것은 직류구동의 경우 PN접합면에서 주울 열에 의한 온도상승으로 인해 에너지갭이 좁아진 결과로 생각된다.⁽⁵⁾

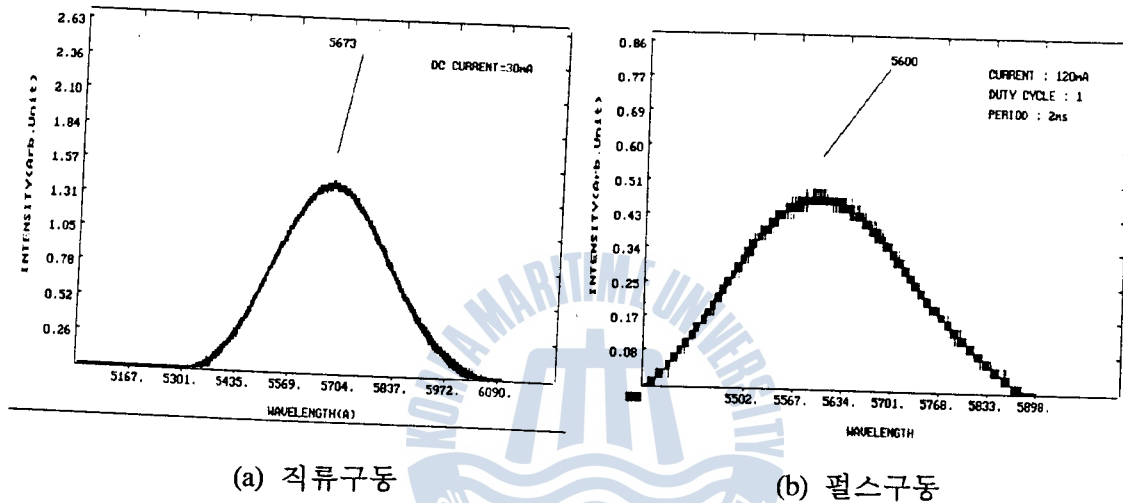


그림 2.9 녹색 LED의 스펙트럼 측정

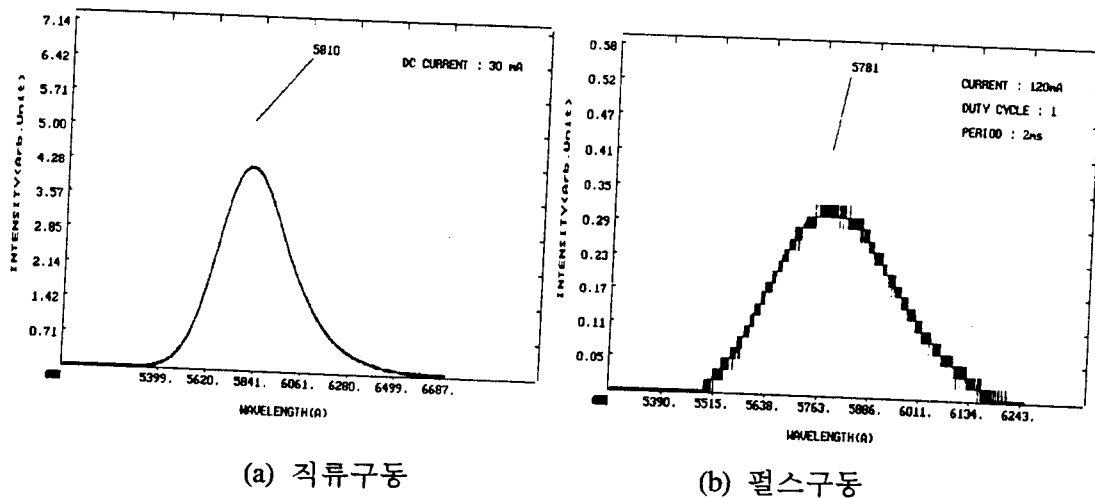
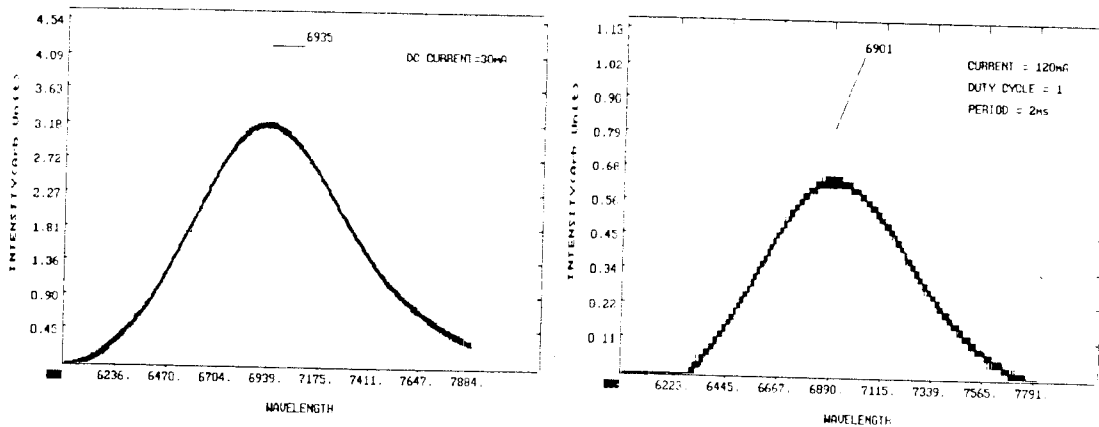


그림 2.10 황색 LED의 스펙트럼 측정



(a) 직류구동

(b) 펄스 구동

그림 2.11 적색 LED의 스펙트럼 측정

위와 같은 파장측정 시스템을 구성하여 반도체레이저의 파장을 측정할 수 있는지를 알아보기 위해 반도체레이저를 사용하여 실험을 행하였다. 실험에 사용한 반도체레이저는 ETRI에서 제작한 AlGaAs MQW-TJS-LD와 InGaAsP/InP DFB SMQW-LD이다.

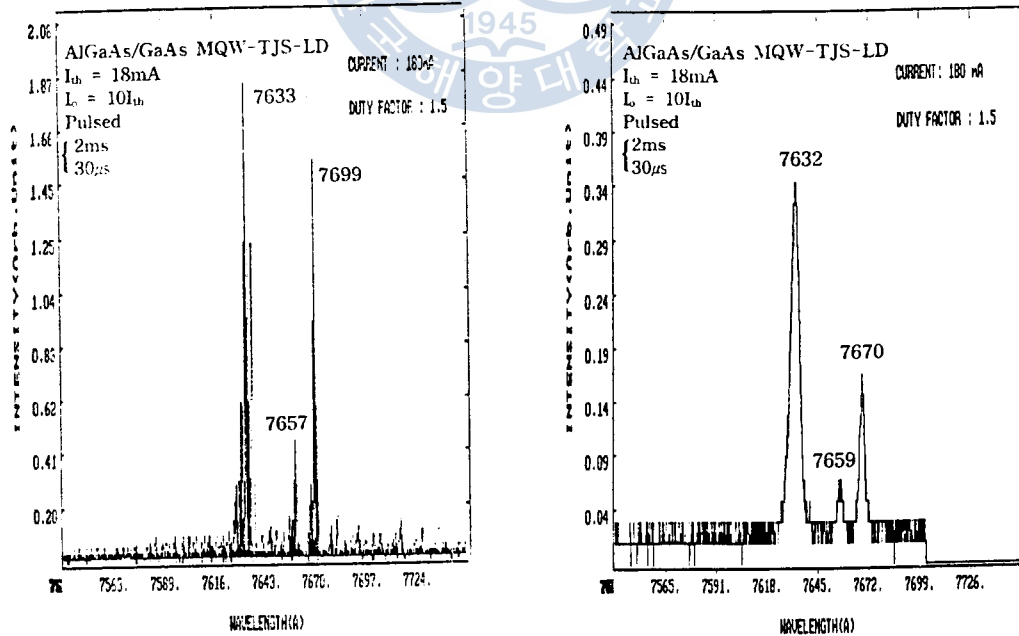
Heat sink가 확실히 접속되지 않은 반도체레이저는 직류구동시 주울 열에 의한 온도상승으로 인한 반도체내부의 파괴와 열화 현상이 나타나기 때문에 상온연속 동작(CW)으로 LD의 특성을 조사할 수는 없다.^(6~8) 따라서 주울 열에 의한 온도상승을 배제하기 위해서는 펄스폭(duty)이 1% 미만의 펄스를 이용하여 발진실험을 행하는 것이 통례이다.⁽⁹⁾ 이러한 조건하에서 반도체 레이저인 AlGaAs/GaAs MQW-TJS-LD와 InGaAsP/InP DFB SMQW-LD의 발진파장을 측정하여 보았는데, 약 1Å 정도의 분해능을 가지도록 25 μ m의 슬릿을 사용하여 AlGaAs/GaAs MQW-TJS-LD와 InGaAsP/InP DFB SMQW-LD의 파장을 측정하여 보았다.

그리고 실험에 사용한 PD는 AlGaAs/GaAs MQW-TJS-LD의 파장이 7600Å 근처이므로 이 파장대역에서 광을 검출할 수 있는 Si-PD를 사용하였다.⁽¹⁰⁾ Si-PD는 본 연구실에서 제작한 것을 사용하였다. 그리고 InGaAsP/InP DFB SMQW-LD의 경우, 파장대역이 15400Å 근처이므로 이 파장대역에서 광을 검출할 수 있는 Ge-PD를 사용하여 측정하였다. 실험에 사용한 PD는 Ge-PD(직경 5mm ϕ)를 사용하여 측정하였

다.

그림 2.12는 AlGaAs/GaAs MQW-TJS-LD의 파장측정 실험으로서 I_{th} 가 18mA이고 $I_o=10I_{th}$ 에서 실험을 하였으며 duty factor를 1.5%로 하였다. 그림 2.12의 (a)는 그림 증폭기 출력단에 콘덴서를 사용하지 않은 경우이며, (b)는 콘덴서를 사용한 경우이다. 이 두 경우를 비교해 보면 중심파장의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 측정된 파장폭은 그림에 나타난 것처럼 약 12Å 정도로 넓으며, 동작조건이 $I_o=10I_{th}$ 와 같이 I_{th} 에 비해 아주 크며, duty가 1.5%로 1%이상일 때는 콘덴서를 이용하여 측정이 가능하였으나 duty가 0.1%미만이거나 동작전류가 I_{th} 와 거의 비슷하거나, 파장폭이 2~3Å 정도 될 경우 콘덴서만 이용하여 펄스를 직류로 바꾼다는 것은 불가능하다. 따라서 duty 0.01%미만의 광펄스신호를 DC로 바꾸는데 적절한 장치가 필요하게 된다.

이 때 광 펄스신호의 강도가 광 검출기의 최대 수신 감도 근처로 미약하다면 시간평균 광 검출에 의한 파장측정은 거의 불가능하며, 만일 샘플링스코프 같은 장치가 있다면 광펄스 순시 피이크 값에 대한 파장을 측정할 수 있으나 현재 샘플링스코프는 대단히 고가이므로 소규모 실험실에서는 갖추기 어려운 실정에 있다. 따라서 본 논문에서는 미약한 광펄스의 파장특성을 측정할 수 있도록 광 검출



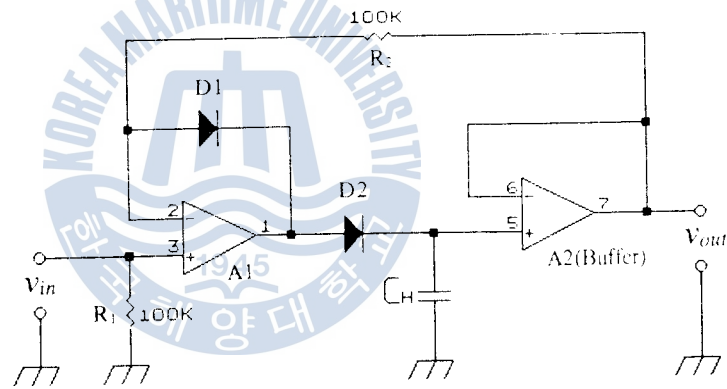
(a) without condenser

(b) with condenser

그림 2.12 AlGaAs MQW-TJS-LD 스펙트럼 측정

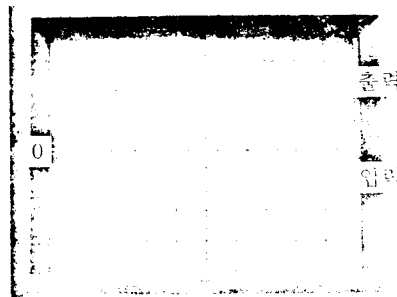
기로 부터 검출된 광펄스 신호를 펄스의 최대 값에 해당하는 직류신호로 변환시키는 이득이 1인 피이크 홀드회로를 이용하여 최대값 검출기를 사용하였다. 그림 2.13의 (a)는 최대값 검출기 회로도이며 (b)는 입출력 특성을 나타내는 원리도이다.⁽¹¹⁾ 그림 2.13 (b)에서 입력전압 V_{in} 과 Peak치와 출력과형 V_{out} 을 비교하면 알 수 있듯이, V_{in} 의 최대진폭치를 4V라고 할 때, V_{out} 의 값도 4V로 되어 있다. 이와 같은 최대값 검출기회로를 이용하여 파장폭이 짧고 동작전류가 작은 InGaAsP/InP DFB-SMQW-LD의 파장을 측정하여 그림 2.14와 같은 양호한 특성을 가지는 파장을 측정하였으며, 동작전류는 $I_0=2I_{th}$ 에서 duty 0.01%로 실험을 하였다. 그림 2.14에 측정된 InGaAsP/InP DFB SMQW-LD의 중심파장이 $1.5404\mu\text{m}$ 로 임을 알 수 있다.

이러한 결과로 볼 때 구성된 파장측정 시스템이 반도체 레이저의 파장분석을 하는데 우수한 특성을 가짐을 알 수 있다.



$R_1=R_2=100K \Omega$
 $D_1=D_2=1S1588$

(a) 최대값 검출기 회로도 $C_H=256\text{pF}$



2V/div

(b) 최대값 검출기 회로의 입·출력파형

그림 2.13 최대값 검출기의 원리

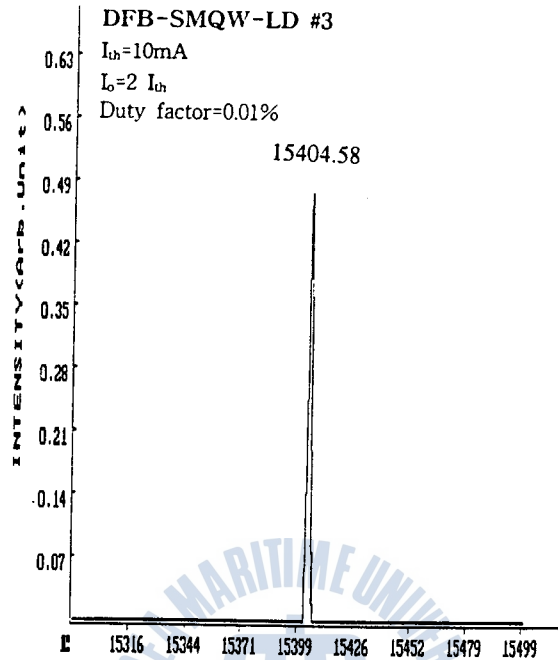


그림 2.14 $1.55\mu\text{m}$ InGaAsP/InP DFB SMQW-LD의 스펙트럼 측정

3. 결론

본 논문에서는 소 규모 실험실에서 비교적 쉽게 마련할 수 있는 컴퓨터와 분광기를 이용한 파장측정 장치를 구성하였다. ⁽¹⁾ 스트립차트 레코더에 입력되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 컴퓨터의 화면상에 나타낼 수 있도록 하였다. 화면에 나타난 데이터는 컴퓨터에 저장 가능하게 함으로써 측정데이터를 재현할 수 있으며, 컴퓨터로 구성된 파장측정시스템을 calibration할 경우 측정데이터가 디지털신호로 컴퓨터 화면상에 나타나기 때문에 정확한 calibration이 가능하였다. 이렇게 함으로써 신뢰성 있는 측정데이터를 얻을 수 있었다. 이렇게 구성된 시스템의 세부 구조와 주변장치에 대해서 요약하면 다음과 같다.

[1] 광검출기에서 검출된 아날로그 광신호는 A/D 컨버터를 사용하여 디지털 값으로 변환하여 인터페이스부를 통하여 컴퓨터에 전달하도록 하였다.

[2] A/D 변환카드의 신호처리 및 데이터처리 시스템을 제어하는 프로그램은 C

언어로 작성되어 있으며, 측정하고자 하는 광신호는 검출기에서 검출되어 0~5V 사이의 아날로그 전압량으로 출력되는데 이것이 아날로그 입력단자에 입력되면 그 값에 비례하는 디지털 값으로 변환되어 데이터를 화면에 표시해 준다.

[3] 분광기 옆에 붙어 있는 입력 파장값을 지시해 주던 원형 스위치가 이전까지는 기계적으로 작동하였다. 이것을 Photo coupler를 TTL(74LS04)과 인터페이스⁽³⁾하여 광전자적 스위치로 대체하였다.

[4] 발광소자의 검출신호가 미약할 경우 정확한 측정을 위해서는 광신호의 증폭이 필요하였다. 따라서 OP Amp를 사용하여 약 60dB의 증폭도를 가지며 차단주파수가 DC에서 50kHz인 광수신용 증폭기를⁽⁴⁾ 자체 제작하였다.

[5] 본 논문에서는 미약한 광펄스의 파장특성을 측정할 수 있도록 광 검출기로부터 검출된 광펄스 신호를 펄스의 최대값에 해당하는 직류신호로 변환시키는 이득이 1인 최대값 검출기를⁽¹²⁾ 고안하였다.

이렇게 구성된 시스템을 이용하여 발광다이오드와 ETRI에서 제작한 반도체 레이저인 AlGaAs/GaAs MQW-TJS-LD(Multi Quantum Well Transverse Junction Stripe Laser Diode)와 InGaAsP/InP DFB SMQW-LD(Distributed Feedback Strained Multi Quantum Well Laser Diode)와 같은 반도체레이저의 스펙트럼특성 및 파장분석을 하는데 실용적으로 이용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 김경식, 김재창, 조호성, 홍창희, "짧은 펄스로 구동되는 반도체 발광소자의 파장측정에 관한 연구" 한국광학회지, 1권.2호., pp.198~203,1990.
- (2) F.A.Jenkins and H.E.White, Fundamentals of Optics, McGRAW-HILL, Singapore, pp.355-377, 1981.
- (3) 梅地 正 外 著, 全在昇 譯, 센서 인터페이싱 No.4:광센서 徹底活用篇, 機電出版社, p.50, 1987.

- (4) John. O'Malley, Basic Circuit Analysis McGRAW-HILL, New York, pp.112~117, 1990.
- (5) 末松安晴, 半導體 レ-ザと 光集積回路, オ-ム, 東京, p.294, 1982.
- (6) N.Holonyak, Jr. and S.F.Bevacqua, "Coherent(visible) light emission from Ga ($As_{1-x}P_x$) junction," Appl.Phys. Lett., vol.1, p.82, 1962.
- (7) M.H.Pilkuhn and H.Rupprecht, "Effect of temperature on the stimulated emission from GaAs p-n junction," Solid-State Electronics, vol.7,p.905, 1964.
- (8) Y.Nannichi, "Dependence of threshold current on the impurity concentrations in laser diodes," J.Appl.Phys., vol 36,p.1499, 1965.
- (9) 末松安晴, 半導體レ-ザ と 光集積回路, 東京, オ-ム, 1984.
- (10) J.Millman and A.Grabel, "Microelectronics", New York, McGraw-Hill, p.766, 1987.
- (11) 角田秀夫 著, 堀景一.勸仁鉉 共譯, 實用 OP-AMP回路, 大英社, 서울, pp.54~55, 1991.

