

송신단의 온도 의존성을 고려한  
Optical Interconnection의  
성능분석에 관한 연구

연세대학교 대학원  
전기·컴퓨터공학과  
김 유 근

송신단의 온도 의존성을 고려한  
Optical Interconnection의  
성능분석에 관한 연구


지도 최 우 영 교수


이 논문을 석사학위논문으로 제출함


1999년 6월 일

연세대학교 대학원  
전기·컴퓨터공학과  
김 유 근

김유근의 석사 학위논문을 인준함

심사위원 최우명 

심사위원 하건희 

심사위원 한상국 

연세대학교 대학원

1999년 6월 일

## 감사의 글

논문을 마감하면서 대학원 생활의 시작부터 졸업의 결실을 맺기까지 부족한 저를 항상 격려해 주시고 아껴주신 주위의 여러분들께 진심으로 감사드립니다. 우선, 너무나 부족한 저에게 학문의 길을 가르쳐 주시고 각별한 관심과 자상하신 배려로 지도해 주신 최우영 교수님의 깊은 은혜에 감사를 드립니다. 또한, 본 논문을 심사해 주시고 부족한 점을 자상하게 지도해 주신 한상국 교수님과 한건희 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고 학부와 대학원 과정 동안 많은 가르침을 주신 김봉열 교수님, 박규태 교수님, 차일환 교수님, 이상배 교수님, 강창언 교수님, 이문기 교수님, 박민용 교수님, 윤대회 교수님, 김재희 교수님, 이용석 교수님, 이재용 교수님, 김재석 교수님, 홍대식 교수님, 송홍엽 교수님, 이철희 교수님, 강문기 교수님, 이충용 교수님께 깊이 감사드립니다.

연구실 최고참이신 정태형과 연구실 생활내내 맏형으로서 항상 듬직하고 친형 같은 태식이형, 순수하고 이해심 많은 경환이형, 항상 지켜봐주고 돌보아 주신 승우형, 자기일 처럼 음으로 양으로 도와준 용상이, 항상 통통하는 성훈이형, 재미있는 영광이형, 웃음소리가 큰 명수, 산사나이 형꾼이, 멋쟁이 혁기형, 취미가 다양한 재욱이형, 항상 밝고 명랑한 창순이에게 고마운 마음을 전합니다. 연구실 생활을 항상 즐겁게 할 수 있는 것도 여러분 덕분입니다. 또한 동열이형, 상준이형, 태영이형, 상국이형, 우경이형, 상경이형, 종환이형, 근일이, 문경이를 비롯한 CADII의 여러분들과 성주형, 장희형, 상윤이등의 CADI 여러분들께도 고마운 마음을 전합니다.

또한 졸업하고 자주 못 만나지만 즐거운 시간을 같이 했던 준경이, 동재형, 대현이에게도 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

누구보다도 항상 믿고 격려해주시고 힘을 주시는 부모님께 진심으로 감사드리며, 항상 동생의 장래를 염려해 주시고 격려해 주시는 형님께 진심으로 감사드립니다.

**일천구백구십구년 육월**

**김유근**

# 차 례

그림 차례 .....	iii
표 차례 .....	iv
국문 요약 .....	1
제 1 장 서 론 .....	2
제 2 장 LD 모델과 중요 파라미터의 온도의존성 .....	5
제 2-1 절 LD의 회로모델 .....	5
제 2-1-1 절 레이저 다이오드의 구조 .....	5
제 2-1-2 절 레이저 다이오드의 비율 방정식과 회로 구성 .....	7
제 2-2 절 LD의 등가회로모델 .....	8
제 2-3 절 Gain model .....	13
제 2-3-1 절 2-band gain model .....	13
제 2-4 절 LD 등가회로모델의 온도 특성에 영향을 주는 그 밖의 파라미터 .....	19
제 3 장 송신단과 수신단 .....	21
제 3-1 절 송신단의 일반적인 구조 .....	21
제 3-1-1 절 Simulation에 사용된 송신단의 구조 .....	24
제 3-2 절 PD .....	26
제 3-2-1 절 PD의 구조 .....	26
제 3-2-2 절 PD의 등가회로 모델 .....	30
제 3-2-3 절 SPICE를 이용한 PD 등가회로 모델의 시뮬레이션 .....	31
제 3-3 절 수신단 .....	34
제 3-3-1 절 수신단의 일반적인 구조 .....	34
제 3-3-2 절 Simulation에 사용한 수신단 회로 .....	35

제 4 장 결과 및 고찰 .....	39
제 4-1 절 시뮬레이션 방법 .....	39
제 4-2 절 온도변화에 따른 LD 특성 .....	40
제 4-2-1 절 온도변화에 따른 LD의 DC특성 .....	40
제 4-2-2 절 온도변화에 따른 LD의 주파수 응답 특성 .....	42
제 4-2-3 절 온도변화에 따른 LD의 펄스 입력에 대한 응답 특성 .....	44
제 4-3 절 온도변화에 따른 LD 구동회로의 출력 .....	46
제 4-4 절 온도변화에 따른 송신단의 전력소모와 BER .....	49
제 4-4-1 절 온도 변화에 따른 수신단 출력 .....	49
제 4-4-2 절 온도 변화에 따른 송신단의 전력소모와 BER .....	52
제 5 장 결  론 .....	55
참고 문헌 .....	57
영문 요약 .....	60

# 그림 차례

그림 2-1. 단일 양자 우물 레이저 다이오드의 구조 .....	6
그림 2-2. 비율 방정식의 단순한 변형의 예 .....	12
그림 2-3. LD의 등가회로 모델 .....	12
그림 2-4. 2-band 모델의 광학적 이득과 $k \cdot p$ 모델과의 비교. ....	15
그림 2-5. 온도변화에 따른 $k \cdot p$ 모델과 2-band model 과의 비교 .....	16
그림 2-6. 온도변화에 따른 광학적 이득 .....	17
그림 2-7. 온도변화에 따른 차동이득과 투명캐리어 밀도 .....	18
그림 3-1. 광연결 시스템에서 일반적으로 사용하는 송신단 회로 구성 .....	22
그림 3-2. 온도 및 다른 기타 영향에 의한 레이저 다이오드의 L-I 특성 변화 .....	22
그림 3-3. 레이저 다이오드 L-I 특성 변화를 보상하기 위한 바이어스 전류의 변화 .....	23
그림 3-4. 레이저 다이오드의 L-I 특성 변화를 보상하기 위한 바이어스 전류와 변조 전류의 변화 .....	23
그림 3-5. Simulation에 사용된 LD 구동회로 .....	24
그림 3-6. MSM PD의 구조 .....	27
그림 3-7. 광검출기의 등가회로 모델 .....	30
그림 3-8. 광검출기의 DC 곡선의 SPICE 시뮬레이션 .....	31
그림 3-9. 광검출기의 주파수 응답 특성 .....	32
그림 3-10. 광검출기의 임펄스 응답 특성 .....	33
그림 3-11. 3R 기능을 갖는 광연결 시스템의 수신단 회로 구성 .....	34
그림 3-12. 본 논문에서 사용한 광연결 시스템의 수신단 회로 구성 .....	36
그림 3-13. 전달 임피던스 증폭기 .....	37



그림 3-14. 본 논문에서 사용한 전달 임피던스 증폭기의 소신호 등가회로모델 .....	37
그림 4-1. 온도 변화에 따른 DC 특성 .....	41
그림 4-2. 온도 변화에 따른 LD의 주파수 응답 특성 .....	43
그림 4-3. 20℃와 80℃에서의 LD의 광출력 .....	45
그림 4-4. 온도 변화에 따른 modulation current의 변화 .....	47
그림 4-5. 구동회로만의 온도 의존성에 의한 광출력의 변화 .....	48
그림 4-6. 송신단의 온도 의존성이 고려된 LD의 광출력 .....	50
그림 4-7. 20℃와 80℃에서의 수신단의 출력 전압 .....	51
그림 4-8. 오류가 없는 동작을 위한 유효 신호의 설명 .....	53
그림 4-9. 온도변화에 따른 송신단의 전력 소모와 BER과의 관계 .....	54

## 표 차례

표 2-1. 시뮬레이션에 이용한 LD 파라미터 .....	20
---------------------------------	----

## 국문 요약

# 송신단의 온도 의존성을 고려한 Optical Interconnection의 성능분석에 관한 연구

본 논문에서는 기존에 발표된 레이저 다이오드의 회로모델에 온도 의존효과를 첨가하여 온도변화( $0^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ )에 따른 송신단의 전력소모와 BER(bit-error-rate)과의 관계를 고려한 시스템 성능 분석을 수행하였다. 송신단의 광원인 레이저 다이오드(LD)와 구동회로의 온도에 따른 특성변화는 시스템 성능에 큰 영향을 미친다. 먼저 레이저 다이오드의 온도 의존 효과를 표현하기 위해서, 온도에 의존하는 주요 파라미터를 찾아 각각에 대해 온도 의존효과를 나타내었다. 이들 온도에 의존하는 파라미터 중 가장 중요한 것은 광학적 이득이라 할 수 있다. 온도변화에 따른 광학적 이득의 계산을 회로모델에 적용하기 위해서 복잡한 수치 해석적 접근보다는 비교적 간단하고 적용하기 쉬운 2-band 모델을 적용하였다. 이로 인한 오차를 줄이기 위하여  $k \cdot p$  모델을 이용하여 fitting하였다. 구동회로에서는 SPICE에서 회로 동작 온도를  $0^{\circ}\text{C}$ 부터  $80^{\circ}\text{C}$ 까지 바꾸어가며 시뮬레이션을 수행하였다. 수신단은 MSM 구조의 PD 회로 모델과 전달 임피던스 증폭기만을 고려한 이상적인 회로모델로 구성되어 있다.

본 논문의 결과를 이용하여 원하는 BER을 얻기 위해 온도 보정 회로의 필요유무를 판단할 수 있고, 온도 변화에 따른 안정적인 시스템을 위한 적절한 송신단의 전력을 예상할 수 있을 것으로 기대된다.

---

핵심되는 말 : 레이저 다이오드, 등가회로 모델, 광학적 이득, 온도 의존성

# 제 1 장 서 론

멀티미디어 산업이 발전하면서 고속/대용량의 데이터 전송 기술의 중요성이 점차 심화되어 가고 있다. 또한, 다양한 서비스의 필요성으로 인해 종래의 전화 위주의 공중 통신 서비스에서 광대역 통신 서비스로의 진화가 요구되고 있다. 이러한 요구 사항에 걸맞게 광대역 통신 서비스를 위한 집중적인 연구개발이 급속도로 진행 중이다. 특히, 대용량의 데이터를 고속으로 전달할 필요성이 있는 ATM 교환기, Gigabit Ethernet, 병렬 처리 프로세서의 데이터 전송부등은 구성 요소들을 전자 소자뿐만 아니라 광소자를 사용하여 전기소자만으로 구성된 연결 시스템의 문제점인 데이터 병목현상을 해결할 수 있다. 즉, 이러한 데이터 전송의 병목현상을 제거하는데 유용한 기술이 바로 광소자를 이용하여 데이터를 전송하는 광연결(optical interconnection) 시스템이다. 광연결 시스템은 수 km 이상 되는 장거리 광통신 시스템과는 달리 전송선의 길이가 짧다. 광연결 시스템은 high bandwidth와 crosstalk이 적고, 전력 소비를 줄일 수 있기 때문에 최근 board-to-board, chip-to-chip, on-chip까지 다양한 응용이 연구 개발되고 있다. 최근 들어서는 MESFET 공정에 비해 저전력과 비용절감의 장점이 있는 CMOS 공정 기술을 사용함으로써 채널 당 수백 Mb/s에서 1Gb/s가 넘는 영역의 성능을 나타내고 있다.

현재까지의 광연결 시스템에 관한 연구는 시스템과 시스템 사이 또는 보드와 보드 사이의 데이터 전송에 필요한 수준에서 활발히 진행되어 왔다. 그리고, 이를 구성하는데 가장 중요한 초점은 패키징 기술과 광전자 회로의 집적화에 맞추어져 왔다. 광소자와 회로의 구성을 각각을 최적화하여 설계 또는 제작하는 경우 여러 기생 효과에 의한 성능의 저하를 가져올 수 있다. 그러므로, 광소자와 회로의 집적화는 성능 향상에 중요하고, 이를 전체적으로 모델링하여 최적의 성능을 갖도록 설계하는 것이 필요하다. 광소자의 회로 모델링에 관한 연구는

그 필요성의 증가로 인해 최근까지도 계속 논문이 발표되고 있다.

본 논문에서는 효율적인 광전자 집적회로의 설계를 위하여, SPICE에서 사용하는 MOS 소자에 대한 모델처럼 광소자를 SPICE로 모델링된 회로를 이용하여 송신단의 온도의존성을 고려한 광연결(optical interconnection) 시스템의 성능분석을 수행하였다. 이렇게 광소자를 SPICE로 모델링함으로써 CAD tool로 이용할 수 있는 것이다. 이러한 CAD를 이용하여 설계할 경우 제작에 들어가기 전에 광전자 회로의 성능을 예상하여 최적화할 수 있고, 시스템과 그 구성 요소들의 여러 가지 파라미터들도 최적화하는 것이 가능하다. 송신단은 레이저 다이오드(LD)와 LD 구동회로로 구성되어 있다. LD는 온도변화에 큰 영향을 받고 시스템 성능을 크게 좌우한다. 따라서 LD에 온도 의존효과를 첨가하여 원하는 BER과 송신단의 전력소모와 온도와의 관계를 시뮬레이션을 통해 알아내어 온도보정회로 필요 유무의 판단을 내릴 수 있고 온도변화에도 안정적인 시스템 동작을 위한 송신단의 전력소모를 예상할 수 있는 것이다. LD에 온도 의존 효과를 표현하기 위해서, 온도에 의존하는 주요 파라미터를 찾아 각각에 대해 온도 의존효과를 나타내었다. 이들 온도에 의존하는 파라미터 중 가장 중요한 것은 광학적 이득이라 할 수 있다. 온도변화에 따른 광학적 이득의 계산을 회로모델에 적용하기 위해서 복잡한 수치 해석적 접근보다는 비교적 간단하고 적용하기 쉬운 2-band 모델을 적용하였다. 이로 인한 오차를 줄이기 위하여  $k \cdot p$  모델을 이용하여 fitting하였다. 구동회로는 SPICE에서 회로 동작 온도를 0°C부터 80°C까지 바꾸어가며 시뮬레이션을 수행하였다

본 논문의 2장에서는 단일양자우물 LD의 회로 모델과 구조에 관하여 설명하고, 온도변화에 따른 중요한 파라미터(광학적 이득, 투명 캐리어 밀도, 광가둠 계수, 차동양자효율, transport time, thermionic emission time)에 대해서 언급하였다. 여기서 온도변화에 따른 광학적 이득과 투명 캐리어 밀도는  $k \cdot p$ 를 이용하여 fitting한 2-band 모델의 계산에 의해 구해졌고, 온도변화에 따른 transport time과 thermionic emission time은 [25]의 계산식을 이용하여 구하였

다. 그리고 온도변화에 따른 광가둠계수와 차동양자효율은 각각[26]와 [22]의 실험 논문을 이용하였다. 또한 LD의 온도 특성에 가장 영향을 크게 미치는 광학적 이득의 온도변화에 따른 결과를 보이고, 이를  $k \cdot p$ 모델과 비교하였다. 3장에서는 LD 구동회로에 관해서 회로와 함께 동작 원리를 설명하고, PD의 등가회로 모델과 시뮬레이션 결과를 보였다. 수신단은 MSM 구조의 PD 회로모델과 전달 임피던스 증폭기만을 고려한 이상적인 회로모델로 구성하였다. 4장에서는 2장에서 제시한 온도의존효과를 추가한 LD의 회로모델과 3장에서의 구동회로와 수신단부를 연결하여 BER계산을 수행하였다. 5장에서는 논문의 결과를 정리하고 앞으로의 연구과제를 제시하였다.

# 제 2 장 LD 모델과 중요 파라미터의 온도의존성

## 제 2-1 절 LD의 회로모델

### 제 2-1-1 절 레이저 다이오드의 구조

본 연구에서 모델링한 레이저 다이오드의 구조는 그림 2-1과 같이 InGaAs/GaAs SCH SQW(Single Quantum Well) 레이저 다이오드이고 lasing wavelength는 980nm이다. 레이저 다이오드의 양끝에는 n형과 p형으로 각각 도핑(doping)된 클래딩(cladding)영역이 있고, 광가둠 계수(optical confinement factor)를 높이기 위하여 SCH 영역을 두었고, 가운데에는 양자 우물과 전위 장벽 층으로 구성된 활성층(active layer)이 존재한다. 이 구조는 1500 Å의 길이를 갖는 대칭 SCH층을 가지고 있으며, 활성층은 길이가 80 Å인  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  양자 우물로 이루어졌다. 계산에 사용된 cavity의 길이는 300  $\mu\text{m}$ 이다. 이 특정 구조는 구체적인 모델링 결과를 얻기 위해 사용된 것으로 본 연구에 사용된 모델링 방법은 레이저 다이오드의 구조에 무관하게 적용할 수 있다.

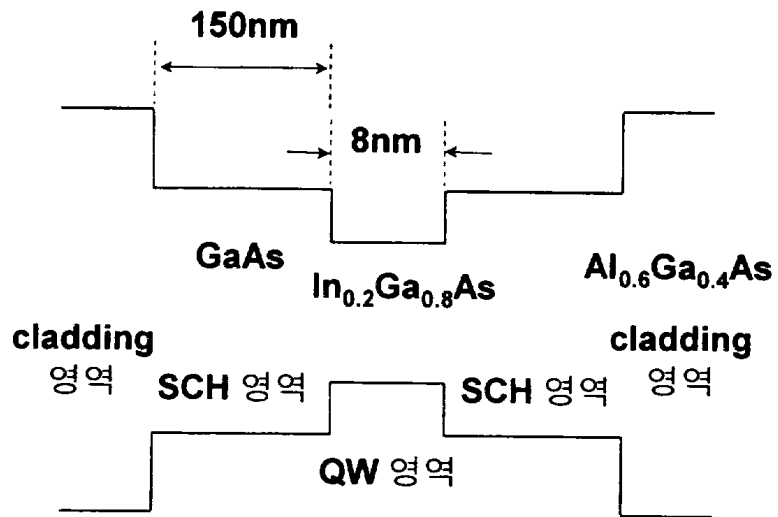


그림2-1. 단일 양자 우물 레이저 다이오드의 구조

## 제 2-1-2 절 레이저 다이오드의 비율 방정식과 회로 구성

양자 우물 레이저 다이오드에서 주입된 전자와 정공은 클래딩(cladding) 층에서 다음의 두 가지 과정을 통해 양자 우물에 도달하게 된다. 첫 번째 과정은 확산(diffusion)과 레이저 다이오드의 양단에 걸리는 전계로 인한 표동(drift)에 의해 SCH 영역을 통과하는 것이다. 대부분의 주입된 캐리어들은 SCH 영역을 통과하지만 일부는 SCH 영역에서 radiative 또는 nonradiative 형태로 재결합한다. 두 번째 과정은 양자 우물에 의해 캐리어가 포획되는 것이다. SCH 영역을 통과한 캐리어는 양자 우물에 포획되며 thermal emission 또는 터널링(tunneling)에 의해 인접 우물 또는 반대편의 SCH 영역으로 전달되거나 radiative 또는 nonradiative 재결합하게 된다. 즉, 이러한 과정을 거쳐 캐리어의 대부분이 빛으로 바뀌나 이 중 일부는 열적 여기에 의해 양자 우물 밖으로 빠져 나간다. 레이저 다이오드에서 나오는 빛이 단일 모드(single mode)라고 할 때 광자와 캐리어의 다이내믹스(dynamics)를 나타내는 비율 방정식은 다음과 같다.[6]

$$\frac{dN_{SCH}}{dt} = \frac{I}{qV_{SCH}} - \frac{N_{SCH}}{\tau_r} - \frac{N_{SCH}}{\tau_{nb}} + \frac{N_w(V_w/V_{SCH})}{\tau_e} \quad (2-1)$$

$$\frac{dN_w}{dt} = \frac{N_{SCH}(V_{SCH}/V_w)}{\tau_r} - \frac{N_w}{\tau_n} - \frac{N_w}{\tau_{nr}} - \frac{N_w}{\tau_e} - \frac{G(N_w, S) \cdot S}{1 + \epsilon S} \quad (2-2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma G(N_w, S) \cdot S}{1 + \epsilon S} - \frac{S}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{N_w}{\tau_n} \quad (2-3)$$

위의 식에서 I는 주입된 전류,  $N_w$ 와  $N_{SCH}$ 는 우물과 SCH 영역에서의 캐리어 밀



도이다. 그리고,  $V_w$ 와  $V_{SCH}$ 는 각각 우물과 SCH 영역의 체적이고,  $\tau_n$ 과  $\tau_{nr}$ 은 각각 우물에서의 radiative 캐리어 재결합 시간, nonradiative 재결합 시간을 나타낸다. 또한,  $\tau_{nb}$ 는 SCH 층에서의 총 재결합 시간을 의미하며,  $\tau_p$ ,  $\tau_r$ 과  $\tau_e$ 는 각각 광자의 수명 시간(lifetime), 캐리어가 SCH 영역을 통과하여 우물에 포획되는 시간, 그리고 캐리어가 열적 여기에 의해 우물 밖으로 빠져 나오는데 걸리는 시간이다. 마지막으로  $\epsilon$ 은 이득 억압 계수(gain compression factor),  $\Gamma$ 는 광 가둠 계수(optical confinement factor),  $\beta$ 는 spontaneous emission factor, 그리고  $G(N_w, S)$ 는 레이저 다이오드의 이득이다.

## 제 2-2 절 LD의 등가회로모델

위의 비율 방정식은 캐리어와 광자의 밀도는 전압과 전류에 관한 절점(node) 방정식으로 변형될 수 있다. 먼저, 식 (2-1)에서 양변에  $qV_{SCH}$ 를 곱하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\tau_r \frac{d(qV_{SCH}N_{SCH})}{\tau_r dt} = I - \frac{qV_{SCH}N_{SCH}}{\tau_r} - \frac{\tau_r}{\tau_{nb}} \cdot \frac{qV_{SCH}N_{SCH}}{\tau_r} + \frac{\tau_n}{\tau_e} \cdot \frac{qN_wV_w}{\tau_n} \quad (2-4)$$

여기서 위 식의 ' $qV_{SCH}N_{SCH}/\tau_r$ '항을  $I_{SCH}$ 로 변환하고, ' $qV_wN_w/\tau_n$ '항을  $I_w$ 로 바꾼 후 I에 관해 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$I = \tau_r \frac{dI_{SCH}}{dt} + \left(1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nb}}\right) \cdot I_{SCH} - \frac{\tau_n}{\tau_e} \cdot I_w \quad (2-5)$$

그리고, 식 (2-2)에 대해서도 앞에서 수행한 과정과 유사하게 양변에  $qV_w$ 를 곱하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$I_{SCH} - \frac{\tau_n}{\tau_e} \cdot I_w = \tau_n \frac{dI_w}{dt} + I_w \cdot \left(1 + \frac{\tau_n}{\tau_{nr}}\right) + \frac{qV_w G(N_w, S) \cdot S}{1 + \epsilon S} \quad (2-6)$$

위의 식 (2-5)와 (2-6)에서  $I_{SCH}$ 는 전류의 단위를 가진다. 그러나, 이것은 변형된 식 (2-5)에서 식 (2-6)으로 값을 전달하는 매개 변수 역할을 한다고 볼 수

있다. 그러므로, 전류가 아닌 절점 전압으로 생각하여 위의 식을 해석하면 편리하게 회로를 구성할 수 있다. 예를 들면, 식 (2-5)는 절점  $I_{SCH}$ 를 중심으로 전류  $I$ 와 전류원 ' $\tau_n \cdot I_w / \tau_e$ '가 흘러들어가고, 전압  $I_{SCH}$ 가 걸린 상태에서  $\tau_r$ 의 값을 갖는 콘덴서와  $\left(1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nb}}\right)^{-1}$ 의 저항을 통해 전류가 흘러 나가는 절점 방정식으로 볼 수 있다. 이를 회로적으로 구성하면 그림 2-1과 같이 구성할 수 있다. 마지막으로 식 (2-3)에 대해서도 양변에  $qV_w$ 를 곱하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{qV_w G(N_w, S) \cdot S}{1 + \epsilon S} + \beta I_w = \frac{qV_w}{\Gamma} \cdot \frac{dS}{dt} + \frac{qV_w}{\Gamma} \cdot \frac{S}{\tau_p} \quad (2-7)$$

위의 식에서 이득에 관한 항을  $I_{gain}$ 이라 정의하고, 이의 분모를 Taylor 급수 전개한다. 그리고, LD의 양자 우물로 들어오는 캐리어와 광출력의 관계를 구하면 LD의 이득곡선을 선형적으로 다음의 식 (2-8)과 같이 근사화할 수 있다.

$$I_{gain} = \frac{qV_w G(N_w, S) \cdot S}{1 + \epsilon \cdot S} \approx qV_w \cdot g_o(N_w - N_o)(1 - \epsilon S) \cdot S \quad (2-8)$$

여기서  $g_o$ 는 차동이득(differential gain)이고  $N_o$ 는 LD의 transparency일때 양자 우물의 캐리어 밀도이다. 또한, 광출력( $P$ )을 얻기 위해 광자 밀도( $S$ )를 아래의 식 (2-9)를 이용하여 변환할 수 있다.

$$S = \frac{\Gamma \tau_p \lambda_0}{V_w \eta h c} \cdot P_f = \vartheta \cdot P_f \quad (2-9)$$

여기서  $h$ 는 플랑크 상수이고,  $c$ 는 빛의 속도이다.

그러나, 위의 모델은 광출력과 캐리어 밀도가 음의 값도 나오기 때문에 다음과 같은 보정이 필요하다.

$$P_f = (m + \delta)^2 \quad (2-10)$$

$$N_w = N_e \cdot \exp\left(\frac{V_j}{nV_T}\right) \quad (2-11)$$

식 (2-10)에서  $m$ 은 등가회로 모델 상에서 광출력을 얻기 위한 등가 전압의 의

미를 지니고 있으며, 출력인 S와는 식 (2-9)에서  $S = \vartheta(m + \delta)^2$ 의 관계로 표현할 수 있다. 그리고,  $\delta$ 는 비율 방정식에 대입했을 때 분모가 영이 되는 것을 막아주도록 수치해석적 이유로 사용되는 매우 작은 값(약  $1 \times 10^{-10}$ )으로서 실제 계산 결과에는 아무런 영향을 미치지 않는다.

식 (2-11)은 정상 상태의 양자 우물에서의 캐리어 밀도가 항상 양수이어야 하므로, 이를 위해 캐리어 밀도에 관한 전형적인 지수 함수를 사용한 것이다. 여기서  $V_j$ 는 LD 양단의 인가 전압,  $N_e$ 는  $V_j$ 가 영일 때 캐리어의 농도,  $n$ 은 이상계수(ideality factor), 그리고  $V_T$ 는 열전압(thermal voltage)이다. 결국, 식 (2-10), (2-11)을 식 (2-5), (2-6), (2-7)에서 구한 비율 방정식에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$I = \tau_r \frac{dI_{SCH}}{dt} + \left(1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nb}}\right) \cdot I_{SCH} - I_{FB} \quad (2-14)$$

$$I_{SCH} - I_{FB} = I_{D1} + I_{D2} + I_{C1} + I_{C2} \quad (2-15)$$

$$2\tau_p \frac{dm}{dt} + m = I_1 + I_2 \quad (2-16)$$

위 식에서  $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$ ,  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ 는 다음과 같다.

$$I_{D1} = qV_W N_e \cdot \left(\frac{1}{2\tau_n} + \frac{1}{\tau_{nr}}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{V_j}{nV_T}\right) - 1\right] \quad (2-17)$$

$$I_{D2} = \frac{qV_W N_e}{2\tau_n} \left[\exp\left(\frac{V_j}{nV_T}\right) - 1 + \frac{2\tau_n}{nV_T} \exp\left(\frac{V_j}{nV_T}\right) \frac{dV_j}{dt}\right] \quad (2-18)$$

$$I_{C1} = (2g_0 \tau_n I_{D1} - qV_W g_0 (N_0 - N_e)) \times (1 - \varepsilon \partial P_f) \partial P_f \quad (2-19)$$

$$I_{C2} = qV_W N_e \cdot \left(\frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_{nr}}\right) \quad (2-20)$$

$$I_1 = \left[\frac{2\Gamma g_0 \tau_p \tau_n}{qV_W} I_{D1} - \Gamma g_0 \tau_p (N_0 - N_e)\right] \times (1 - \varepsilon \partial P_f) (m + \delta) \quad (2-21)$$

$$I_2 = \frac{1}{m + \delta} \left[\frac{2\Gamma \beta \tau_p}{q \partial V_W} I_{D1} + \frac{\Gamma \beta \tau_p N_e}{\partial \tau_n}\right] - \delta \quad (2-22)$$

등가회로 모델은 위의 비율 방정식을 이용하여 그림 2-1에서 제시한 방법과 유사하게 구성할 수 있다. 그런데, 식 (2-17)은 다이오드의 양단에 걸린 전압과 흐르는 전류에 관한 관계식이므로 이를 전압에 의해 제어되는 전류원 대신 다이오드로 바꿀 수 있다. 식 (2-18)도 다이오드의 전압과 전류에 관한 식인데, HSPICE에서 사용하는 다이오드의 transit time(TT) 모델을 적용할 수 있다. 이는 다이오드의 등가모델중 주입된 소수 캐리어에 의해 일어나는 확산 캐패시턴스(diffusion capacitance)를 모델링한 것이다.

최종적으로 구한 LD의 등가회로 모델Ⅱ은 그림 2-2와 같이 나타낼 수 있다. 다이오드  $D_1$ ,  $D_2$ 에 흐르는 전류인  $I_{D1}$ 과  $I_{D2}$ 는 식 (2-17), (2-18)과 같고,  $I_{D1}$ 에 의해 제어되는 종속 전류원  $I_1$ 과  $I_2$ 는 각각 식 (2-21), (2-22)과 같다.

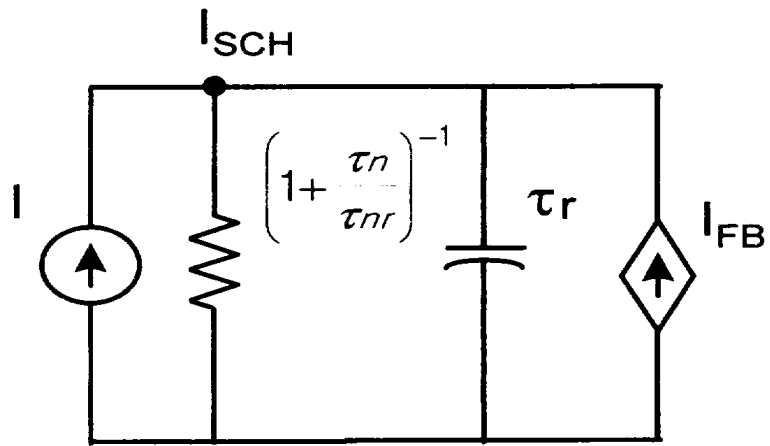


그림 2-2. 비율 방정식의 단순한 변형의 예

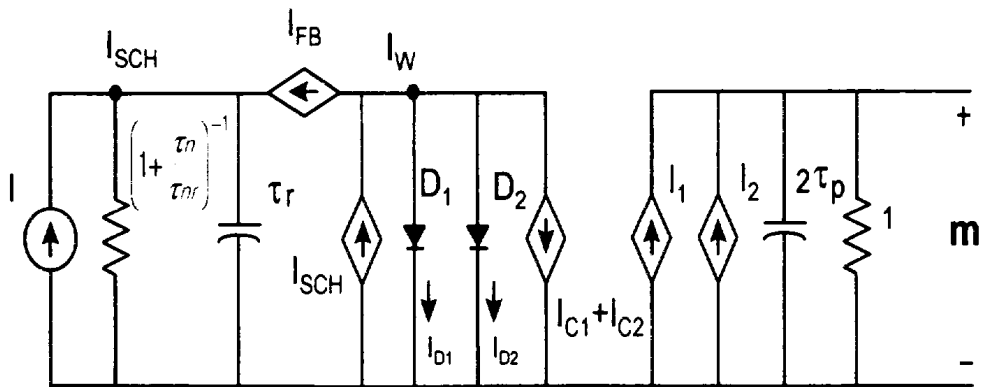


그림 2-3 LD의 등가회로 모델

## 제 2-3 절 Gain model

온도변화에 따라 LD의 DC특성과 AC특성은 큰 영향을 받는다. LD가 동작할 수 있는 온도범위를 알아야 시스템의 안정적인 동작을 위한 송신단의 전력을 예상할 수 있는 것이다. 따라서 앞에서 설명한 LD의 등가회로모델에 온도 의존효과를 첨가해야만 LD와 LD구동회로로 구성된 송신단의 온도변화에 따른 전력과 BER을 예상할 수 있다. GaAs를 기본으로 하는 물질을 구성할 경우 단파장(0.8 - 0.9 $\mu\text{m}$ ) 영역에서 주로 사용하는 반면, InP를 기본으로 하는 물질은 장파장(1.3 - 1.6 $\mu\text{m}$ ) 영역의 광연결 시스템에서 주로 사용한다. GaAs 구조의 LD는 InP 구조의 LD보다 온도변화에 비교적 덜 민감하다. 이는 GaAs의 band-gap이 InP의 그것보다 크기 때문이다. 본 논문은 0.98 $\mu\text{m}$  대의 단파장 영역에서 응용할 수 있는 LD를 모델링하였다. LD의 온도의존 효과를 첨가하기 위해서 온도에 의존하는 주요 파라미터를 찾아 각각에 대해서 온도에 의존하도록 표현했다. 이 절에서는 온도에 의존하는 파라미터중 LD의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 광학적 이득에 대해서 설명한다.

### 제 2-3-1 절 2-band gain model

온도변화를 고려한 양자우물 구조의 이득특성 모델을 SPICE 모델에 적용하기 위해서 복잡한 수치해석적 접근보다는 비교적 간단하고 적용하기 쉬운 2-band 모델을 적용하였다. 이 모델에서 사용한 이득계수는 온도와 캐리어 밀도에 대한 영향을 k-selection rule 을 포함하여 다음의 식 (2-23)과 같은 해석적 방법을 사용하였다 [13].

$$g_m = \frac{q^2 \left[ \frac{(m_e m_h)}{(m_e + m_h)} m_0 \right] [C m_0 E_{ph}(\lambda)] [f_c(E_c, E_{fc}) - f_v(E_v, E_{fv})]}{[\epsilon_0 (m_0^2 c n h E_g L)]} \quad (2-23)$$

식 (2-23)에서,  $f_c$  와  $f_v$  는 각각 전도대와 가전자대역에서의 Fermi 분포함수이고,  $m_0$ 는 전자의 질량이고,  $m_e$  와  $m_h$  는 전자와 홀의 유효질량이다.  $E_{ph}(\lambda)$ 는 전자의 천이 에너지이고, C는 transition matrix element에 해당되는 값으로서 본 연구에서는  $k \cdot p$  모델로부터 얻은 결과와 일치시키기 위한 fitting parameter로 사용되었다. L은 양자우물의 폭이고, n은 유효굴절률이다. 그림 2-3은 식 (2-23)을 이용하여 얻은 광학적 이득 특성과 캐리어 밀도와의 관계를 나타낸 것이다.

그림 2-3에서 점선은 식 (2-23)으로부터 얻은 결과이고, 실선은  $k \cdot p$  모델로부터 얻은 결과이다. 이때의 식 (2-23)에서의 transition matrix element인 C 값은 19이다. 그림에서 볼 수 있듯이 결과가 일치함을 알 수 있다.

그림 2-4는 온도변화에 따른 광학적 이득 특성을 캐리어 밀도의 함수로 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 온도가 증가함에 따라 이득계수의 크기는 감소함을 알 수 있다. 이는 일반적으로 잘 알려진 온도변화에 따른 이득계수 변화특성과 일치하며  $k \cdot p$  모델로부터 얻은 결과와도 동일한 경향을 보인다. 투명 캐리어 밀도는 광학적 이득이 0일 때의 캐리어 밀도이므로 온도가 증가할수록 투명 캐리어 밀도는 증가하게 된다. 그림 2-5는 온도변화에 따른 analytical model(2-band gain model)의 광학적 이득이다. 온도에 따른 이득 특성의 변화는 그림 2-3의 이득 특성 곡선을  $g_m = g_0(N - N_0)$ 로 선형화하여 각각의 온도에 따른  $g_0$ (차동이득)와  $N_0$ (투명캐리어 밀도)를 통해서 앞 절에서 설명한 LD등가회로 모델에 적용될 수 있다. 그림 2-6은 온도에 따른  $g_0$ 와  $N_0$ 의 변화이다. 온도가 증가함에 따라  $g_0$ 는 감소함을 알 수 있다. 투명캐리어 밀도는

gain이 0일 때의 캐리어 밀도이므로, 그림 2-5에서 알 수 있듯이 gain이 온도가 증가함에 따라 감소하므로 투명 캐리어 밀도( $N_0$ )는 온도가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다.

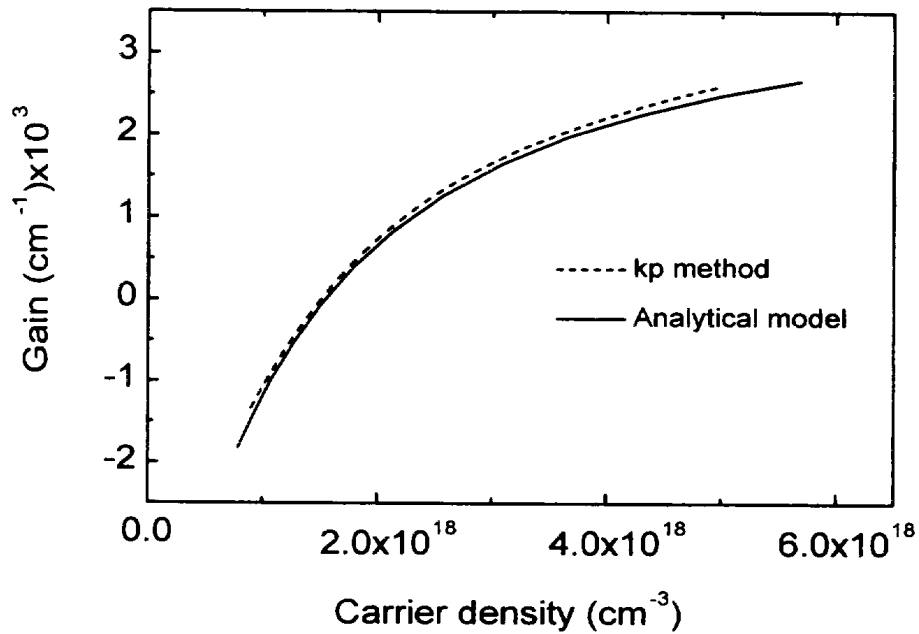


그림 2-4. 2-band 모델의 광학적 이득과  $k \cdot p$  모델과의 비교.



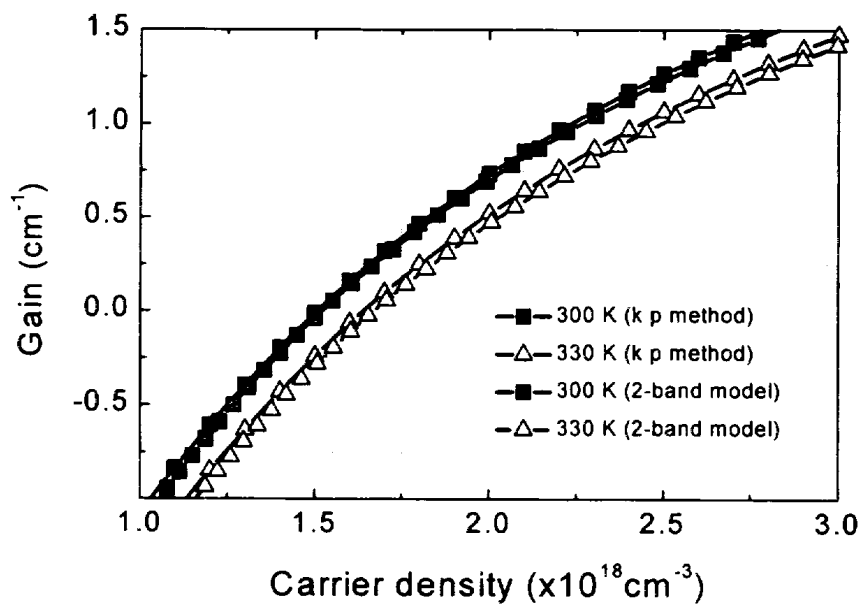


그림 2-5. 온도변화에 따른  $k \cdot p$  모델과 2-band model 과의 비교

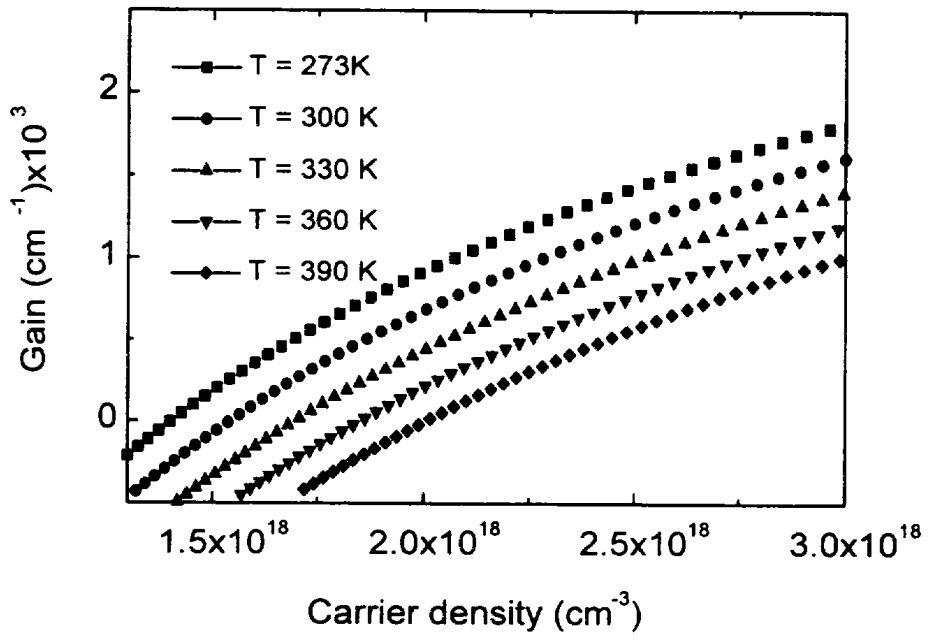


그림2-6. 온도변화에 따른 광학적 이득

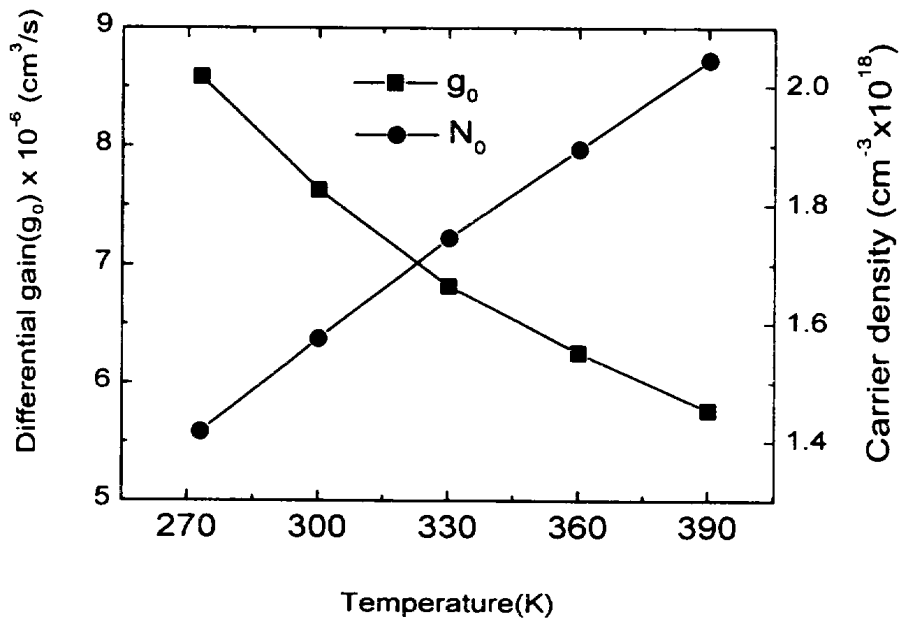


그림 2-7. 온도변화에 따른 차동이득과 투명캐리어 밀도

## 제 2-4 절 LD 등가회로모델의 온도 특성에 영향을 주는 그 밖의 파라미터

온도에 영향을 받는 파라미터가 없을 정도로 온도는 LD의 DC, AC특성에 큰 영향을 미친다. 그중 온도변화에 가장 중요한 요소인 광학적 이득과 투명캐리어 밀도는 앞 절에서 언급하였고, 이 절에서는 그 외의 파라미터에 대해서 언급한다. 먼저, 차동양자효율(differential quantum efficiency)  $\eta_d$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_d = \frac{\eta_{int} \alpha_{mir}}{\alpha_{mir} + \alpha_{int}} \quad (2-24)$$

여기서  $\eta_{int}$ 는 internal quantum efficiency 이고,  $\alpha_{mir}$  는 mirror loss,  $\alpha_{int}$ 는 internal loss이다. 온도가 증가함에 따라 internal quantum efficiency는 감소하고  $\alpha_{mir}$  와  $\alpha_{int}$  는 증가한다.  $\eta_d$ 의 온도변화에 따른 값은 계산에 의해 구하기가 어렵고 부정확하기 때문에 실험논문[22]을 이용하였다. 그리고 온도변화에 의한 광가동계수의 값은 [26]의 값을 이용하였다.

또한, LD의 AC특성에 큰 영향을 미치는  $\tau_e$ (캐리어가 열적 여기에 의해 우물 밖으로 빠져 나오는데 걸리는 시간) 와  $\tau_r$ (캐리어가 SCH 영역을 통과하여 우물에 포획되는 시간)은 다음과 같이 표현된다[25].

$$\tau_e = \left( \frac{2\pi m^* L_w^2}{kT} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{E_B}{kT}\right) \quad (2-25)$$

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left( \frac{L_s^2}{2D_p} + \frac{L_s^2}{2D_n} \right) \quad (2-26)$$

여기서  $L_w$ 는 well width,  $E_B$ 는 effective barrier hight,  $L_s$ 는 SCH길이,  $D_p$ 와  $D_n$ 은 각각 hole과 전자의 diffusion coefficient이다. 그 외에 온도변화에 상수로 쓰인 파라미터와 값은 표 2-1과 같다.

표 2-1 시뮬레이션에 이용한 LD 파라미터

파라미터	의미	값	단위
$\lambda_0$	레이징 파장	0.98	$\mu\text{m}$
$^*V_w$	양자우물의 체적	$4.8 \times 10^{12}$	$\text{cm}^3$
$^{**}\beta$	spontaneous emission factor	0.0004	-
$\tau_p$	광자의 수명시간	$2.51 \times 10^{12}$	s
$^{\dagger\dagger}\tau_n$	우물에서의 radiative 재결합 시간	$1.2 \times 10^9$	s
$^{**}N_e$	바이어스가 영일때 캐리어 농도	$5.41 \times 10^{10}$	$\text{cm}^{-3}$
$^*\varepsilon$	이득 억압 계수	$2.96 \times 10^{17}$	$\text{cm}^3$

참고:\*은 [8], \*\*은 [9], †은 [6], ††은 [10]에서 발췌함

## 제 3 장 송신단과 수신단

### 제 3-1 절 송신단의 일반적인 구조

일반적으로 광연결 시스템에서 사용하는 송신단의 회로 구성도는 그림 3-1과 같다. 레이저 다이오드를 구동하는 회로에서 가장 중요한 역할은 일정하게 안정된 전류를 공급하는 것이다. 그러나, 레이저 다이오드의 특성이 그림 3-2와 같이 온도나 기타 다른 영향에 의해 변화할 경우 이에 적합한 전류를 새로이 공급할 필요가 있다. 예를 들면, 그림 3-3과 같이 온도가 증가하여 레이저 다이오드의 문턱 전류가 증가하면 동일한 광출력을 얻기 위하여 인가하는 전류를 변화시켜야 한다. 먼저, 이를 위하여 P1과 P0에 대한 평균 광출력 파워가 동일한 값을 갖도록 유지하는 기능을 첨가한다. 이는 레이저 다이오드의 출력을 광검출기에 연결하여 여기서 얻은 전류량에 따라 바이어스 전류를 monitoring 하는 기법을 사용하고 이를 APC(Average Power Control)라고 한다.

APC의 기능만을 고려할 경우 다음과 같은 문제점이 있다. 즉, 그림 3-3과 같이 동일한 평균 광출력 파워를 얻지만, 실제의 소광비(extinction ratio)는 저하되는 현상이 일어난다. 그러므로, 바이어스 전류뿐만 아니라 변조 전류도  $I_m$ 에서  $I_m'$ 로 변화하여야 한다. 이를 위하여 새로운 제어 회로를 첨가하여야 하고, 이럴 경우 그림 3-4과 같은 결과를 얻을 수 있다.

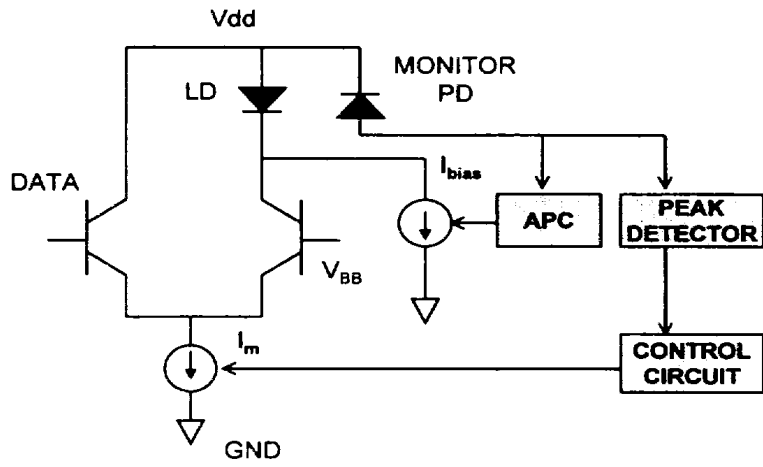


그림 3-1. 광연결 시스템에서 일반적으로 사용하는 송신단 회로 구성

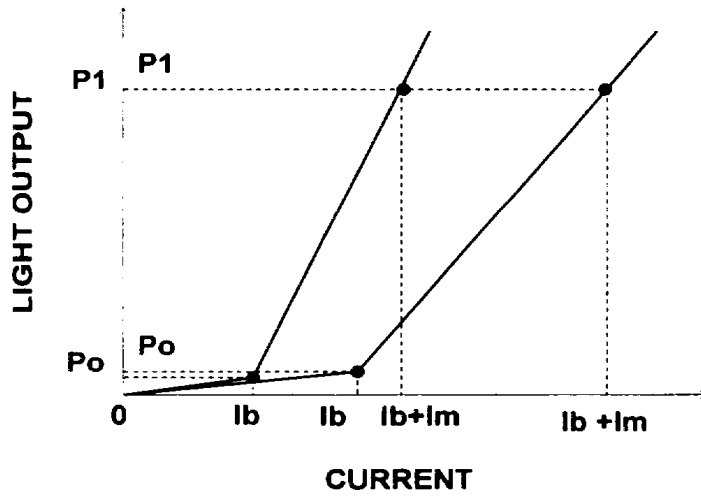


그림 3-2. 온도 및 다른 기타 영향에 의한 레이저 다이오드의 L-I 특성 변화

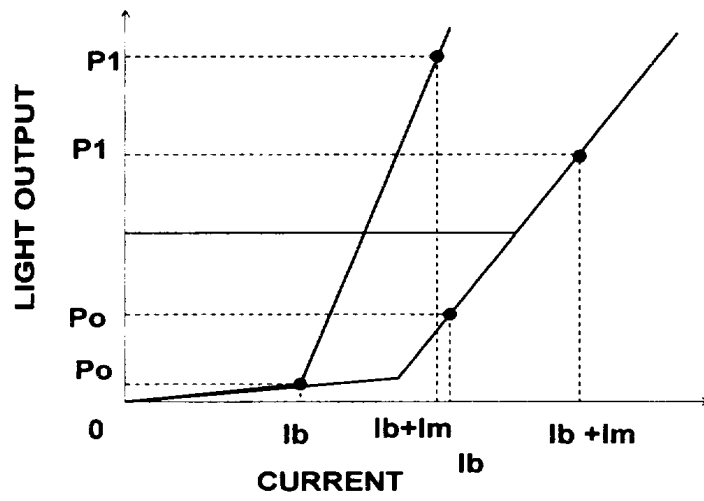


그림 3-3. 레이저 다이오드 L-I 특성 변화를 보상하기 위한 바이어스 전류의 변화

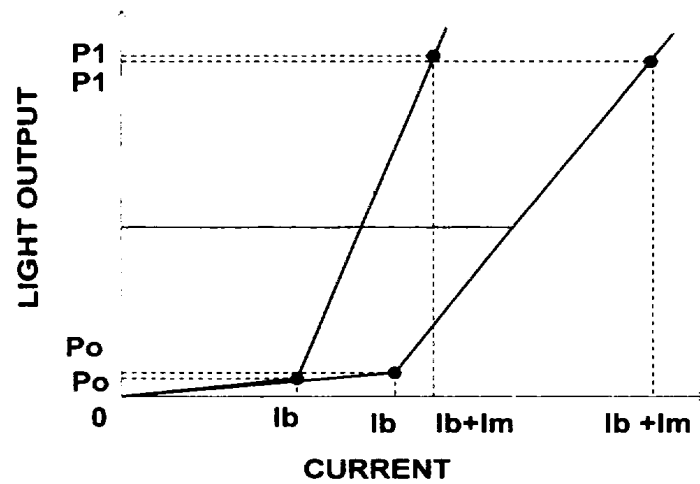


그림 3-4. 레이저 다이오드의 L-I 특성 변화를 보상하기 위한 바이어스 전류와 변조 전류의 변화





따라서 시뮬레이션에 사용한 LD 구동회로는 이러한 기능이 제외된 저전력의 특성을 갖는 것이 이용되었다[27].

위 회로는 일반적인 silicon bipolar 구동회로와 유사하다. 다른 점은 Zero-Bias modulation이 가능하다는 것이다. 위 회로의 동작 원리는 매우 간단하다. 만약 입력이 logic "1" 이면 M2는 turn-off 상태가 되고, M7는 turn-on 상태가 된다. 따라서 modulation 전류( $I_m$ )는 0이 된다. 반대로 logic "0" 이면 M2가 turn-on이 되고 M7는 turn-off 상태가 된다. 따라서 current-mirror 로 연결된 M4에 전류가 흐르게 되고, 이것이 modulation 전류가 된다. 본논문에서는 LD의 modulation 전류를  $I_m$ 이라하면,  $I_{bias}$  의 10배의 전류를  $I_t$  에 흐르게 하기 위해 M1의 크기를 M6의 10배로 하고, M4를 다시 M1의 10배의 크기로 하여 modulation 전류( $I_m$ )가  $10I_t$  가 되도록 한다. 이러한 current mirror를 이용하여 static current( $I_t$ )를 줄일 수 있다. 이러한 저전력의 장점외에, LD의 turn-on delay에 의한 randomness로 인해 timing jitter가 발생한다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 Zero-Bias modulation를 이용하지 않고, 입력 레벨을 logic "0" 일 때 1.36V, logic "1"일 때 1.54V를 가하였다. 이러한 입력 레벨에 대해서는 M7이 turn-on되지 않는 상태에서 M3와 M4의 gate전압을 제어하게 된다. 또한, 입력 레벨을 M4의 gate전압이 항상 문턱 전압보다 커지도록 설정했기 때문에 입력이 logic "1"일 때에도 LD에 일정한 바이어스 전류가 흐르게 된다. 위 그림에서 보인 LD 구동회로의 동작을 검증하기 위해 0.6 $\mu$ m CMOS 공정을 이용하여 설계한 후, SPICE 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 LD에 공급되는 전압  $V_{Laser}$ 는 3.3V를 가하였고,  $V_{DD}$ 는 5V의 전압을 가하였다.

## 제 3-2 절 PD

### 제 3-2-1 절 PD의 구조

광연결 시스템의 수신단에 사용되는 광검출기는 다양한 구조를 갖고 있는데, 다음과 같은 4가지의 구조가 대표적이다. 1) photovoltaic detectors, 2) photoconductive detectors, 3) avalanche photodetectors(APD), 그리고, 4) phototransistors 등이다. 또한, contact의 형태와 구성요소에 따라 다음과 같은 3가지의 구조로 나뉘기도 한다. 빛에 의해 생성된 캐리어를 모으는 방법에 따라서 1) vertical current collector, 예를 들면, pn 또는 Schottky 접합, 2) interdigitated metal-semiconductor-metal(MSM) 구조, 3) laterally grown or etched structure 등이 있다. PIN 접합은 일반적으로 성장과정에서 형성되고, 낮은 누설 전류(leakage current)와 높은 신뢰성(reliability)을 갖고 있다. Schottky 접합의 경우는 만들기가 쉽지만, InGaAs와 같은 낮은 에너지 장벽을 갖는 물질의 경우 누설 전류가 크다는 단점이 있다. 또한, interdigitated 구조를 가진 MSM 구조는 주어진 면적에 대해서 적은 캐패시턴스 값을 갖고, 빠른 응답시간(response time)과 field-effect transistor 기술과 호환성이 있다는 장점을 지니고 있다. 또한, 간단한 구조로 인해 제작 비용이 적다.

본 연구에서 대상으로 삼고 있는 MSM 광검출기의 구조는 그림 3-6과 같다.

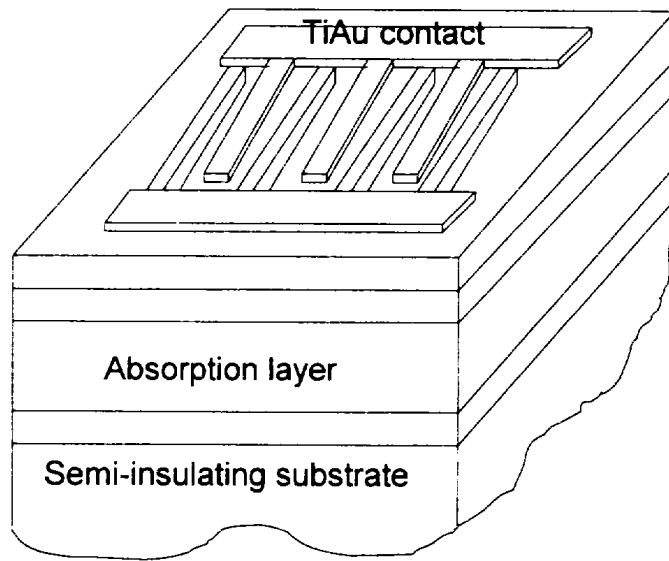


그림 3-6. MSM PD의 구조

역바이어스가 걸릴 경우 발생하는 누설 전류는 크게 열전자 방출에 의한 전류와 터널링에 의한 전류의 두 가지로 나뉜다. Schottky 열전자 방출(thermionic emission)에 의해 생성된 전류는 금속과 접촉하는 물질의 전위장벽(potential barrier)의 차이를 극복할 수 있는 충분한 에너지를 갖는 전자의 수와 비례하므로 다음과 같은 특성을 지닌다.[15]

$$I_0 \propto \exp\left[\frac{-q(\Phi - \Delta\Phi)}{kT}\right] \quad (3-1)$$

여기서,  $q$ 는 전자의 전하량이고,  $\Phi$ 는 전자에 대한 금속 fermi level에서 반도체/절연체의 전도대 level까지의 전위장벽의 높이를 의미한다. 또한,  $\Delta\Phi$ 는 Schottky effect항으로 다음과 같이 유도 된다.[16]

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon}} \quad (3-2)$$

여기서,  $E$ 는 물질 사이에 인가되는 전기장(electric field)이고,  $\epsilon$ 은 dynamic dielectric constant이다. 위의 성질을 이용하여 열전자 방출의 전류를 표현하면 다음과 같다.

$$I_{emission} \propto C \exp\left[\frac{-q\left(\Phi - \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon}}\right)}{kT}\right] \quad (3-3)$$

여기서,  $C$ 는 fitting 파라미터이고,  $\Phi$ 는 유효 전위 장벽이다.

두 번째로, 누설 전류의 구성요소중 하나인 터널링 전류에 관한 식을 알아보면, 터널링 전류는 유한한 높이와 두께를 갖는 장벽을 통과하는 파동함수(wave function)로 볼 수 있다. 파동함수는 이와 같은 장벽 내의 영역에서 지수 함수적으로 감소한다. 그러므로, 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$I_{tunneling} = A \exp\left[\frac{-B}{V}\right] \quad (3-4)$$

여기서,  $A$ 와  $B$ 는 fitting 파라미터이다.

광검출기의 DC 특성은 일정한 빛에 노출되어 생성되는 과도 캐리어에 의해 생성된 전류를 통해 얻을 수 있다. 낮은 전압에서 MSM 광검출기는 완전히 공핍되지 않고 열전자 방출은 전위장벽에 의해 전류가 제한된다. 평판 전압 (flatband voltage)을 넘어선 전압에서는 표동 전류(drift current)가 대부분을 이루고, 확산 전류(diffusion current)는 이에 비해 무시할 수 있다. 평판 전압은 일반적으로 0.65V 정도이다. DC 정상 상태에서 빛에 의해 생성되는 전류는 EHP(electron-hole pair) 생성율에 비례하여 다음과 같이 나타낸다.

$$I_{ph} = \frac{A_1}{A_2} (1 - R) (1 - e^{-\alpha d}) \frac{\eta q}{h\nu} P \quad (3-5)$$

여기서, R은 reflectivity,  $\alpha$ 는 흡수 계수, d는 흡수층의 두께,  $\eta$ 는 양자 효율, P는 입사한 빛의 파워이다.

인가한 바이어스 전압에 따라 다음과 같이 두 가지로 분리하여 식을 표현할 수 있다. 먼저, 평판 전압 이상의 경우 열전자 방출에 의한 전류가 전위 장벽에 의해 전류의 흐름이 제한을 받는다. 평판 전압 이상의 경우 일정한 빛에 의해 생성되는 전류이외에 터널링에 의해 생성된 전류를 첨가해야 한다.

$$I_{dc} = I_0 \left[ e^{\frac{qV(2V_{FB} - V)}{nKT}} - 1 \right] + I_{ph} A e^{\frac{-B}{V}} \quad (3-6)$$

$$I_{dc} = I_{ph} \left[ 1.0 + A e^{\frac{-B}{V}} \right] \quad (3-7)$$

여기서,  $I_{ph}$ 는 식(3-5)에서 표현한 바와 같고,  $V_{FB}$ 는 평판 전압이다.

### 제 3-2-2 절 PD의 등가회로 모델

광검출기의 등가회로 모델은 그림 3-7과 같이 구성할 수 있다. 구성은 식 (3-6)과 (3-7)을 표현한 전류원과, 각각 광검출기의 내부 저항과 캐패시턴스 값을 나타내는  $R_{in}$ ,  $C_{in}$ 로 표현할 수 있다. 또한, 외부 연결에 의한 기생 성분을 고려하여  $R_p$ ,  $C_p$ ,  $L_p$  등을 첨가한다.

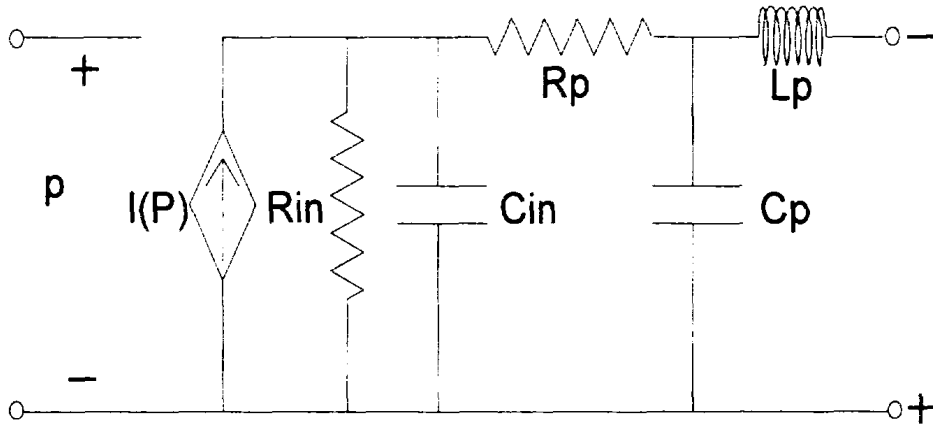


그림 3-7. 광검출기의 등가회로 모델

### 제 3-2-3 절 SPICE를 이용한 PD 등가회로 모델의 시뮬레이션

광검출기의 동작을 확인하기 위하여 SPICE를 시뮬레이션을 수행하였다. DC 해석을 통해 광검출기의 DC 특성을 알아 보았고, 그림 3-8에 나타내었다. 그림 3-9은 AC 해석을 통해 주파수 응답을 나타낸 그림이다. 그림 3-10은 transient 해석을 통해 임펄스 응답(impulse response)에 대해서 알아본 것이다. 이를 위하여 30ps, 0.22pJ을 갖는 입력 펄스를 가하였다.

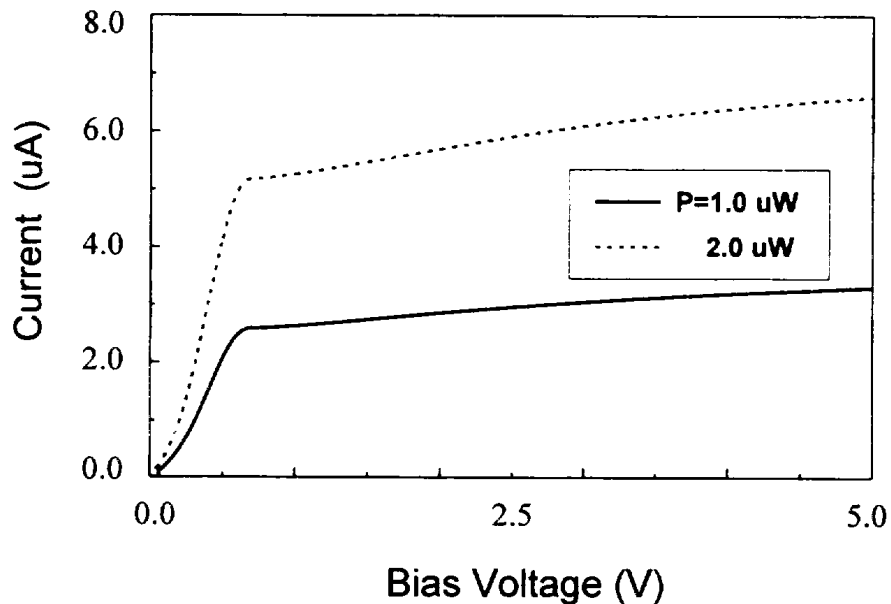


그림 3-8. 광검출기의 DC 곡선의 SPICE 시뮬레이션



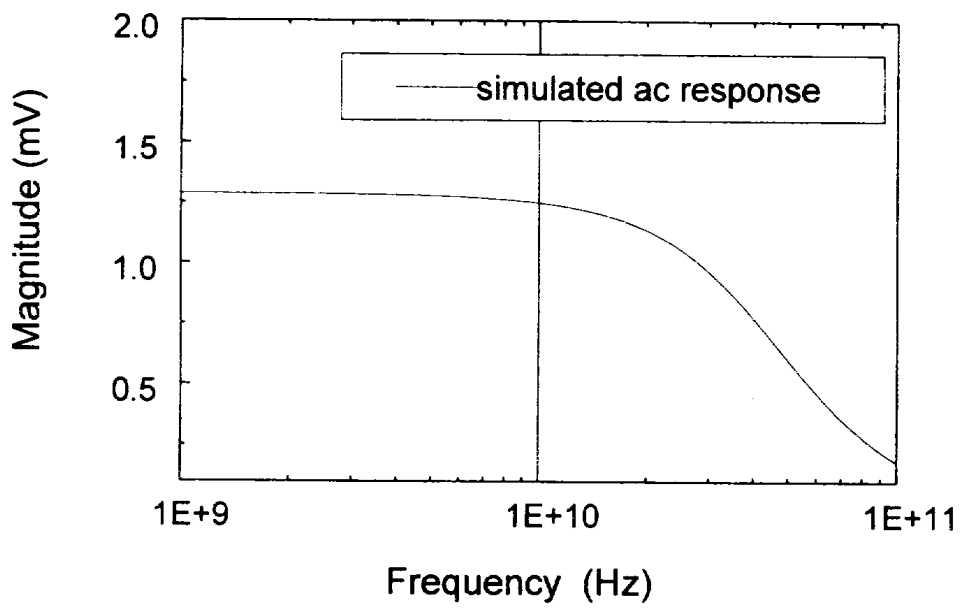


그림 3-9. 광검출기의 주파수 응답 특성

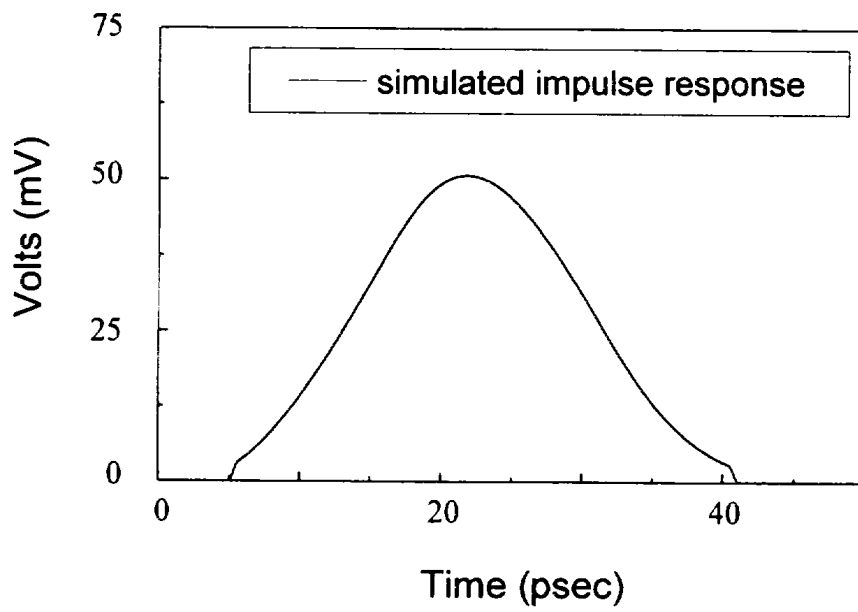


그림 3-10. 광검출기의 임펄스 응답 특성

## 제 3-3 절 수신단

### 제 3-3-1 절 수신단의 일반적인 구조

일반적인 광연결 시스템의 수신단 회로는 3R 기능을 갖고 있다. 즉, reshaping, regeneration, 그리고, retiming이다. 이를 나타낸 것이 그림 3-11이다. 먼저, reshaping의 경우 광검출기를 통해 흘러 들어온 전류를 전치증폭기 (preamplifier)에서 전압으로 변환한 후 증폭시킨다. Retiming은 데이터 신호에서 클럭 신호를 추출하는 기능을 수행하고, regeneration은 디지털 시스템의 신호로 사용하기 위하여 로직 '1'과 '0'을 결정하는 기능을 수행한다.

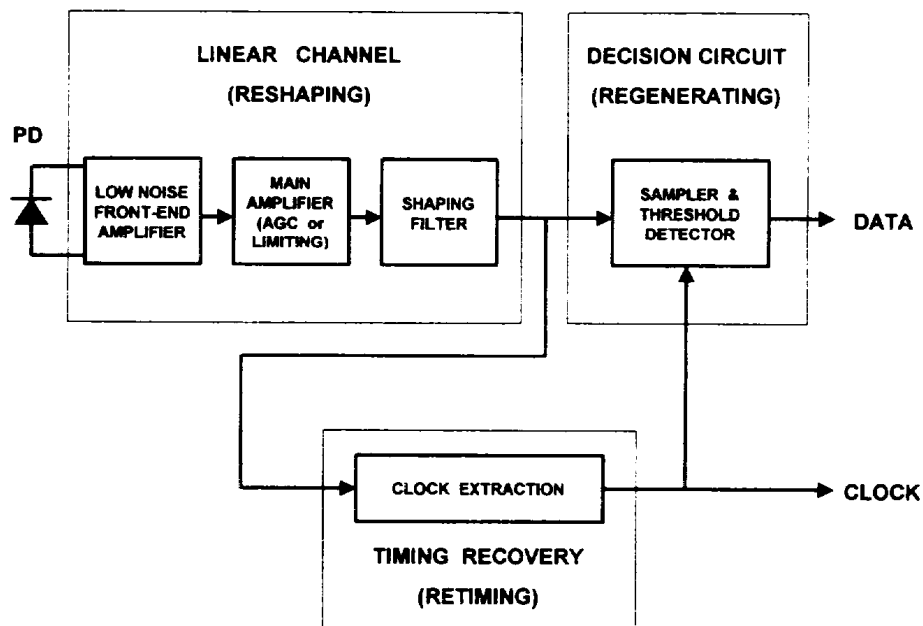


그림 3-11. 3R 기능을 갖는 광연결 시스템의 수신단 회로 구성

수신단의 증폭기는 크게 high impedance 증폭기와 transimpedance 증폭기의 두 가지로 나뉜다. High impedance 증폭기의 경우 sensitivity가 높지만, dynamic range가 작고, equalization을 위하여 pole-zero match를 잘 조절해야 하는 설계상의 어려운 점이 있다. 반면, transimpedance 증폭기의 경우 궤환 저항(feedback resistor)에 의한 잡음이 크다는 단점이 있지만, dynamic range가 크다. 이 증폭기를 설계하기 위해서는 회로의 안정적인 동작을 위하여 궤환 회로를 잘 설계하여야 한다.

### 제 3-3-2 절 Simulation에 사용한 수신단 회로

수신단은 automatic offset controller (AOC), automatic gain controller (AGC) 등을 첨가하여 수신된 신호의 손실을 보상할 필요가 있다. 그러나, board-to-board 수준의 광연결 시스템의 경우는 전력 소모와 비용을 고려해 볼 때 위와 같은 복잡한 기능들을 적용해야 하는 필요성이 적어진다. 최근에는 광검출기와 decision 회로를 직접 연결한 간단한 구조가 보고된 바 있다.[18]

따라서 본 논문에서는 전체 광연결 시스템을 해석하기 위하여 수신단 회로를 간단히 모델링하였다. 수신단 회로는 3R 기능 중 reshaping 기능만을 고려하고, regeneration, retiming 등의 기능은 첨가하지 않았다. 이는 전체 시스템을 간단한 모델링으로 해석하기 위하여 가능한 간단한 구조를 선택하는 데 목적이 있다. 그림 3-12는 모델의 대상이 되는 수신단의 구조로 생성된 전류를 전압으로 변환하기 위한 전달 임피던스 증폭기(transimpedance amplifier)와 변환된 전압을 증폭시켜주는 전압 증폭기(voltage amplifier)로 구성된다.

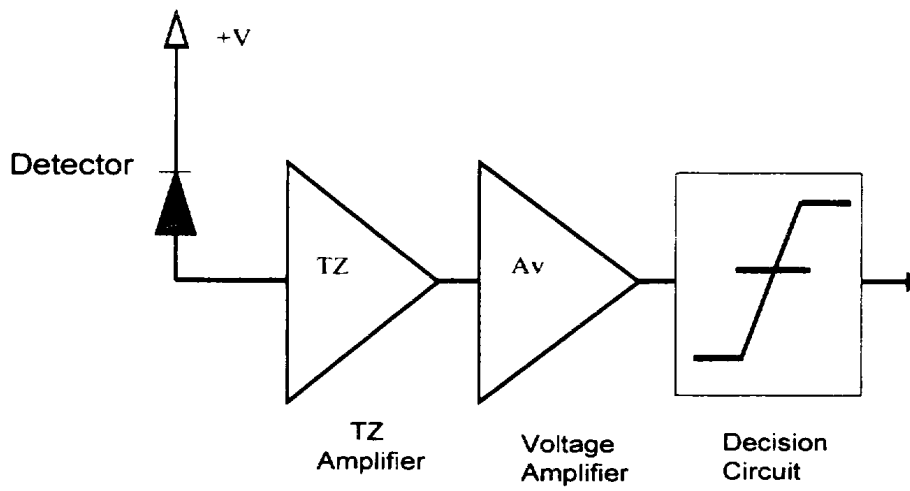


그림 3-12. 본 논문에서 사용한 광연결 시스템의 수신단 회로 구성

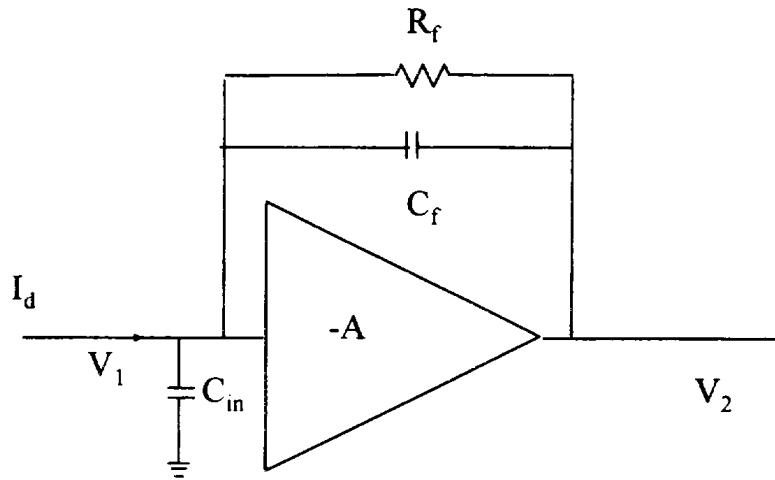


그림 3-13. 전달 임피던스 증폭기

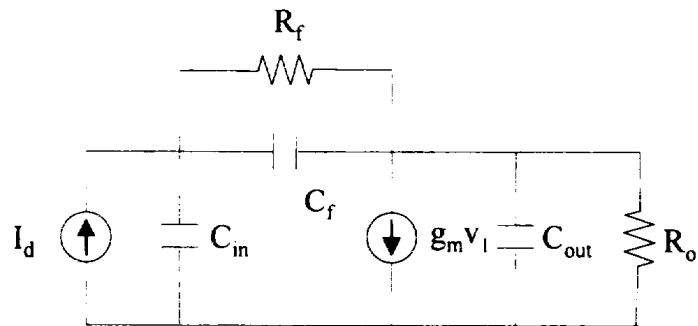


그림 3-14. 본 논문에서 사용한 전달 임피던스 증폭기의 소신호 등가회로 모델

그림 3-13의 전달 임피던스 증폭기는 저항을 feedback 시켜서 입력된 전류가 전압으로 변환되도록 하는 역할을 수행한다. 본 논문에서는 위에서 설명한 수신단 회로를 그림 3-14와 같이 모델링하였다. 이는 송신단의 온도 의존 효과를 고려한 광연결 시스템을 해석하는데 있어서 실제 회로 수준의 설계가 복잡하여 간단한 모델링을 사용하였다. 증폭기의 전달 임피던스 이득(transimpedance gain)  $A_z$ , 대역폭은 다음과 같다.

$$A_z = -R_f \quad (3-8)$$

$$f_{3dB} = \frac{A+1}{R_f C_T} \quad (3-9)$$

여기서,  $A$ 는 open-loop 이득이고,  $C_T$ 는 증폭기 입력단의 모든 캐패시턴스 값이고,  $R_f$ 는 feedback 저항이다.  $R_f$ 와  $C_T$ 가 대역폭을 좌우한다.

## 제 4 장 결과 및 고찰

### 제 4-1 절 시뮬레이션 방법

본 논문에서는 앞에서 제시한 LD의 회로등가모델에 온도의존효과를 첨가하고 LD 구동회로의 온도의존효과를 고려하여, 온도변화(0°C ~ 80°C)에 따른 송신단의 전력소모와 BER과의 관계를 알아보았다. LD, LD구동회로, PD, Receiver 모두 SPICE를 이용하여 simulation을 수행하였다. LD의 온도변화에 따른 파라미터중 광학적 이득과 투명캐리어 밀도는  $k \cdot p$  method를 이용하여 fitting한 2-band gain 모델로 계산을 하였고, 광가둠계수, 차동 양자 효율, thermionic emission time, diffusion time 은 각각 [26][22][25][25]의 논문에 있는 값을 이용하였다. 그 외에 광자시간, 우물에서의 radiative 재결합시간, 이득억압계수, spontaneous emission time등은 온도변화에 상수로 가정하였다. 이 파라미터는 앞에 온도의존효과를 첨가한 파라미터에 비해 온도변화에 비교적 둔감하며, 전체 시스템 해석에 문제가 없기 때문에 상수로 가정하였다. 앞의 주요온도의존 파라미터(광학적 이득, 투명 캐리어 밀도, 광가둠계수, 차동 양자 효율, thermionic emission time, diffusion time)에 온도 의존성을 첨가하여 본 논문에서 모델링한 구조와 같은 구조의 실험논문[22]과 비교하였다. 전체 시스템을 SPICE simulation을 수행하여 온도변화에 따른 LD의 광출력과 receiver단의 최종 output voltage를 비교하였다.

BER은 thermal noise가 dominant한 시스템으로 가정하여 계산하였고, 송신단(LD, LD구동회로)의 power는 주로 LD에서 소모되는 것(약90%)이 대부분이므로 이것 만을 계산하였다.



## 제 4-2 절 온도변화에 따른 LD 특성

온도를 0℃에서 80℃까지 변화시키면서 앞의 2장에서 논의하였던 LD의 주요 온도 의존 파라미터(광학적 이득, 투명캐리어 밀도, 광가둠계수, thermionic emission time, diffusion time)를 적용한후, SPICE를 이용하여 simulation을 수행함으로써 DC특성과 주파수 응답 특성 및 transient 해석 결과를 얻을 수 있었다.

### 제 4-2-1 절 온도변화에 따른 LD의 DC특성

그림 4-1은 주요 온도 의존 파라미터(광학적 이득, 투명캐리어 밀도, 광가둠계수, thermionic emission time, diffusion time)의 온도 의존 효과를 첨가하고, 그 외의 파라미터를 상수로 하였을 때의 LD의 DC특성이다. 이 결과를 같은 구조(InGaAs/GaAs)의 실험논문[22]과 비교해 보았다. 20℃에서의 threshold current가 약 3.2mA 정도되고 80℃에서는 본 논문에서 제시한 모델은 3.85mA 이고, 비교대상인 실험논문의 threshold current는 4.2mA정도이다. 그림에서 알 수 있듯이 20℃에서와는 달리, 80℃에서는 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 온도가 증가함에 따라 커지는 leakage current를 고려하지 않은 것이 가장 큰 원인이고, 그 밖의 carrier life time(photon life time, radiative recombination time)을 상수로 고정했기 때문이라고 할 수 있다. 이런 요소(leakage current, photon life time, radiative recombination time)는 LD의 구조에 큰 영향을 받는 값이고, 이론적으로 매우 예측하기가 어렵기 때문에 실험을 통해 얻는 것이 가장 바람직하다 할 수 있겠다.

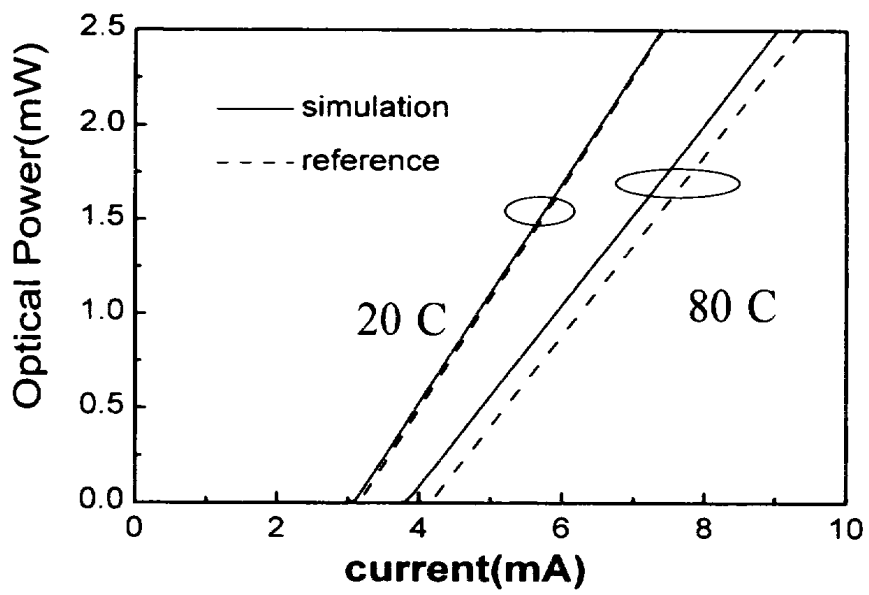


그림 4-1. 온도 변화에 따른 DC 특성

## 제 4-2-2 절 온도변화에 따른 LD의 주파수 응답 특성

그림 4-2는 온도 변화에 따른 주파수 응답 특성이다. 온도가 증가함에 따라 공진주파수가 감소하여 3dB 대역폭이 감소함을 알 수 있다. 이는 공진주파수가 differential gain의 square root에 비례하고, 2장에서 살펴보았듯이 온도증가에 따라 differential gain이 감소하기 때문에 공진주파수가 감소하게 된다. 일반적으로 공진 주파수가 증가하게 되면 감쇄 계수도 증가하여 공진 주파수에서 peak 값이 감소하고 이로 인해 3dB 대역폭이 그다지 커지지 않지만, differential gain의 경우 감쇄 계수에 큰 영향을 주지 않고 공진 주파수에만 영향을 주어서 3dB 대역폭도 증가함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 [23][24][25]에서 이론적으로 제시한 것과 비교해 볼 때, 그 경향이 일치하는 것을 알 수 있다.

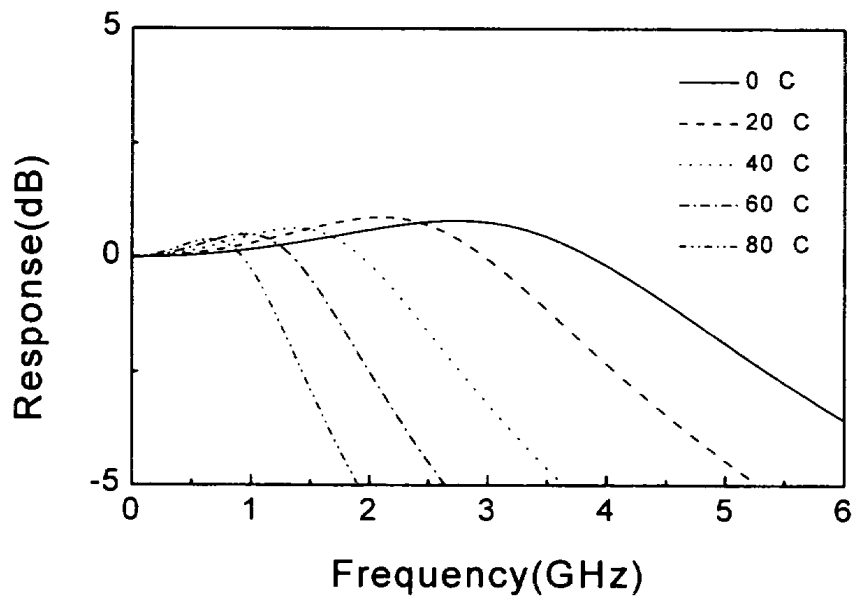


그림 4-2. 온도 변화에 따른 LD의 주파수 응답 특성

### 제 4-2-3 절 온도변화에 따른 LD의 펄스 입력에 대한 응답 특성

그림 4-3은 20℃와 80℃에서의 LD의 펄스 입력에 대한 응답 특성을 보인 시뮬레이션 결과이다. 인가된 입력은 1.54V/1.36V의 펄스 입력이다. 구동회로의 온도 의존효과는 고려하지 않고 오직 LD만의 온도 의존 효과를 고려하였다. 이를 위해 2장에서 언급했던 주요온도 의존 파라미터(광학적 이득, 투명캐리어 밀도, 광가둠계수, thermionic emission time, diffusion time)에 대해서 온도의존 효과를 첨가하였다. 그림에서와 같이 level shift 가 발생했는데, 그림 4-1과 같이 온도가 증가하면 threshold current도 같이 증가하고, L-I 곡선의 기울기도 작아지기 때문이다. 또한 80℃에서의 turn-on delay가 20℃보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 turn-on delay는 다음식과 같이 정의된다.

$$t_d = \tau \ln \frac{I_m}{I_m - I_{th}} \left( 1 - \exp\left(-\frac{N}{B\tau}\right) \right) \quad (4-1)$$

여기서,  $\tau$ 는 캐리어 수명시간이고, N은 1이후에 계속되는 0의 개수이다. 같은 입력 데이터가 random으로 진행한다고 했을 때,  $I_m$ (modulation current) 과  $I_{th}$ (threshold current)의 변화가 turn-on delay를 결정하게 된다. 20℃에서보다 80℃에서  $I_{th}$ 가 더 크므로 위의 식에서와 같이 turn-on delay는 증가하게 된다.

또 80℃에서 oscillation이 더 많이 발생하는 이유는 damping 계수가 작아지기 때문이다. damping 계수가 공진 주파수의 제곱에 비례하기 때문에 온도가 증가하면 감소되는 공진 주파수로 인하여 damping 계수는 작아진다.

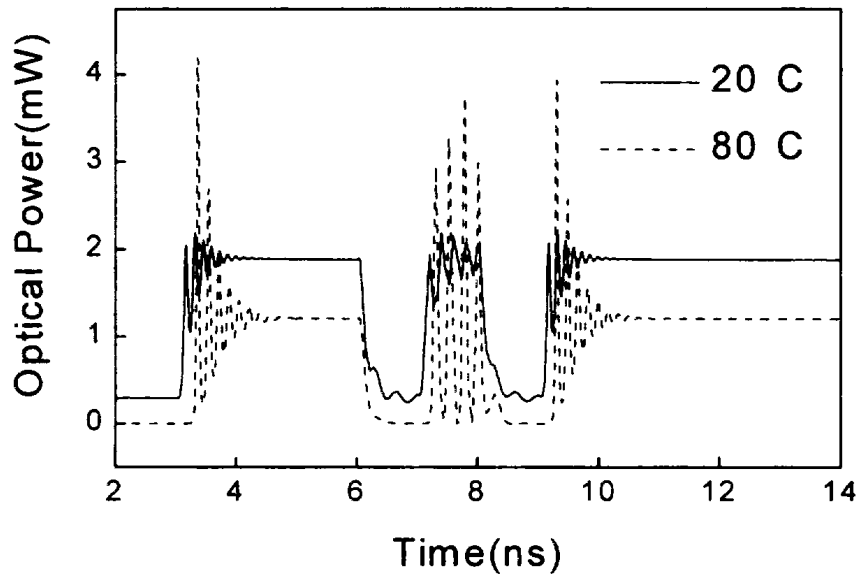


그림 4-3. 20°C와 80°C에서의 LD의 광출력

## 제 4-3 절 온도변화에 따른 LD 구동회로의 출력

광연결 시스템에서 송신단은 크게 LD와 LD구동회로로 구성되어 있다. 송신단의 온도 의존성을 고려하기 위해 앞의 4-2절에서는 LD만의 온도 의존성을 살펴보고, 이 절에서는 구동회로의 온도 의존성에 대해 논하고자 한다. 구동회로의 온도 의존성을 분석하기 위해 SPICE 시뮬레이션을 수행하여 modulation current( $I_m$ )의 변화를 알아보았다. 그림 4-4는 1.54V/1.36V의 펄스 입력이 인가될 때 각각 20℃와 80℃에서의 modulation current( $I_m$ )의 변화이다. 그림 4-4에서 실선은 20℃일 때의 시뮬레이션 결과이고, 점선은 80℃일 때의 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 20℃에서는 출력 전류의 swing level이 3.58mA~6.35mA이고, 80℃에서는 3.7mA~6.25mA로 나타났으며, 이로부터 온도가 증가할수록 출력 전류의 swing 폭이 작아짐을 알 수 있다.

그림 4-5는 20℃와 80℃에서의 modulation current( $I_m$ )의 변화에 따른 LD의 광출력이다. 앞의 4-2절에서 설명하였던 온도변화에 따른 LD의 광출력의 변화에 비해서 매우 작음을 알 수 있다. 이로 알 수 있듯이 송신단의 온도 의존 효과는 주로 LD의 온도 의존성에 좌우된다.

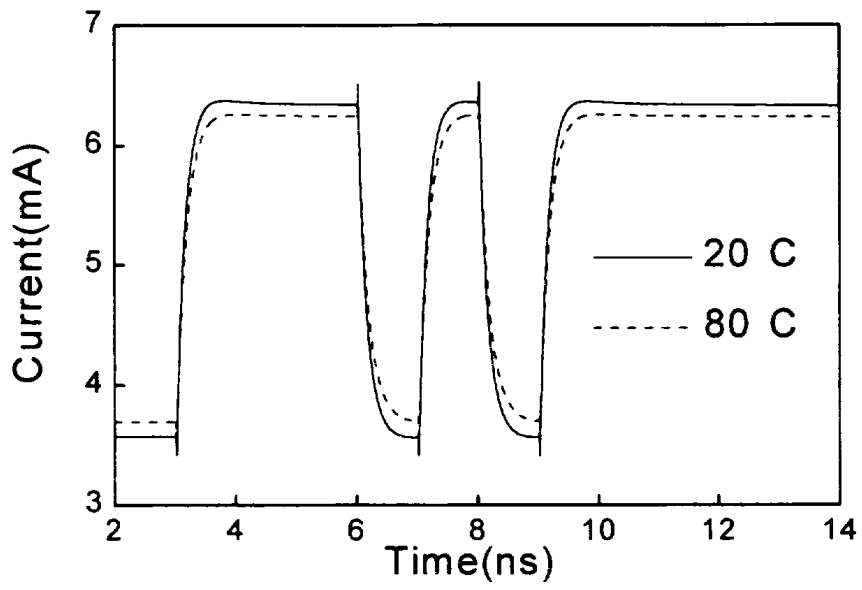


그림 4-4. 온도 변화에 따른 modulation current의 변화



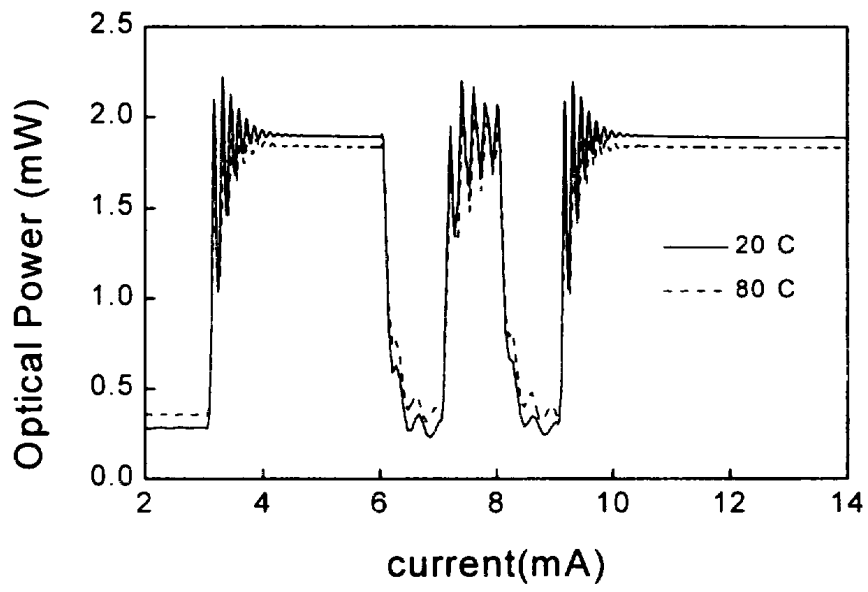


그림 4-5. 구동회로만의 온도 의존성에 의한 광출력의 변화

## 제 4-4 절 온도변화에 따른 송신단의 전력소모와 BER

### 제 4-4-1 절 온도 변화에 따른 수신단 출력

앞의 4-2절에서는 LD만의 온도 의존성에 대한 simulation 결과(DC특성, 주파수 응답 특성, 펄스 입력에 대한 응답 특성)를 보였고, 특히 DC특성은 본 논문에서 모델링한 LD구조와 같은 구조의 실험논문[22]과 비교하였다. 4-3절에서는 SPICE 시뮬레이션을 통해 LD구동회로만의 온도 의존성에 대한 simulation 결과(온도 변화에 따른 modulation current, 온도 변화에 따른 LD의 광출력)를 보였다. 그림 4-6은 앞서 설명한 LD와 LD구동회로 모두의 온도 의존성을 첨가하여 simulation한 결과이다. 입력은 앞절과 같이 1.54V/1.36V의 펄스 입력이다. 그림에서 알 수 있듯이 LD의 광출력은 대부분이 LD의 온도 의존성에 의함을 알 수 있다.

이러한 LD의 광출력은 coupling loss만을 고려한 광섬유를 통과하여 PD(Photo Detector)에 전달된 후 전류로 변환되고 이 값이 수신단의 회로를 통하여 전압으로 바뀌게된다. 이 때 사용한 수신단 회로는 3-3절에서 설명한 전달 임피던스 증폭기만을 고려한 이상적인 회로모델을 이용하였다. 그림 4-7은 입력이 1.54V/1.36V의 펄스 입력일 때의 수신단의 출력 전압이다.

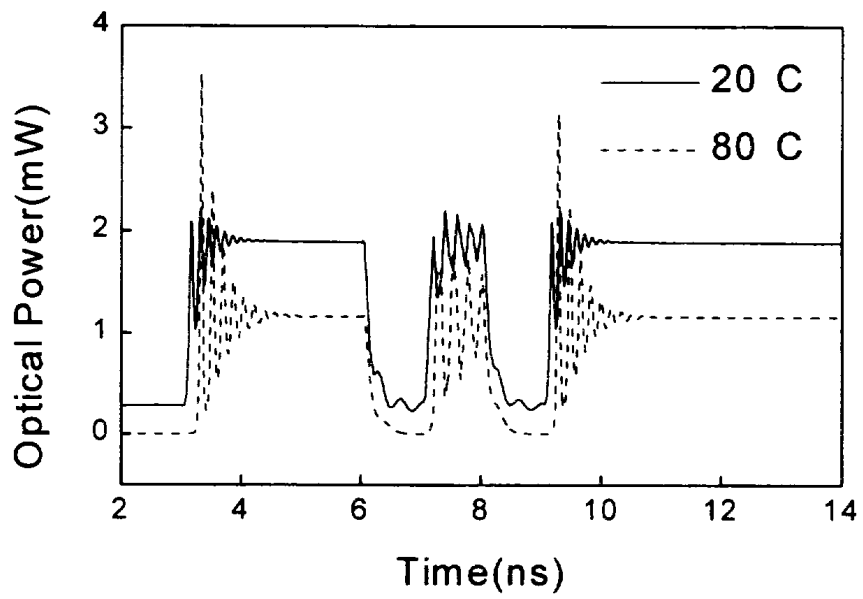


그림 4-6. 송신단의 온도 의존성이 고려된 LD의 광출력

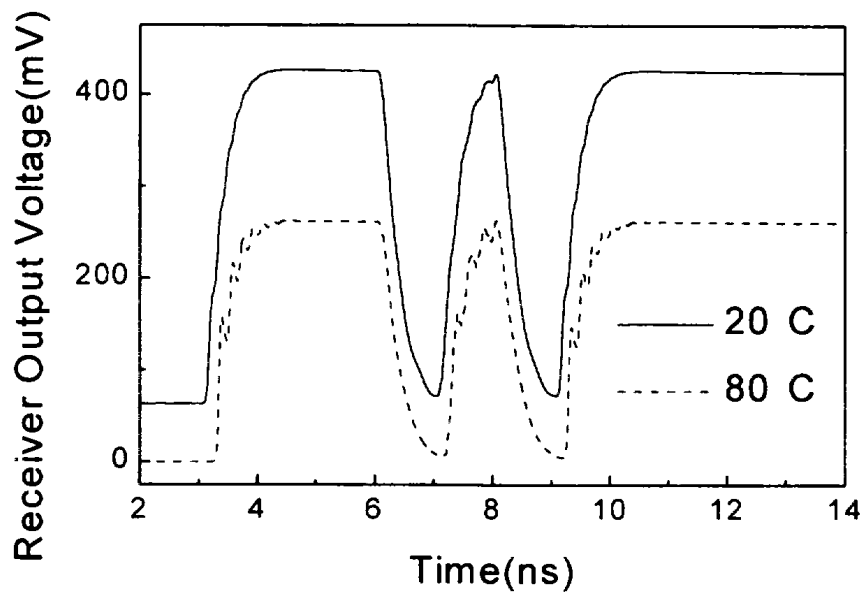


그림 4-7. 0℃와 80℃에서의 수신단의 출력 전압

## 제 4-4-2 절 온도 변화에 따른 송신단의 전력소모와 BER

BER(bit error rate)과 송신단의 전력 소모는 다음과 같이 유도할 수 있다. 먼저, 오류가 없는 동작을 하기 위해 송신단에서 수신단으로 흘러가는 과정을 통해 1과 0을 나타내는 신호를 정확하게 올바른 값으로 검출해내는 것이 중요하다. 이를 위해서 레이저 다이오드로부터 나오는 1과 0에 해당하는 광출력을 광검출기에서 검출한 전압을 각각  $V_{LD1}$ 과  $V_{LD0}$ 로 표시하면  $V_{LD0} = R \eta_{LD} \eta_{PD} \alpha_{FB} I_b$ ,  $V_{LD0} = R \eta_{LD} \eta_{PD} \alpha_{FB} (I_b + I_m)$ 와 같다. 여기서,  $\eta_{LD}$ 는 레이저 다이오드의 양자 효율을 나타내고,  $\eta_{PD}$ 는 광검출기의 responsivity를 나타낸다.  $I_b$ 는 바이어스 전류,  $I_m$ 는 변조 전류,  $R$ 은 수신단의 전달임피던스 값을 의미한다. 이러한 전압은 decision 회로에서 1과 0으로 오류 없이 검출되어야 한다. 이를 위해 decision 회로의 입력으로 들어오는 1과 0에 해당하는 유효 신호의 수준이 잡음을 고려한 decision 회로의 범위보다 커야 하므로 이를 그림으로 설명하면 그림 4-8과 같이 나타낼 수 있다. 계산을 보다 간단히 하기 위해 decision 전압을 logic '1'에 해당하는 수신단에서 받은 전압과 logic '0'에 해당하는 수신단에서 받은 전압의 중간 값으로 정했다. 수식으로는 다음과 같이 계산된다.

$$BER = \frac{1}{N} \sum \left[ P_e \left( \frac{V_{LD1} - V_t}{\sigma_1} \right) + P_e \left( \frac{V_t - V_{LD0}}{\sigma_1} \right) \right] \quad (4-2)$$

$$P_e(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{2}} \right) \quad (4-3)$$

$$V_t = \frac{(V_{LD1} + V_{LD0})}{2} \quad (4-4)$$

여기서,  $\sigma_1$ 과  $\sigma_0$ 는 수신단 잡음의 분산이고, thermal noise 가 dominant 한 시스템으로 가정하였다.  $\sigma_1 = \sigma_0 = 0.015$ 로 정하였다.

송신단의 전력 소모( $P_{tx}$ )는 3-1절에서 설명한 LD구동회로에서 LD에 걸리는

전압( $V_{LD}$ )과 LD가 달린 path의 average current로 구할 수 있다.  $P_{tx} \approx 0.5 \times V_{LD}(2I_b + I_m)$ 이고 원하는 비트율이 정해진 경우 최소의 변조 전류  $I_m$ 을 구하면 BER과 송신단의 최소 전력 소모를 구할 수 있다.

그림 4-9는 온도변화에 따라 송신단의 전력소모와 BER과의 관계를 계산한 그림이다. 이때 logic '0'에 해당하는 bias current( $I_b$ )를 3.6mA로 고정시켜 놓고, modulation current( $I_m$ )을 바꾸면서 송신단의 전력소모와 BER과의 계산을 수행했다. 그림에서 보는 바와 같이 같은 BER을 얻기 위해 80°C에서는 0°C에서 보다 약 18.5%의 송신단의 전력이 더 소비되는 것을 알 수가 있다.

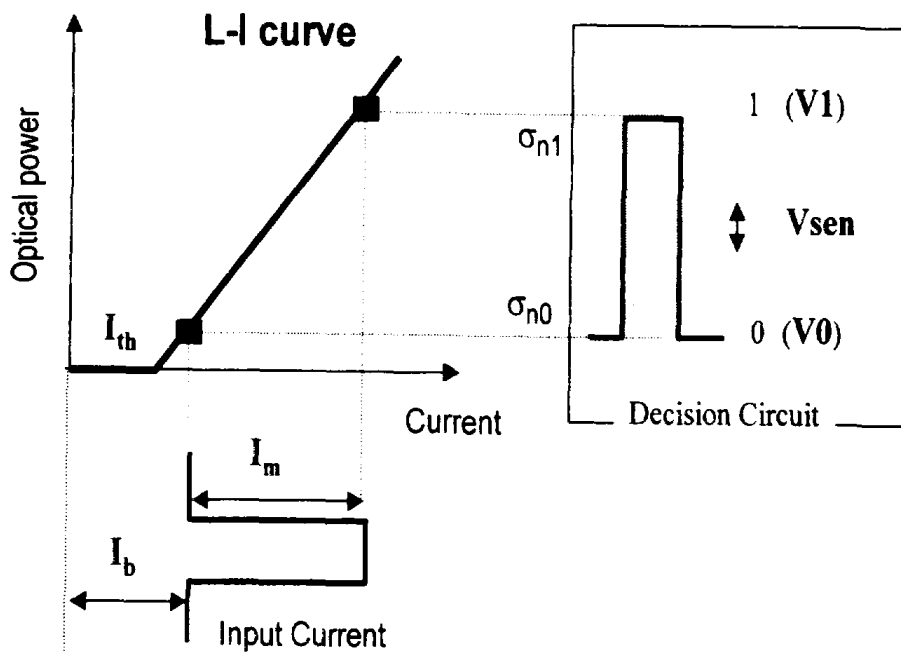


그림 4-8. 오류가 없는 동작을 위한 유효 신호의 설명

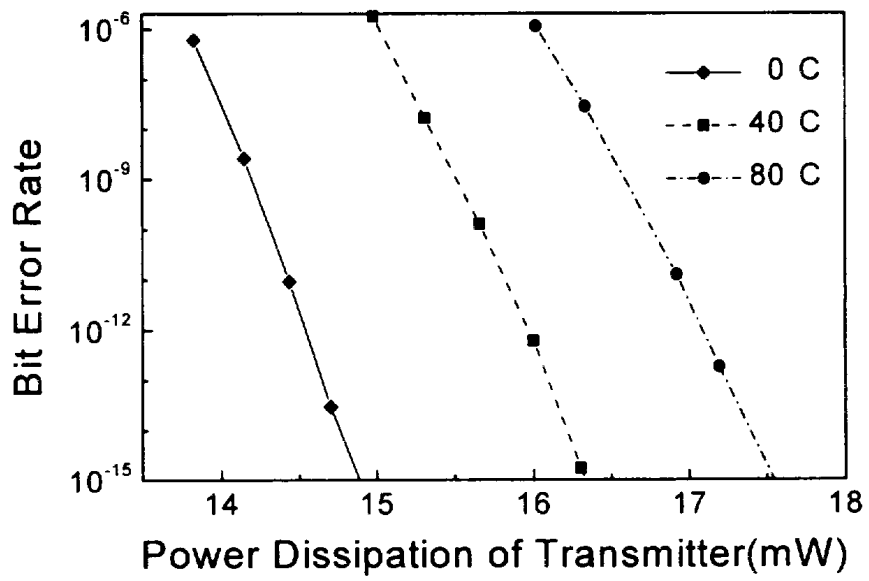


그림 4-9. 온도변화에 따른 송신단의 전력 소모와 BER과의 관계

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 광연결 시스템에서 기존의 LD 등가회로 모델에 온도 의존성을 첨가하여 송신단의 온도 의존성이 고려된 광연결 시스템을 해석하였다. 레이저 다이오드의 온도 의존 효과를 표현하기 위해서, 온도에 의존하는 주요 파라미터(광학적 이득, 투명캐리어 밀도, 광가둠계수, thermionic emission time, diffusion time)를 찾아 각각에 대해 온도 의존효과를 나타내었다. 특히 온도변화에 따른 광학적 이득은 SPICE에 적용하기 위해서 비교적 간단한 2-band gain model을 사용하였고, transition matrix element에 해당하는 값을  $k \cdot p$  모델을 이용하여 fitting함으로써 2-band gain model과  $k \cdot p$  모델의 결과를 일치시켰다. 투명 캐리어 밀도는 gain이 0일 때의 캐리어 밀도이므로 앞의 2-band gain model로부터 얻을 수 있다. 그 외에  $\tau_e$ (캐리어가 열적 여기에 의해 우물 밖으로 빠져 나오는데 걸리는 시간)와  $\tau_r$ (캐리어가 SCH 영역을 통과하여 우물에 포획되는 시간)은 [25]의 계산식을 이용하였고, 차동양자효율(differential quantum efficiency)  $\eta_d$ 는 같은 구조의 실험 논문인 [22]를 이용하였다. 또 광가둠 계수는 [26]의 값을 이용하였다. 이러한 주요온도 의존 파라미터(광학적 이득, 투명 캐리어 밀도, 광가둠계수, 차동양자효율, diffusion time, thermionic emission time)를 LD에 적용함으로써 LD의 온도 의존성에 대한 simulation(DC, 주파수 응답 특성, 펄스 입력에 대한 응답 특성)을 수행하였다. LD의 DC특성은 실험논문[22]와 비교하였다. 주파수 응답 특성은 온도가 증가함에 따라 공진 주파수가 감소함을 확인했다. 공진 주파수가 감소하는 이유는 differential gain이 감소하기 때문이다. 펄스 입력에 대한 응답 특성은 온도가 증가할수록 레벨이 감소하며 turn-on delay가 증가하고 oscillation이 커짐을 확인할 수 있었다. 이러한 현상의 자세한 설명은 4-2절에서 하였다.



또한 구동회로의 온도 의존성을 고려하기 위하여 각각 20℃와 80℃의 회로 온도에 대해 SPICE 시뮬레이션을 수행하여 구동회로만의 온도 의존성을 분석하였고, LD의 온도 의존성에 비해 매우 작은 변화를 보이는 것을 확인했다. 광검출기의 경우 MSM 구조를 선택하였다. 회로적으로 간단한 전류원과 저항, 캐패시턴스, 인덕터 등으로 구성하였으며, 누설 전류와 DC 성분의 전류를 식으로 표현하여 전류원을 구성하였다. 레이저 다이오드와 광검출기의 등가회로 모델은 OEIC 회로 설계 및 해석, 레이저 다이오드 구동회로 설계, 광수신 회로, 레이저 다이오드 패키징 설계 등에서 유용하게 쓰일 것으로 기대된다.

수신단의 회로는 복잡한 설계를 피하고 이상적인 증폭기의 모델을 택하여 해석이 용이하도록 하였다. 수신단은 전달 임피던스 증폭기와 전압 증폭기만을 고려하였다. 4-3절에서는 LD와 LD 구동회로 모두의 온도의존성을 첨가하여 LD의 광출력과 수신단의 출력 전압을 얻었다.

온도변화에 따른 송신단의 전력 소모와 BER을 얻기 위해 bias current를 고정시켜놓고 modulation current를 바꾸어 가며 simulation을 수행하였다. 그 결과, 같은 BER을 얻기 위해 80℃에서는 0℃에서 보다 약 18.5%의 송신단의 전력이 더 소비되는 것을 알 수가 있었다.

결론적으로 본 논문에서는 SPICE를 이용하여 송신단의 온도 의존 효과를 고려한 광연결 시스템의 simulation을 수행하였고, 이를 이용하여 성능분석을 하였다. 이 결과를 통해 원하는 BER을 얻기 위해 온도 보정 회로의 필요 유무를 판단할 수 있고, 온도변화에 따른 안정적인 시스템을 위한 적절한 송신단의 전력을 예상할 수 있으리라 기대된다.

## 참고문헌

- [1] M. Morishita, T. Ohmi and J. Nishizawa, "Impedance characteristics of doubleheterostructure laser diodes," Solid-State Electronics, vol. 22, pp. 951-962, 1979.
- [2] J. Katz, et al., "The intrinsic electrical equivalent circuit of a laser diodes," IEEE J. of Quantum Electron, vol. QE-17, no. 1, pp. 4-7, 1981.
- [3] S. C. Kan and K. Y. Lau, "Intrinsic equivalent circuit of quantum-well lasers," IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 4, no. 6, pp. 528-530, 1992.
- [4] R. S. Tucker, "Large-signal circuit model for simulation of injection-laser modulation dynamics," IEE Proc., pt. I, vol. 128, pp. 180-184, 1981.
- [5] M. F. Lu, C. Juang, M. J. Jou and B. J. Lee, "Study of carrier transport effects on quantum well lasers using a SPICE simulator," IEE Proc.-optoelectron., vol. 142, no. 5, pp. 237-240, 1995.
- [6] R. Nagarajan, et al., "High speed quantum-well lasers and carrier transport effects," IEEE J. of Quantum Electron, vol. 28, no. 10, pp. 1990-2007, 1992.
- [7] HSPICE User's manual Vol. 2, Metasoftware, CA, 1996.
- [8] R. Nagarajan, et al., "Transport limits in high-speed quantum-well lasers : experiment and theory," IEEE Photon. Techn. Lett., vol. 4, no. 2, pp. 121-124, 1992.
- [9] H. J. A da Silva, et al., "Sensitivity degradation with laser wavelength chirp for direct optical receivers," IEE Proc., pt J, vol. 136, no. 4, 1989.
- [10] Govind P. Agrawal and Niloy K. Dutta, Semiconductor Lasers, 2nd ed.,

Van Nostrand Reinhold, NY, 1993.

- [11] M. Ishikawa, et al., "Long wavelength high-speed semiconductor lasers with carrier transport effects," *IEEE J. of Quantum Electron.*, vol. 28, no. 10, pp. 2230-2241, 1992.
- [12] R. C. Yu, R. Nagarajan, T. Reynolds, A. Holmes, J. E. Bowers, S. P. DenBaars, and C. E. Zah, "Ultrahigh speed performance of a quantum well laser at cryogenic temperatures," *appl. Phys. Lett.*, vol. 65, pp. 528-530, 1994.
- [13] N. Bewtra, D. A. Suda, G. L. Tan, F. Chatenoud, and J. M. Xu, "Modeling of Quantum-Well Lasers with Electro-Opto-Thermal Interaction," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 1, pp. 331-340, 1995.
- [14] S. Y. Hu, S. W. Corzine, Z. M. Chuang, K. K. Law, D. B. Young, A. C. Gossard, L. A. Coldren, and J.L. Merz, "Temperature-dependent threshold and modulation characteristics in InGaAs/GaAs quantum-well ridge-waveguide lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, pp. 2040-2042, Apr. 1995.
- [15] S.M.Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed. New York : Wiley, 1981.
- [16] S.M.Sze, "Current transport and maximum dielectric strength of silicon nitride films," *J. Appl. Phys.*, vol. 38, pp. 2951-2956, 1967.
- [17] D.A.Blerkom, et. al., "Transimpedance receiver design optimization for smart pixel arrays," *J. Lightwave Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 119-126, 1998.
- [18] D.Z.Tsang, "One-gigabit per second free-space optical interconnection," *Appl. Opt.*, vol. 29, no. 14, pp. 2034-2037, 1990.
- [19] M. Yoneyama, et al., "Analysis and application of a novel model for

- estimating power dissipation of optical interconnections as a function of transmission bit error rate." *IEEE J. of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 13-21, 1996.
- [20] D.M.Cutrer and K.Y.Lau, "Ultralow power optical interconnect with zero-biased, ultralow threshold laser-How low a threshold is low enough?" *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 7, no. 1, pp. 4-6, 1995.
- [21] L. P. chen and K. Y. Lau, "Regime where zero-bias is the low-power solution for digitally modulated laser diodes," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 185-187, 1996.
- [22] P. L. Derry, et al., "Low threshold current high-temperature operation of InGaAs/AlGaAs strained-quantum-well lasers" *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 1189-1191, 1992
- [23] Peter S. Zory, Jr., "Quantum well lasers," Academic Press, Inc., 1993.
- [24] John E. Bowers, "High speed semiconductor laser and photodetector," a short course at CLEO 1995
- [25] Radhakrishnan Nagarajan et al, "High speed quantum-well laser and carrier transport effects," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 10, pp.1990-2007, 1992
- [26] M. Bortolotti, et al., "Temperature dependence of the refractive index in semiconductors," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 7, pp. 918, 1990
- [27] Leonard P. Chen, et al, "A low-power 1-Gb/s CMOS Laser driver for a zero-bias modulated optical transmitter," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, no. 7, pp. 997-999, 1997.

## **Abstract**

# **Performance Analysis of Optical Interconnection Systems including Transmitter Temperature Dependence**

Yu Gun Kim

Dept. of Electrical and Computer Eng.

The Graduate School

Yonsei University

In this dissertation, we analyze the temperature (0°C to 80°C) dependent characteristics of the power dissipations in transmitter and BER of the optical interconnection systems. In the transmitter, an equivalent circuit model is used to consider the temperature characteristics of a laser diode. Among the temperature parameters of laser diodes, the optical gain variations with temperature due to changed Fermi's distribution functions are the most dominant parameter. We use a two-band model for the temperature dependence of the optical gain. The optical gains from the two-band model are compensated with those from the  $k \cdot p$  model for the numerical simulation.

For the transmitter, SPICE simulation was performed with the temperature from 0°C to 80°C. The PD with MSM structure and the transimpedance amplifier are considered as ideal receiver models.

Our numerical simulation results help one not only to understand the need of temperature-compensation circuits for a certain BER, but to estimate the transmitter power dissipations in the optical interconnection systems under the temperature variation.

---

keywords : laser diode, equivalent circuit model, optical gain, temperature dependence