

제 7장 Laser Diodes

7.1. LD의 구조

7.2. LD 물질

7.3. LD 동작

7.4. LD의 기본적인 특성

제 7장 Laser Diodes

❖ Laser Diode(LD) :

- 반도체 내에서 전자의 광학천이에 의한 광자의 유도방출을 이용한 광파의 발진기 및 증폭기를 총칭
- 순방향 바이어스 하에서 사용되는 전형적인 pn 접합 소자
- 유도 방출 과정에서 생성되는 코히런트(coherent) 빛을 방출하는 소자
- 발진(lasing) 파장 : 활성층의 물질에 따라 가시광선에서 적외선 까지
- 소형이며(길이가 0.1mm정도), 고주파에서 바이어스 전류를 조절하여 쉽게 변조
- 응용분야 : 광통신, 계측, 정보 관계 등이 분야에 폭넓게 응용
- 전류에 의해 10GHz 이상의 고속으로 직접변조가 가능
- 발진효율 : 수~수십 %
- 수명이 길고 신뢰성 우수, 대량생산이 가능하여 가격이 저렴.

제 7장 Laser Diodes

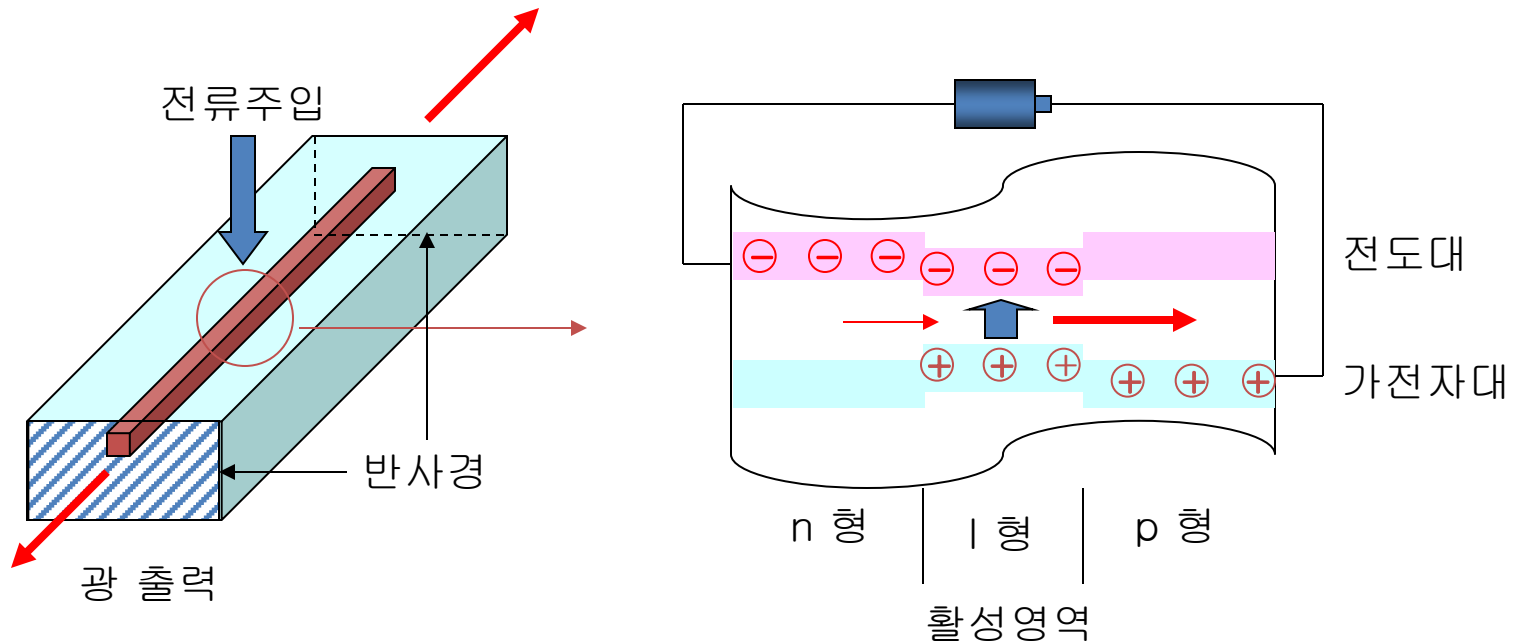
❖ 기체/고체 레이저 vs. 반도체 레이저

	장점	단점
기체/고체 레이저	<ul style="list-style-type: none">• 다양한 종류와 응용 분야<ul style="list-style-type: none">- UV 레이저(리소그라피)- 고출력(CO₂ 레이저)- Ultra short pulse	<ul style="list-style-type: none">• 고가격• 넓은 설치 장소 요구• 저 효율 : 큰 전력 소모, 대형 냉각 장치 요구
반도체 레이저	<ul style="list-style-type: none">• 소형• 대량 생산에 의한 저가격• 고 효율, 저 소비 전력• 긴 수명	<ul style="list-style-type: none">• 장 시간에 걸친 소재 개발 및 대규모 시설 투자 요구<ul style="list-style-type: none">- 반도체 결정 성장 기술- 반도체 공정

제 7장 Laser Diodes

- 반도체 레이저 다이오드 원리

: pn 다이오드에 전류를 흘리면 전자와 전공이 활성층에 모이면서 전하 밀도 반전이 일어나는데, 이때 양쪽에 반사경을 만들어 주면 공진기가 형성되어 레이저 발진이 일어남.



. 반도체 레이저의 동작 원리

제 7장 Laser Diodes

7.1. LD의 구조 : pn 접합 레이저

(a) 동종접합

- 양쪽 반도체가 같은 재료
- Fabry-Perot 캐비티(cavity)
- 캐비티 길이 L : $\sim 300\mu\text{m}$ 정도
- LD에서 광범위하게 사용

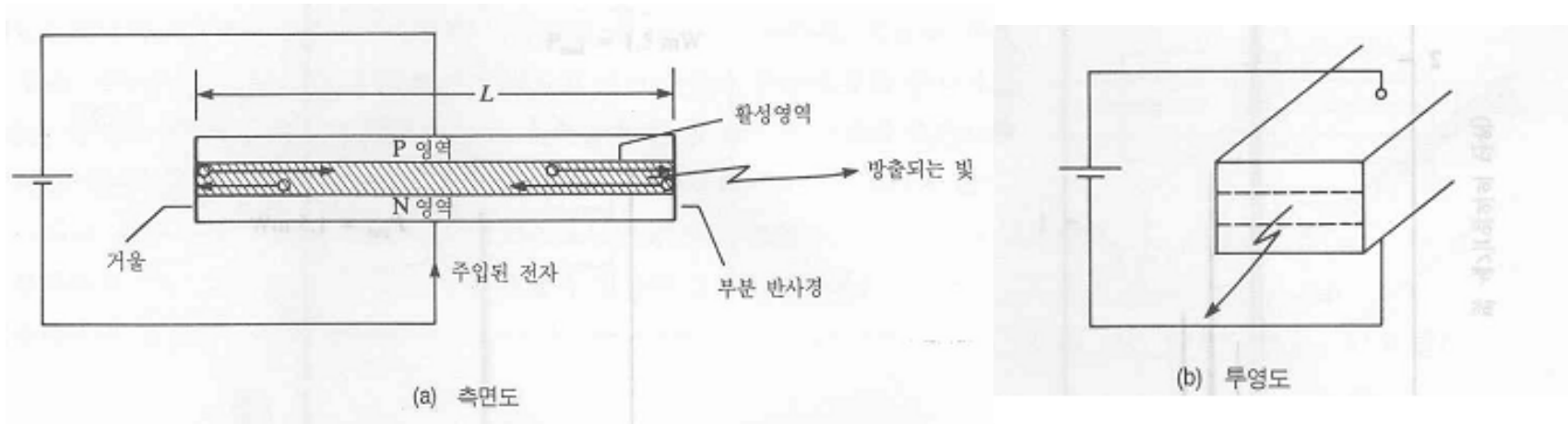
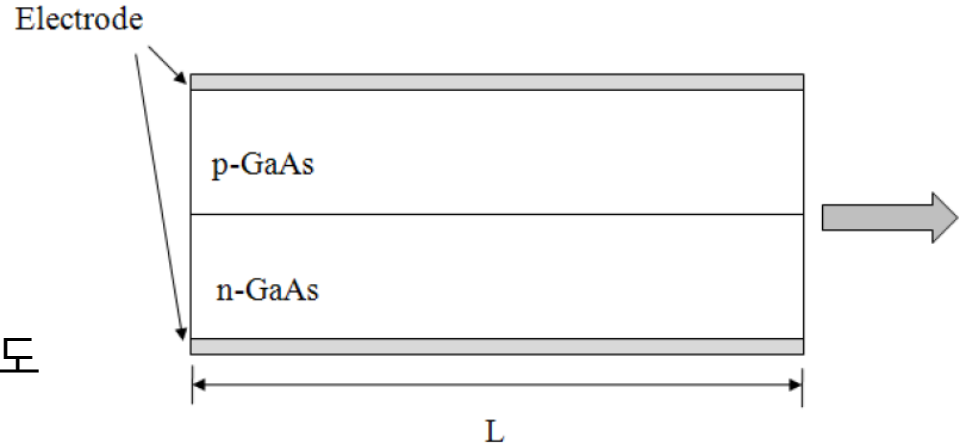
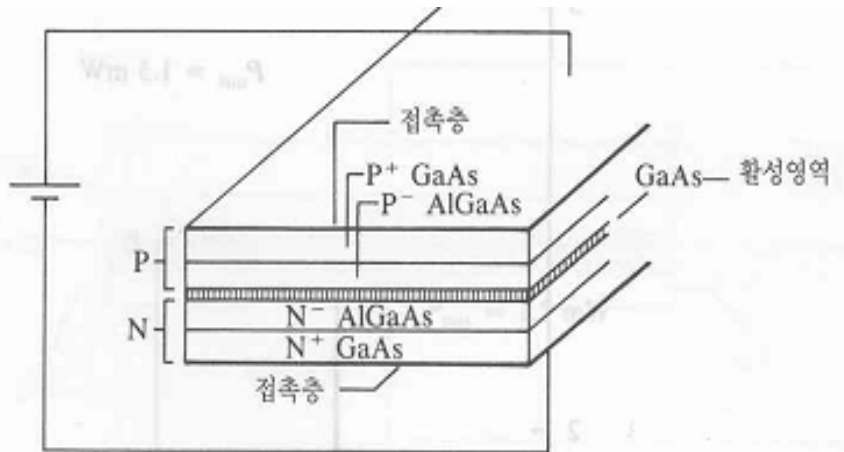
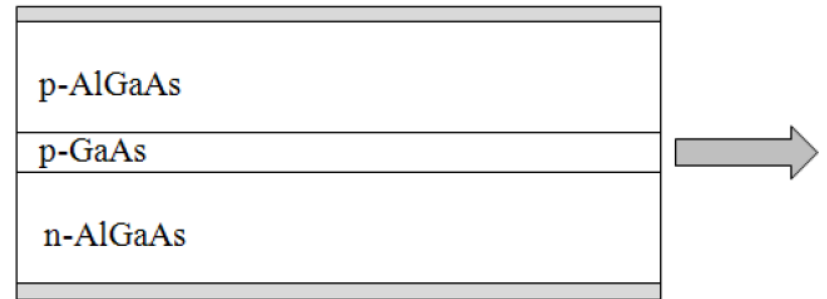


그림 7.1 Fabry-Perot 캐비티 LD 구조

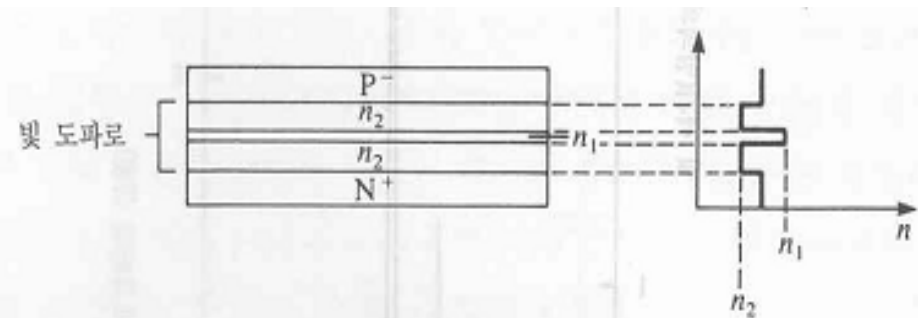
제 7장 Laser Diodes

(b) 이중 이중(DH) LD

- 얇은 반도체 양쪽에 다른 반도체가 접합된 2중 헤테로 구조 레이저
- 에피택셜 결정 성장기법
- 매우 작은 전류로 동작



(a) 구조도



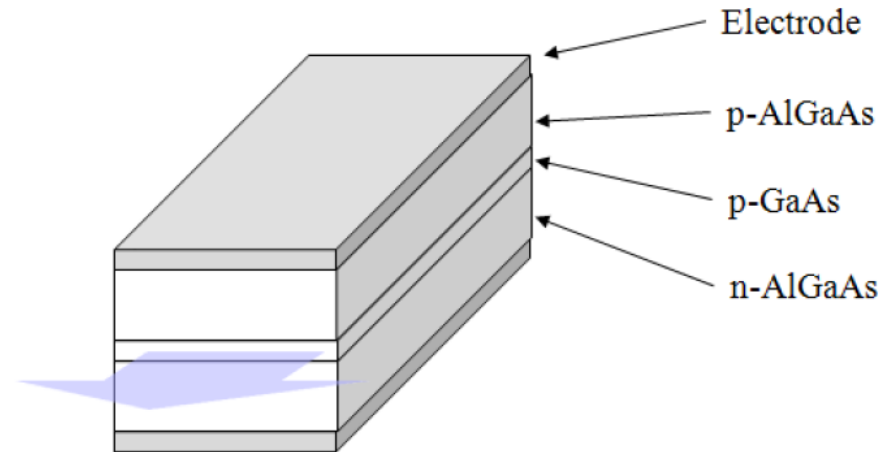
(b) 준질량 분포도

제 7장 Laser Diodes

(a) DH LD

- 접합면을 따르는 전체 면적에서 복사가 방출되기 때문에 광면적 레이저

(a)



(b) 스트라이프 DH LD

- 산화층은 스트라이프 금속 접촉을 제외한 모든 영역을 고립시켜서 레이저 방출영역을 접촉부위 아래의 좁은 영역으로 제한
- 스트라이프 폭 $S : 5 \sim 30 \mu\text{m}$
- 동작전류를 감소
- 접합면을 따르는 다중 방출 면적 제거, 신뢰도 향상

(b)

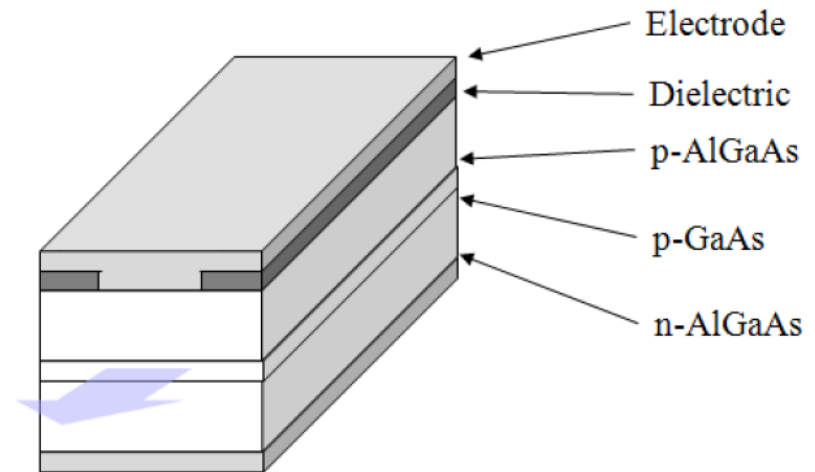


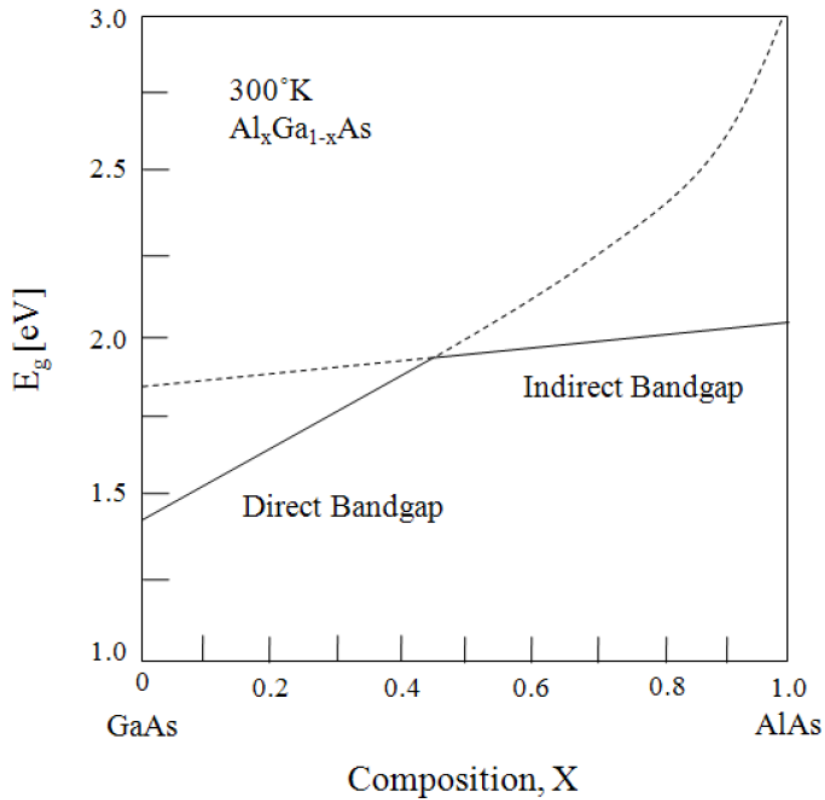
그림 7.2 Fabry-Perot 캐비티 LD 구조 : (a) DH LD, (b) 스트라이프 DH LD

제 7장 Laser Diodes

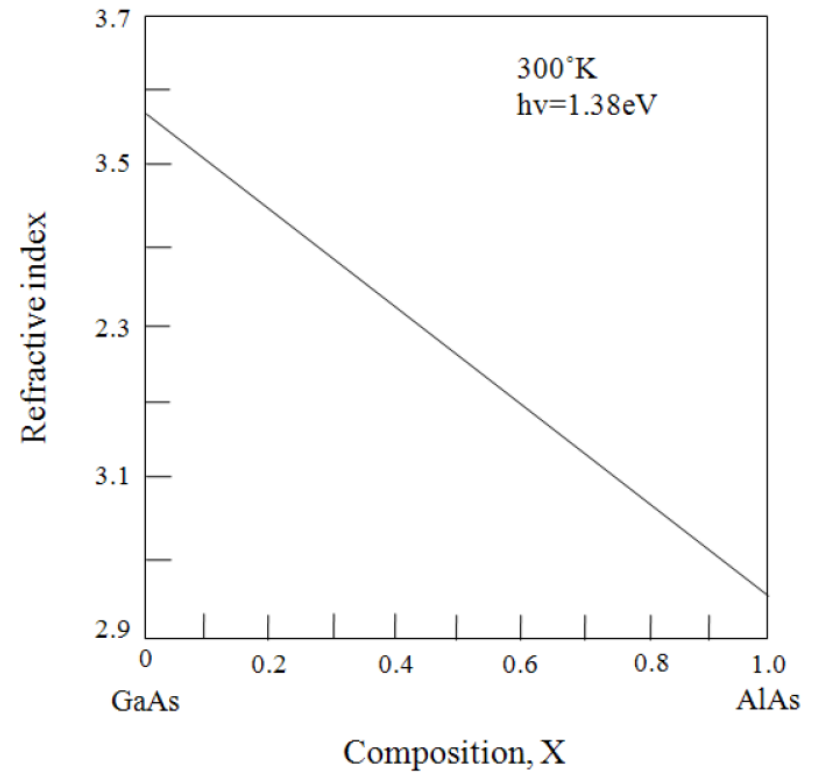
7.2. LD 물질

- 레이저의 방출 파장은 $0.3\sim 30\mu\text{m}$ 범위
- 레이저 복사를 방출했던 최초의 재료: 갈륨비소(GaAs)
- III-V족 화합물 합금 : $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 와 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$
- 계면트랩을 무시할 수 있는 헤테로 접합 구조를 얻기 위하여는 두 반도체 간의 격자가 밀접하게 정합되어야만 함.

제 7장 Laser Diodes



(a)



(b)

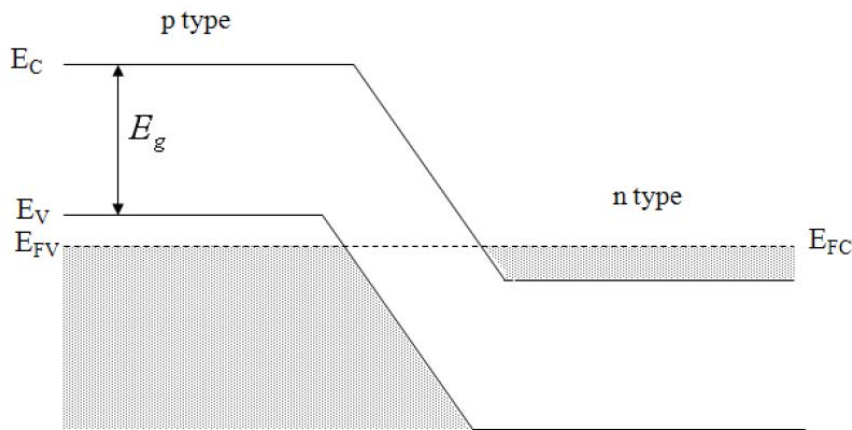
그림 7.3 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 의 조성에 따른 (a) 밴드갭 변화와 (b) 굴절율 변화

제 7장 Laser Diodes

7.3. LD 동작

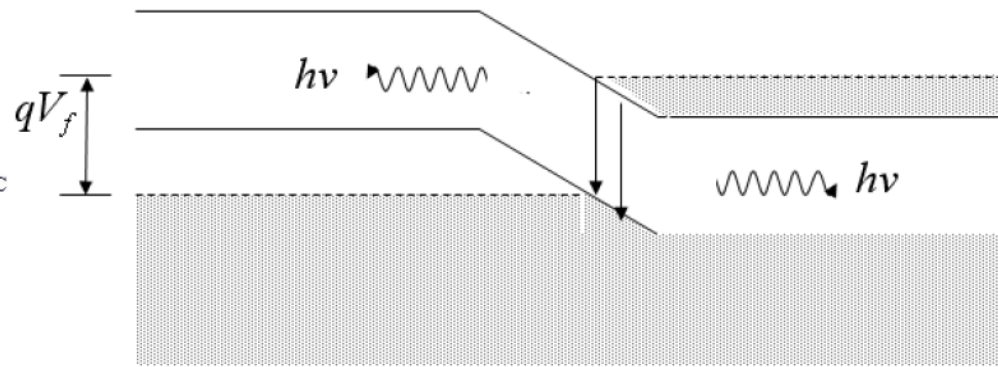
7.3.1 반전분포

- LD에서 반전분포를 얻기 위하여 접합 양쪽의 도핑 레벨을 매우 높게 하여 p형에서는 페르미 준위가 가전자대 아래에, n형에서는 전도대 위에 있도록 만들어 준 축퇴반도체 사이에 형성된 pn접합을 고려.



(a) 열평형상태의 도우핑이 많이 된 pn접합

✓ 반전분포 조건 : $(E_{FC} - E_{FV}) > E_g$



(b) 순방향 바이어스가 인가된 도우핑이 많이 된 pn접합

그림 7.4 축퇴 pn접합

제 7장 Laser Diodes

7.3.2 캐리어와 광의 제한

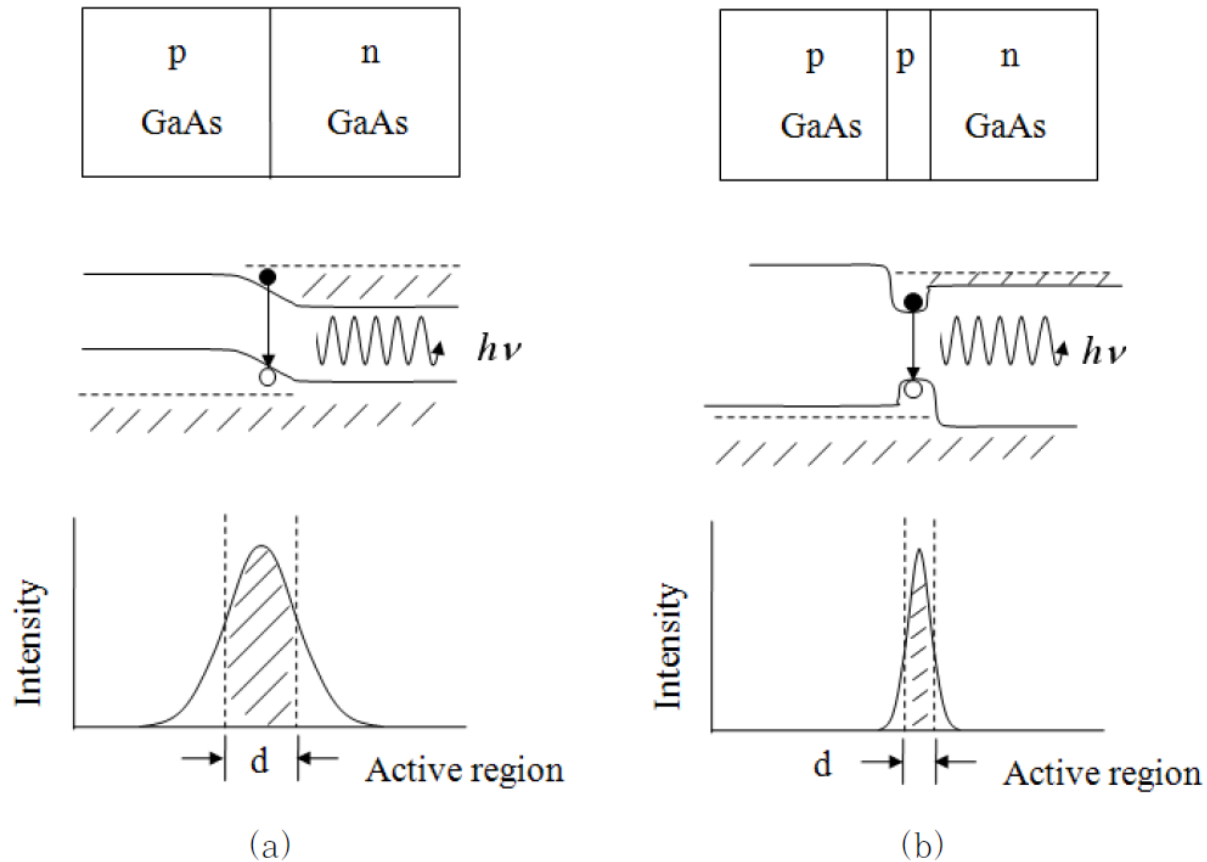


그림 7.5 (a) 동종접합 LD와 (b) 이중 이종(DH) LD

제 7장 Laser Diodes

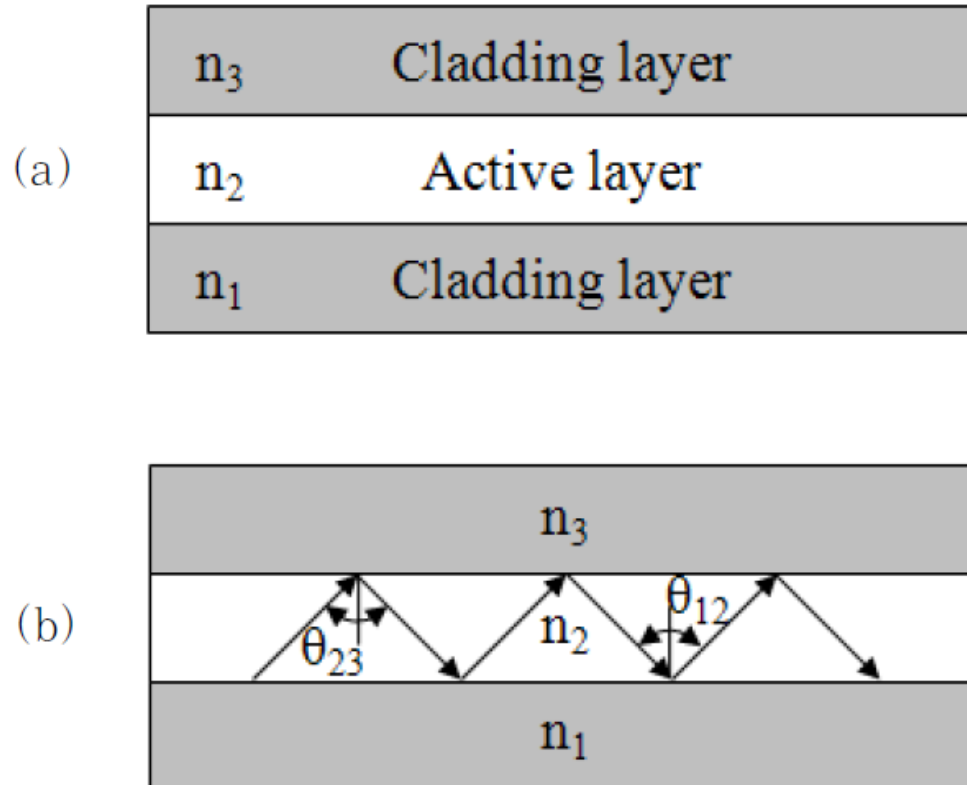


그림 7.6 (a) 캐비티 형태와 (b) 캐비티 내 이동 궤적

제 7장 Laser Diodes

7.3.3 임계전류밀도

- 레이저 작용이 일어나는 데 필요한 최소 전류밀도 : 임계전류밀도 J_{th}
 - 온도가 증가할 때 J_{th} (DH 레이저)는 J_{th} (동종접합 레이저)보다 매우 느리게 증가
 - 300K에서 DH 레이저의 J_{th} 가 낮기 때문에 DH 레이저는 실온에서 연속동작이 가능.
 - 이 특성은 LD의 사용을 촉진, 특히 광섬유 통신에서 사용이 증가.

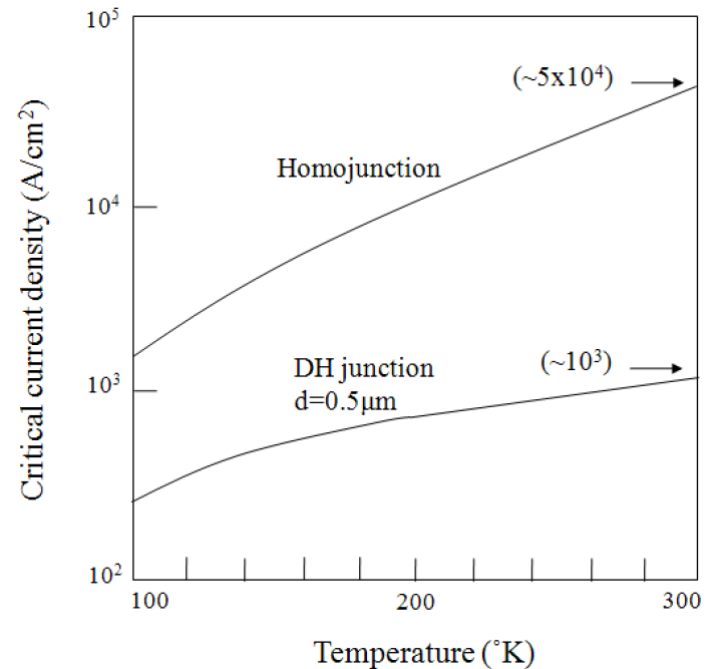


그림 7.7 동종접합과 DH 접합 LD에 대한 온도 대 임계전류밀도

제 7장 Laser Diodes

7.3.4 LD의 발진

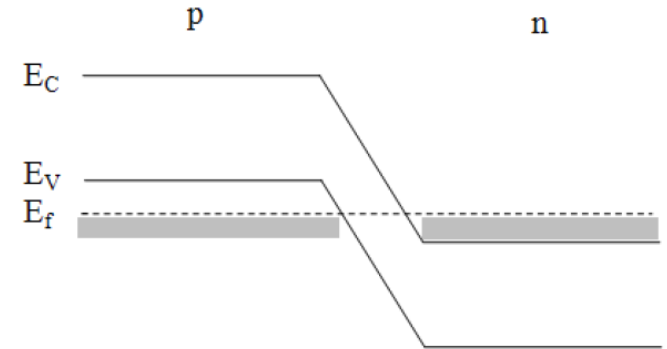
- 반도체 레이저 발진 : 전도대와 가전자대 사이에서 전자의 분포가 반전
- 열평형인 고순도의 반도체 :
전도대에 있는 전자 수 \ll 가전자대에 있는 전자 수 .
- LD의 여기방법(반전분포 방법) : 가전자대의 전자를 전도대로 전이
 - 전류여기 : 반도체의 pn접합부에 직접 전류를 흘려 전자와 정공을 주입
 - 광여기 : 반도체의 E_g 보다 큰 에너지를 갖는 광자의 조사
 - 전자빔 여기 : pn접합을 만들 수 없는 반도체의 경우에 이용.
20→100keV 정도로 가속시킨 전자빔을 냉각된 반도체의 가전자대 전자에 충돌시켜 전도대로 올라가게 함.

제 7장 Laser Diodes

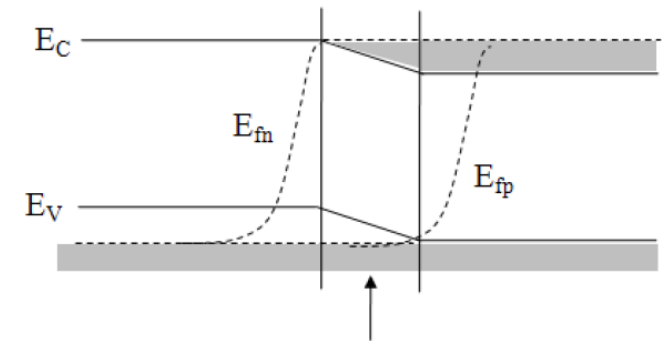
❖ LD의 원리

- pn접합 다이오드에 순방향 바이어스를 인가
→ 운반자 주입
→ 공간전하영역(활성영역)에서 재결합. →
→ E_g 에 해당하는 광자, 레이저광을 방출.
- 방사되는 레이저광의 강도 : 전자의 재결합의 크기에 따라 커지며, 주입되는 전자와 정공이 더욱 많아져 반전분포가 커지면 활성층 내부에서는 점점 유도방출이 일어나 광이 증폭됨.
- pn접합 활성층의 양단면 : 완전히 평행으로 거울의 역할을 하기 때문에 광공진기가 구성되어 레이저의 발진

그림 7.9 LD의 에너지 밴드



(a) 평형상태



(b) 순방향 바이어스

제 7장 Laser Diodes

7.3.5 발진파장 특성

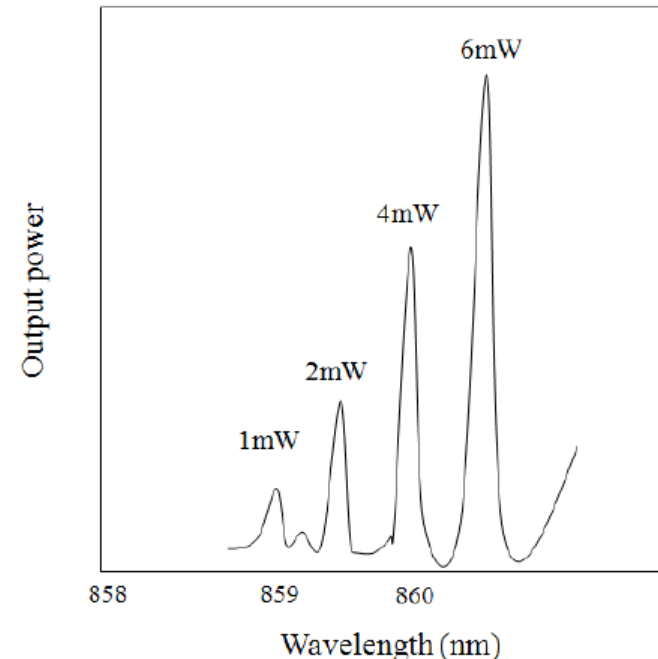
- LD의 발진파장 λ : 반도체 발광재료의 E_g 에 의해 결정

$$\text{파장 } \lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} (\mu\text{m})$$

(E ; 광자의 에너지, c ; 빛의 속도, h ; 플랑크상수, ν ; 주파수)

예) GaAs의 경우 실온에서
 $E_g=1.4\text{eV}$ 이므로 $\lambda=0.8856\mu\text{m}$

- 보통 전류를 늘여 발진출력을 증가시키면 발진 파장은 변함.
- 이는 전류를 증가시키면 레이저 활성층의 온도가 상승하고 띠 간격 E_g 가 커져 발진파장이 짧은 쪽으로 이동하기 때문



제 7장 Laser Diodes

- 현재 실용화되어 있는 반도체 재료계(III-V족 반도체)

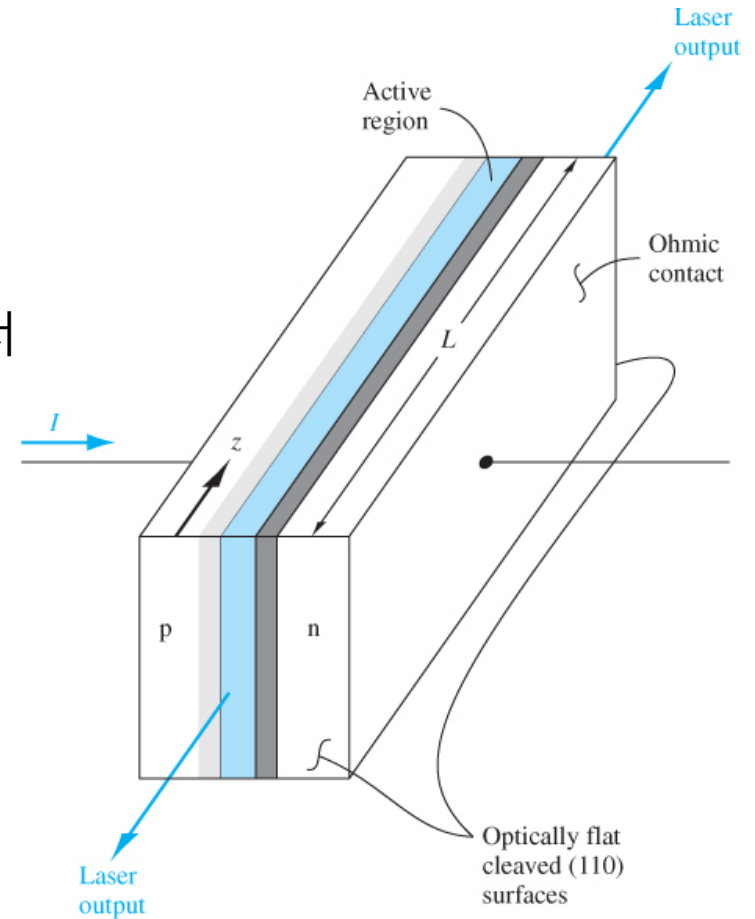
표 7.1 실용화되어 있는 LD 재료

파장(μm)	활성재료	클래드재료	기판
0.75~0.9	$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$	$\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$	GaAs
1.2~1.6	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}$	InP	InP
0.66~0.69	$\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$	$\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.5}\text{P}$	GaAs

제 7장 Laser Diodes

❖ 광학적 공진 상자(→간접성 방출 출력)

- 두 개의 평행한 거울로 구성된 공진 상자
: 패브리-페롯(FP) 공진기
- 패브리-페롯형 LD의 공진기 단면은
결정의 절개면을 이용
- z-방향으로 진행하고 양단의 거울 사이에서
반사되어 왕복
- 거울은 일부를 반사, 일부를 투과



절개된 (110) 면으로 Fabry-Parot 공진상자를 이루는 pn 접합 다이오드

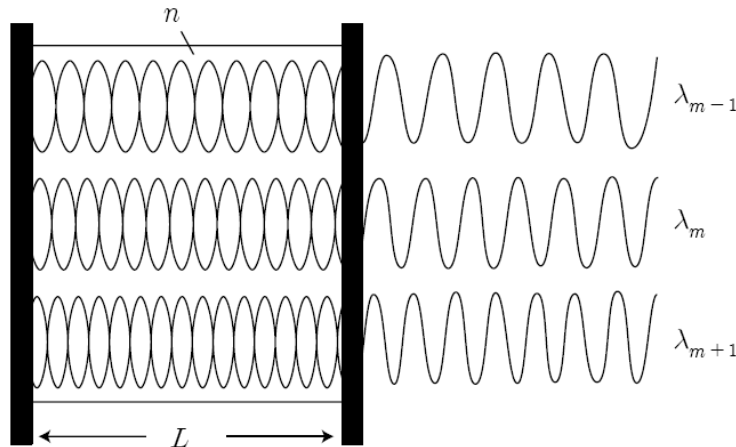
제 7장 Laser Diodes

- 위상 조건

- 레이저로 동작하기 위해서는 이득조건 외에 위상조건도 만족해야 함
- 광자는 파동의 성질도 있으므로, 레이저로 동작하기 위해서는 한 번 왕복 후의 위상 변화 $\Delta\phi$ 가 2π 의 정수배가 되어야 함. 즉 다음과 같은 특정한 파장만이 광 공진기 외부로 출력.

$$\Delta\phi = 2Lk = 2m\pi \quad (m \text{은 정수}) \quad \xrightarrow{k = \frac{2\pi}{\lambda/n}} \quad \boxed{\lambda_m = \frac{2nL}{m}}$$

활성영역의 굴절률



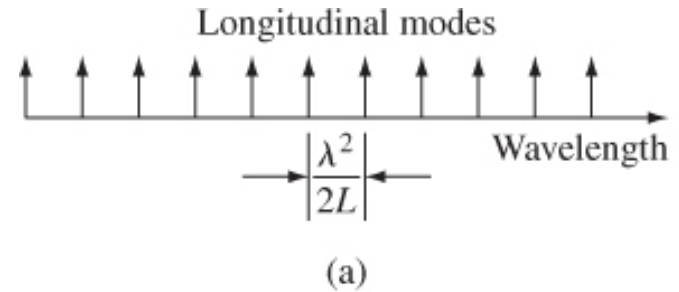
레이저의 종모드(longitudinal mode)

❖ 참고) 주파수로는 $f_m \lambda_m = c$ 이므로

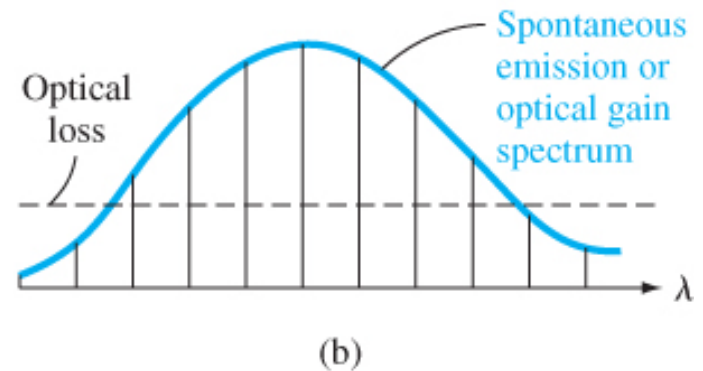
$$f_m = \frac{mc}{2nL}$$

제 7장 Laser Diodes

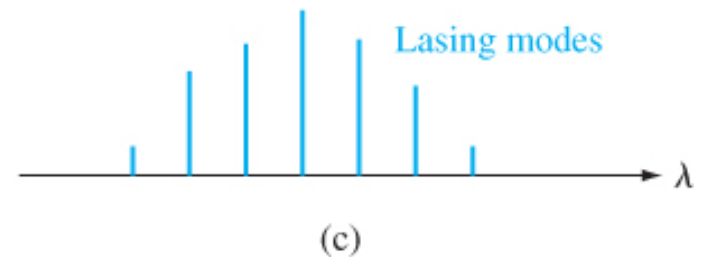
(a) 길이가 L 인 공진상자의 공진 모드



(b) 자연방출 특성곡선



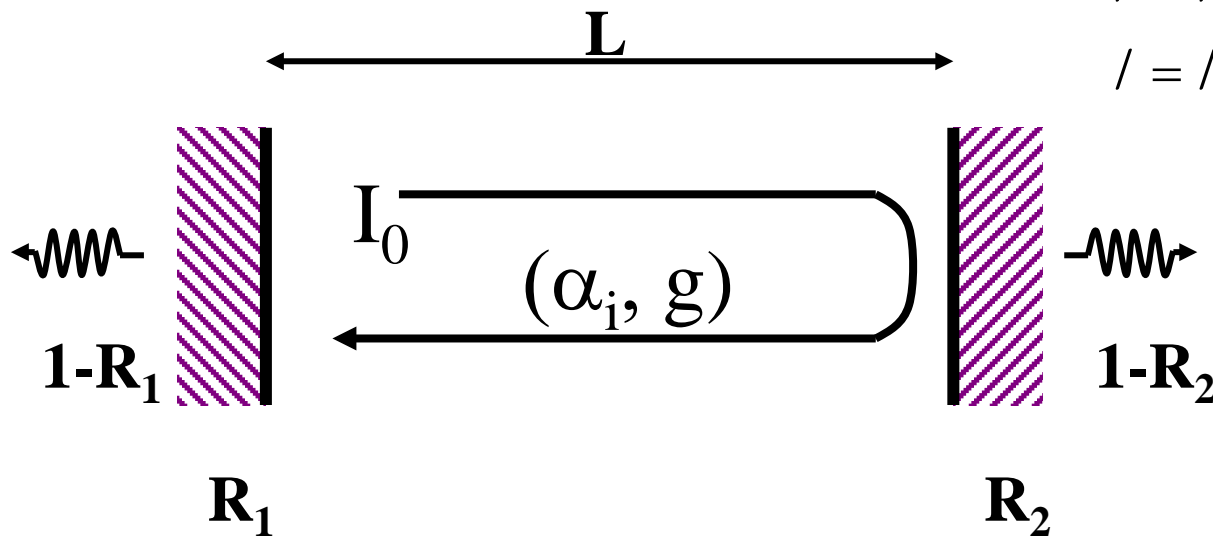
(c) 레이저 다이오드의 실제 방출 모드



제 7장 Laser Diodes

❖ 레이저 공진기

공진기는 이 증폭기를 입력과 출력을 서로 연결하여 계속 위상과 파장이 같은 빛을 생성할 수 있게 해줌. 단순히 반사경 두 개를 서로 마주 보게 만들면 빛이 계속 반사하며 무한 루프(loop)를 돌게 됨.



$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad \alpha : \text{흡수계수}$$

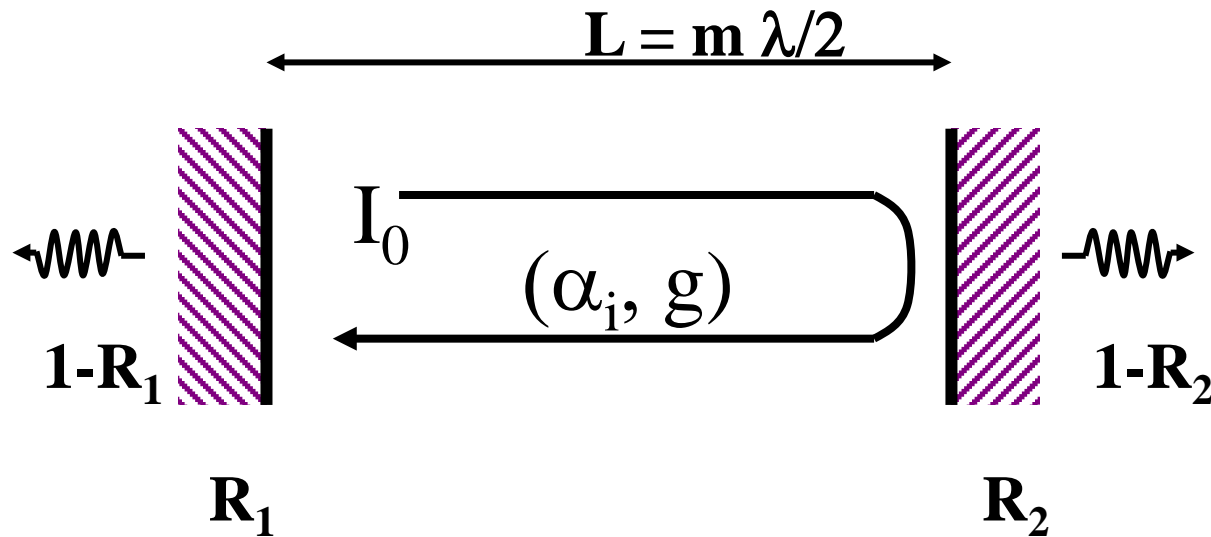
$$I = I_0 \exp(gx) \quad g : \text{이득계수}$$

제 7장 Laser Diodes

❖ 레이저 발진 조건

$$I_{\text{round trip}} = I_0 \exp\{(-\alpha_i + g)2L\}R_1R_2 = I_0$$

$$g = \alpha_i + \left(\frac{1}{2L}\right) \ln\left(\frac{1}{R_1R_2}\right)$$



제 7장 Laser Diodes

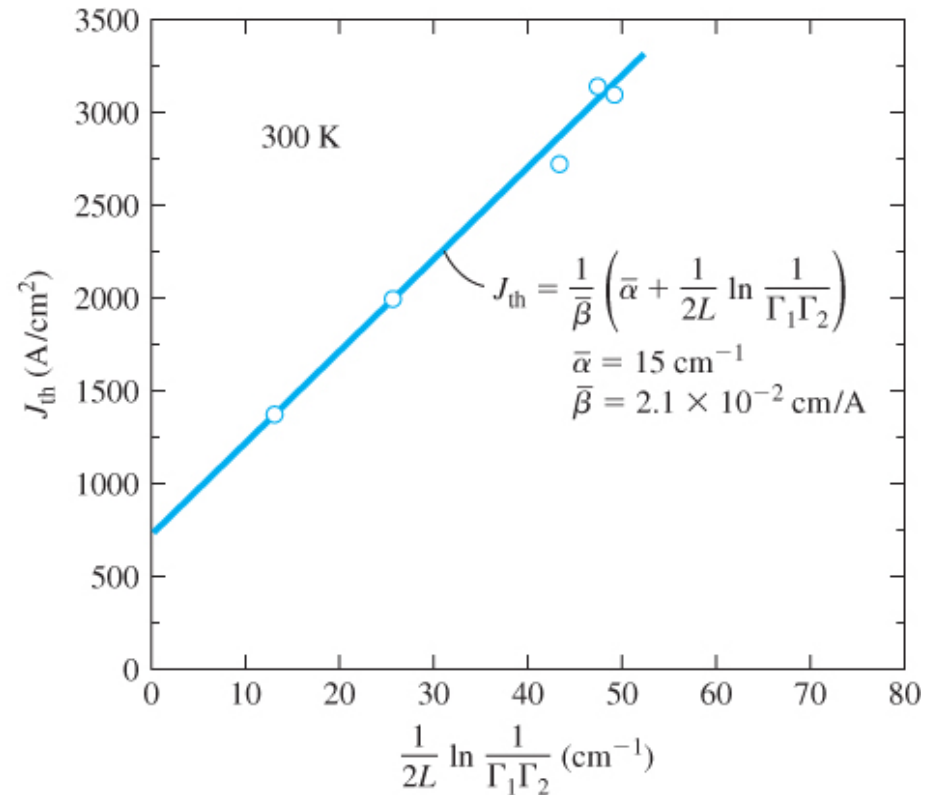
■ 문턱전류

$$J_{th} = \frac{1}{\beta} \left[\alpha + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right]$$

$$R_1 = R_2 = \left(\frac{\bar{n}_2 - \bar{n}_1}{\bar{n}_2 + \bar{n}_1} \right)^2$$

(\bar{n}_2 : 반도체 굴절률,

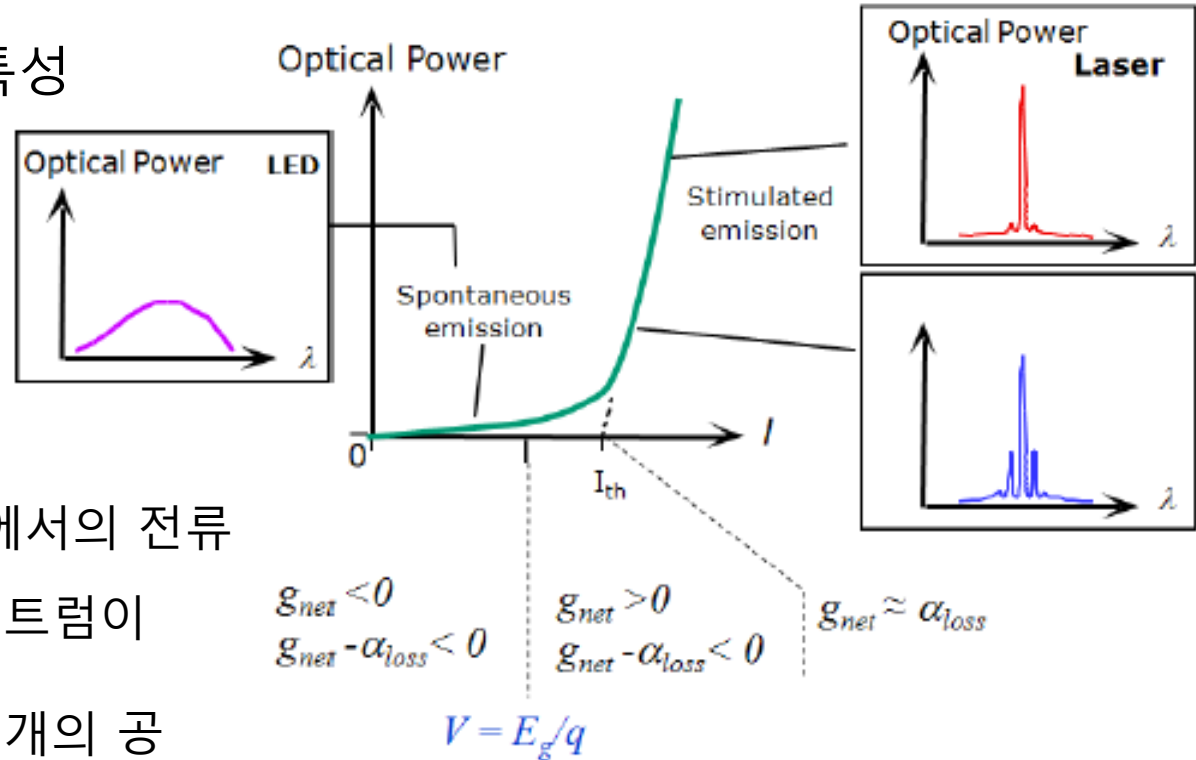
\bar{n}_1 : 공기굴절률)



제 7장 Laser Diodes

7.4 LD의 기본적인 특성

■ 전류에 대한 광출력 특성



- 문턱전류(I_{th}) : 꺾이는 점에서의 전류
- 낮은 전류에서는 출력 스펙트럼이 넓으며 자연 방출의 결과
- 문턱전류를 넘어서면 여러 개의 공진 주파수가 관찰
- 다이오드 전류가 커지면 작은 대역폭을 가진 단일모드가 지배적인 출력이 발생

제 7장 Laser Diodes

- 온도에 따른 광출력 대 다이오드 전류 특성 곡선

