

半導體레이저의 動作原理

洪 彰 禧

韓國海洋大學 電子通信工學科

1. 머릿말

정보전송이나 기록등의 분야에 있어서는 소형이며 신뢰성과 효율이 높고 대량생산이 가능한 반도체레이저(LD)가 널리 이용되고 있다. 반도체레이저라는 말은 GaAs나 InGaAsP 등 화합물반도체 재료를 사용하기 때문에 붙여지는 이름이다. 한편, 반도체레이저는 pumping mechanism에 있어서 전자 및 호-을을 주입시키는 방법을 채택하고 있기 때문에 주입형레이저(Injection Laser)라 하기도 한다. 또한 구조로 볼 때에는 pn접합 다이오드로 되어 있기 때문에 Diode Laser 또는 Laser Diode라 불리워지기도 한다.

LD는 1962년 GE, IBM 및 MIT의 각 연구팀에 의해서 독립적으로 실험에 성공하였다. 당초 LD는 액체He 온도나 액체 N₂ 온도 또는 상온에서는 주기 대 펄스폭비가 상당히 작은 (예; Duty 0.01%) 펄스로서만 동작시킬 수 있었기 때문에 실용성은 희박하였으나, 고속직접변조 가능성의 실증, 모-드 제어방법에 대한 제안 그리고 2중이종접합(Double Heterojunction) 구조도입에 의한 저전류동작 가능성등이 엿보였기 때문에 광통신용 광원으로써 주목을 받아왔다.

1970년 Bell의 연구팀은 상온연속동작이 가능한 GaAlAs/GaAs LD를 개발하였으며, 이는 오늘날 널리 상용화되어있는 LD의 개발에 있어서 가장 의미심장한 디딤돌이 되었다. 그후 1976년에는 InGaAsP/InP 결정을 이용한 파장 1.3 μ m LD가 개발되었으며, 그이후 신뢰성 향상, 단일모-드동작, 가시광, 고출력 LD들이 속속들이 개발됨으로써 명실공히 LD는 광·전자산업분야에 있어서 하나의 주요한 광원이 되었다.

LD는 출력광의 스펙트럼폭이 좁고, 또 파장정도의 직경까지 집속시킬 수가 있다. 출력은 수mW가 일반적이지만 특별한 구조를 가진 LD array는 2~3W 정도의 고출력을 내는 것도 있다. 동작전류는 10mA~100mA, 동작전압은 2~3V로써 저전력 동작이 가능하다는 특징을 가지고있으며, 통신용으로서는 수10GHz 정도까지 직접변조가 가능한 LD도 있다.

우리나라에서도 1978년서 부터는 반도체레이저에

대한 연구가 행하여져 왔으며 오늘날 CD용 LD를 생산하는 회사도 생겨나게 되었고, 통신용은 현재 실용화작업에 박차를 가하고 있는 실정이다. 따라서 지금까지 10여년간 우리나라에서도 여러학회 및 Workshop 등지에서 LD에 대한 소개가 빈번히 이루어져 왔다. 그러나, 주로 재료, 구조, 동작특성 등에 국한되어 왔었기 때문에 본고에서는 LD의 동작원리에 초점을 맞추어 소개하고자 한다.

2. LD의 발진임계전류

2.1 LD동작 파라미터

(1) 광이득계수 및 손실계수

그림 1.1 과 같이 일반적인 LD의 공진기는 두께 d (0.1~0.2 μ m), 폭 W (1~10 μ m), 길이 l (100~300 μ m)인 활성영역의 양단에 진력반사율 R (30%)의 반사경을 가진 Fabry-Perrot (FP)형이며, 분포반사기(Distributed Bragg Reflector) 등 특수한 반사기 구조를 가진경우라 하더라도 상기 FP형으로 등가화시켜 이론해석을 행해 나갈 수 있다.

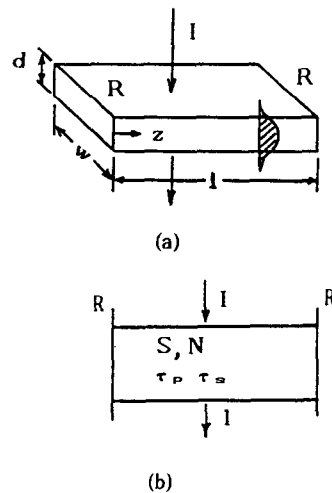


그림 2.1 LD공진기

그림 2.1 에서와 같이 전류를 흘려준다면 최초 자연발광에 의하여 발생된 광파는 활성영역을 따라 z 방향으로 진행하면서 증폭되고 이 현상이 발전으로 이어진다. 활성영역에는 광이득계수 g_b (cm^{-1}) 이외에도 광손실계수 α (cm^{-1})가 있으며, 광은 β (rad/cm)라는 전파정수를 가지고 위상변화를 하며 진행한다. 타래이저나 금속도파관 공진기와는 달리 LD는 활성영역이 이와 굴절율이 약간 다른 유전체로 둘러싸여 있기 때문에 실제로 상당한 량의 광전력은 그림에 표시되어 있는 바와같이 활성영역 밖에도 존재하게 된다. 이때 광전력이 활성영역에 갇혀 있을 수 있는 율을 광가둠계수(Optical Confinement Factor)를 Γ 라 한다면, 활성영역 안을 따라가는 광이 받는 이득과 손실계수는 다음과 같이 된다.

$$g = \Gamma g_b, \quad \alpha = \Gamma \alpha_b + (1 - \Gamma) \alpha_{ox} \quad (2.1)$$

여기서, α_{ox} 는 활성층 바깥영역의 손실계수이다. 또한 광가둠계수 Γ 는 다음식으로 정의되며 활성영역두께가 $0.1 \mu\text{m} \sim 0.2 \mu\text{m}$ 인 LD에 있어서 Γ 는 $0.2 \sim 0.4$ 정도의 값을 가진다.

$$\Gamma = \frac{\int_{-a/2}^{a/2} |E_x(y)|^2 |dy|}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_x(y)|^2 |dy|} \quad (2.2)$$

여기서, $E_x(y)$ 는 전계의 강도의 x성분이 y축에 따른 분포를 뜻한다. 광이득과 손실계수는 반도체의 밴드이론으로부터 전자와 호-울쌍에 의한 쌍극자수를 구하고 이들과 광의 전장의 세기와 상호작용에 의하여 구해진다. 반도체레이저에 있어서 광이득과 손실에 관한 이론해석은 1964년 G. Lasher와 F. Stern에 의하여 발표되었으며 오늘날 반도체레이저의 이론해석에 기초가 되고 있다.

광이득과 손실계수는 양자역학적인 수법을 이용하여 구하여지지만 막스웰방정식을 이용한 광공진기 내부의 이론해석과는 다음과 같은 연관성을 가지고 있다. 일반적으로 레이저공진기에 대한 시간독립 막스웰방정식은

$$\nabla^2 E + k_0^2 [1 + j\sigma/(\epsilon_0 \omega)] = -(k_0^2 / \epsilon_0) P \quad (2.3)$$

이다. 여기서 E 는 전장의 세기 $k_0 = 2\pi / \lambda_0$, $\omega = 2\pi c_0 / \lambda_0$, c_0 는 진공중의 광속, σ 는 도전율, ϵ_0 는 진공유전율, P 는 분극을 뜻한다. 그리고,

$$P = \epsilon_0 \chi(\omega) E \quad (2.4)$$

으로 정의되며 χ 는 전화율(Suceptibility)를 뜻한다. 한편, χ 는

$$\chi = \chi_0 + \chi_p \quad (2.5)$$

로 분리해서 나타낼 수 있으며 χ_0 는 공진기 매질의 전화율을 뜻하고, χ_p 는 활성영역에 캐리어가 주입되었을 때의 전화율이다. χ_p 는 활성영역내의 전자와 호-울의 량에 의존한다. 그리고 χ_0 , χ_p 는 복소함수이며 주파수 의존성을 가진다. (2.4)와 (2.5)의 관계를 (2.3)식에 대입시키면

$$\nabla^2 E + \epsilon k_0^2 E = 0 \quad (2.6)$$

와 같이 변형시킬 수 있으며, 여기서

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon' + j\epsilon'' \\ &= 1 + \text{Re}(\chi_0 + \chi_p) \\ &\quad + j\{ \text{Im}(\chi_0 + \chi_p) + \sigma/(\epsilon_0 \omega) \} \end{aligned} \quad (2.7)$$

이다.

z의 정방향으로 진행하는 평면파라고 가정한다면, (2.6)식의 해는

$$E = E_0 e^{j\beta z} \quad (2.8)$$

로 주어지며, 복소전파정수 β 는 (2.8)식을 (2.6)식에 대입한다면 다음과 같이 구해진다.

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon} = k_0 \bar{n} = k_0 \{n + ja/(2k_0)\} \quad (2.9)$$

여기서 n 는 복소굴절율, n 는 매질의 굴절율, a 는 손실과 이득을 포함하는 계수를 뜻한다. 보통 $a \ll k_0 n$ 이므로 (2.9)식의 실수부와 허수부는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$n = \{1 + \text{Re}(\chi_0 + \chi_p)\}^{1/2} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} a &= k_0 \epsilon'' / n \\ &= (k_0 / n) \{ \text{Im}(\chi_0 + \chi_p) + \sigma/(\epsilon_0 \omega) \} \end{aligned} \quad (2.11)$$

여기서, $\text{Im}(\chi_0) + \sigma/(\epsilon_0 \omega)$ 는 매질의 손실을 뜻하며, $\text{Im}(\chi_p)$ 는 전자-호울의 주입에 의하여 얻어지는 이득을 뜻한다. 따라서, 주입에 의하여 얻어지는 순이득을 g_b 라 한다면

$$g_b = - (k_0 / n) \text{Im}(\chi_0 + \chi_p) \quad (2.12)$$

이고, 매질의 ohm 손실은

$$\alpha_b = k_0 \sigma/(\epsilon_0 \omega n) \quad (2.13)$$

로 쓸 수 있다.

이는 $\text{Im}(\chi_0 + \chi_p)$ 가 부일 때에는 α_b 와 함께 광손실이 일어나지만 $\text{Im}(\chi_0 + \chi_p)$ 가 정이면서 $g_b > \alpha_b$ 일 때는 증폭이 일어남을 뜻한다. 이와같이 레이저이득과 직접적인 관계를 가지고있는 전

화율 $\text{Im}(\chi)$ 는 밀도행렬의 기법을 이용한 양자역학적인 방법을 이용하여 구해낼 수 있다.

완화효과를 고려한 2준위 밀도행렬요소의 운동방정식과 전기쌍극자 모우먼트의 상호작용을 가정한다면 전화율의 허수부분은 다음과같이 구할 수가 있다.

$$\text{Im}(\chi) = \frac{\{n^2 B / (\omega \tau_{cv}^2)\} (N_c - N_v)}{(\omega - \omega_{cv})^2 + 1/\tau_{cv}^2} \quad (2.13)$$

여기서 B 는 유도방출확률과 관계있는 아인슈타인 B 계수이고 τ_{cv} 는 전자와 호몰이 자기상태에 존재할 수 있는 수명 즉 완화시간(Relaxation time)이고 ω 는 광의 주파수, ω_{cv} 는 에너지준위차에 의한 주파수이며 N_c, N_v 는 각각 전도대와 가전대에 있는 전자의 밀도를 나타낸다. 실제 레이저 발진은 $\omega \approx \omega_{cv}$ 에서 일어나므로 (2.13)식은 다음과 같이 간단히 쓸수있다. 반도체레이저에 있어서 τ_{cv} 는 보통 $\sim 10^{-13}$ 초 정도로 알려져 있다.

$$\text{Im}(\chi) = - (n^2 B / \omega) (N_c - N_v) \quad (2.14)$$

따라서 이를 (2.12)식에 대입한다면

$$g_b = (nk_0 / \omega) B (N_c - N_v) \\ = B(N_c - N_v) / c = G / c \quad (2.15)$$

가 된다. 여기서 $c = c_0 / n$ 로써 매질속의 광속을 뜻하며, g_b (cm^{-1})를 단위진행거리당 이득이라고 한다면 G 는 sec^{-1} 로써 단위시간당 이득을 뜻한다.

(2) 광자수명

그림 2.1과 같은 광공진기의 임의의 지점에서 발생한 광이 1왕복하는 과정에서 받은 손실은 $R^2 e^{-2\alpha l}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 α 는 (2.1)식에서 정의된 손실계수이다. 1왕복하는데 걸리는 시간 $t = 2l/c$ 사이에 광의 에너지는 e^{-t/τ_p} 만큼 감소하므로 다음과 같은 등가적인 관계가 성립한다.

$$R^2 e^{-2\alpha l} = e^{-t/\tau_p} = e^{-2l/c\tau_p} \quad (2.16)$$

이식으로부터 광자의 수명 τ_p 는 다음식과 같이 정의된다.

$$\tau_p = 1 / [c \{ \alpha l + \ln(1/R^2) \}] \\ = 1 / [c \{ \alpha + (1/l) \ln(1/R^2) \}] \quad (2.17)$$

반도체레이저에 있어서 τ_p 는 보통 $\sim 10^{-12}$ 초 정도로 알려져있다. 이는 직접변조로도 10^{-12} 초 정도의 초단 광펄스를 얻어낼 수 있음을 암시하고 있다.

(3) 전자의 수명

전자의 수명은 전자의 천이상태 및 주입된전자가 누설되거나 비발광결함은 하는 율등에 의해 달라진다. 따라서, 전자의 수명은 크게 발광재결합수명과 비발광천이에 의한 수명으로 나누어볼 수 있다. 비발광천이중 가장 영향이 큰것은 Auger효과라 불리워지는 천이과정으로써 이는 밴드내에서 두개의 전자 또는 호몰이 충돌에 의하여 천이하는 과정을 말하고 있다.

한개의 전자와 호몰이 발광재결합을 하는 확률을 B_r 라 한다면 발광재결합수명 τ_r 은 다음식으로 주어진다.

$$1/\tau_r = B_r (P_0 + N) \\ \approx B_r N \quad ; P_0, N_0 \ll N \quad (2.18)$$

여기서 P_0, N_0 는 각 소수캐리어의 농도이며 N 은 주입전자의 농도를 뜻한다. 그리고, B_r 은 양자역학적 이론해석으로부터 구할 수가 있으며 측정결과에 의하면 $1 \sim 3 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{sec}$ 정도의 값을 가지는 것으로 알려져있다.

한편 Auger 효과가 일어나는 확률을 C_r 이라한다면 이는 2개의 전자 또는 호몰의 충돌에 의하여 일어나므로 이때 비발광천이 수명을 τ_{non} 이라 할때 이는 전자또는 호몰밀도의 2승과 천이해 들어갈 호몰 또는 전자의 밀도와의 곱에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$1/\tau_{non} = C_r (N_0 + P) (P_0 + N) \quad \text{or} \\ = C_r (P_0 + N)^2 \quad (2.19)$$

따라서, 주입된 전자의 수명 τ_s 는 종합적으로 다음과 같이 쓸수가 있다.

$$1/\tau_s = 1/\tau_r + 1/\tau_{non} \\ = B_r (P_0 + N) + C_r (P_0 + N) \\ \approx B_r N + C_r N^2 \quad ; P_0, N_0 \ll N \quad (2.20)$$

여기서, 발광결함에 대한 비발광결함의 비율은 재료와 파장대에 따라 다르며 $0.85 \mu\text{m}$ 파장대의 AlGaAs/GaAs 계의 재료에서는 비발광결함은 무시할수 있을 정도로 작으나 $1.55 \mu\text{m}$ InGaAsP/InP 계에 있어서는 비발광결함비율이 50%에 달하는 경우도 있다. 일반적으로 반도체레이저에 있어서 τ_s 는 $\sim 10^{-9}$ 초 정도이다.

2.2 율속방정식 (Rate Equation)

(2.3) 식에서 E, P 를 각각 공간과 시간에 대해서 천천히 변화하는 성분 E_s, P_s 와 광의 주파수로 변하는 $e^{j(\omega t - k_0 z)}$ 의 곱으로 표현하고 $\partial^2 E_s / \partial t^2$ 과 같은 미소변화항을 무시하는 한편, 일정한 위치에서 관측하는 것으로 한다면 즉 $\partial / \partial z = 0$ 를 가정한다면 다음과같은 공간독

립 미분방정식을 얻어낼 수가 있다.

$$\partial E_{\omega} / \partial t = - \{ \text{Im}(\chi) + \kappa / (\epsilon_0 \omega) \} (\omega / 2n^2) E_{\omega} - j \{ \text{Re}(\chi) \omega / (2n^2) \} E_{\omega} \quad (2.21)$$

윗식의 양변에 E_{ω}^* 을 곱해주고 복소공역을 더해 준다면 다음과 같은 방정식이 얻어진다.

$$\partial (E_{\omega} E_{\omega}^*) / \partial t = - \{ \text{Im}(\chi) + \kappa / (\epsilon_0 \omega) \} (\omega / n^2) E_{\omega} E_{\omega}^* \quad (2.22)$$

여기서

$$S = (1/2) \epsilon |E_{\omega}|^2 / (\hbar \omega) \quad (2.23)$$

와 같은 관계를 가지고 있으므로 (2.22)식은

$$\partial S / \partial t = - \{ \text{Im}(\chi) + \kappa / (\epsilon_0 \omega) \} (\omega / n^2) S \quad (2.24)$$

이 되고 (2.14)식의 관계를 이용하면

$$\partial S / \partial t = B (N_c - N_v) S - \{ \kappa / (\epsilon_0 \omega) \} S \quad (2.25)$$

그런데, 반도체 내에서는 그림 2.2 a에 나타나있는 바와같이 주입전자밀도 N 이 어떤 일정한 전자밀도 N_{th} 이상이 되어야만 증폭작용이 일어난다. 따라서 현상론적인 표현으로 $N_c - N_v = N - N_{th}$ 와같이 사용하는것이 일반적이다. 그리고, $\kappa / (\epsilon_0 \omega) = 1/\tau_p$ 이므로 (2.25)식은 다음과 같이 쓸수있다.

$$\partial S / \partial t = B (N - N_{th}) S - (1/\tau_p) S \quad (2.26)$$

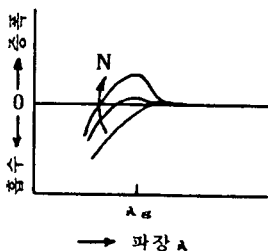
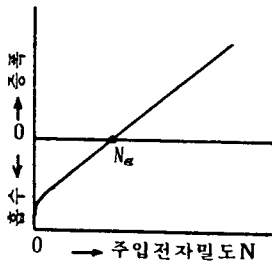


그림 2.2 LD에 있어서 광의 증폭

한편, 2준위계에 있어서 준위 c 에 있는 전자밀도 N 이 시간적인변화를 하는율은 다음식으로 나타낼수있다.

$$\partial N / \partial t = - B (N - N_{th}) S - N / \tau_{\omega} + I / eV_{th} \quad (2.27)$$

(2.27) 식의 우변 제 1항과 2항은 각각 전자의 유도방출시간을 및 자연방출시간을 나타내고 있으며 제 3항은 주입전자밀도로써 I 는 전류 e 는 전하량 V_{th} 는 활성영역의 체적을 의미하고있다. (2.26)식과 (2.27)식을 반도체레이저의 율속방정식 (Rate Equation) 이라고 한다.

2.3 발진임계전류

정상상태에 있어서는 $\partial / \partial t = 0$ 가 되므로 (2.26) 및 (2.27)식은 다음과 같이 된다.

$$\{ B(N - N_{th}) - 1/\tau_p \} S = 0 \quad (2.28)$$

$$B(N - N_{th}) S + N / \tau_{\omega} = I / (eV_{th}) \quad (2.29)$$

여기서, 레이저발진이 일어나는 임계전류 I_{th} 이하에서는 레이저광출력이 거의 0이기때문에 (2.29)식에서 $S=0$ 라 한다면

$$N = \tau_{\omega} / (eV_{th}) I \quad (I < I_{th}) \quad (2.30)$$

이 되고, 주입전자밀도 N 는 전류 I 에 비례하여 증가한다. 한편, 발진상태에 있어서는 $S \neq 0$ 이므로 (2.28)식에서

$$N - N_{th} = 1 / (\tau_p B) \quad (I \geq I_{th}) \quad (2.31)$$

이 된다. 즉 N 은 I 에 의존함이 없이 일정한값을 가진다. 이 N 값을 N_{th} 라 한다면 율식은

$$N_{th} = N_{th} + 1 / (\tau_p B) \quad (2.32)$$

가 된다. 여기서, 레이저발진에 필요한 임계전류 I_{th} 는 (2.32)식을 (2.30)식에 대입하여

$$I_{th} = (eV_{th} / \tau_{\omega}) (N_{th} + 1/\tau_p B) \quad (2.33)$$

를 얻어낼 수가 있다. 보통 $\tau_{\omega} \approx 1ns$, $\tau_p \approx 1ps$, $B \approx 10^{-6} cm^3/s$, $N_{th} \approx 10^{18} cm^{-3}$, $V_{th} = 0.2 \mu m \times 5 \mu m \times 300 \mu m = 3 \times 10^{-10} cm^3$ 이므로 I_{th} 는 약 96mA 정도가 된다.

2.4 광출력

(2.32)식과 (2.33) 식의 관계를 이용하여 (2.29)식을 고쳐쓰면 공진기내부에 존재하는 광자밀도 S 는 다음과 같이 쓸수있다.

$$S = \{ \tau_p B / (e V_{th}) \} (I - I_{th}) \quad (2.34)$$

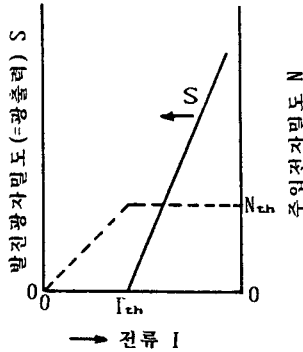


그림 2.3 발진광자밀도와 주입전자밀도의 전류의존성

그림 2.3은 전류에 따른 광자밀도와 주입전자밀도와 관계를 도시한것이다. 그림과 같이 주입전자는 $I \geq I_{th}$ 에서 갑자기 직선적으로 증가함을 알 수가 있다.

반사경을 통하여 외부에 방출되는 광출력 P는 광자의 에너지 $h\nu = E_g$ 및 반사경에 의한 광손실 $\tau_m = 1/(c \ln(l/R))$ 에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

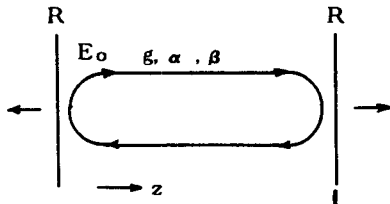
$$P = h\nu SV_n / \tau_m = \eta_d V_g (1 - I_{th}) \quad (2.35)$$

여기서, η_d 는 미분양자효율이라고 불리우지며, V_g 는 E_g/e 로써 pn다이오드 접합양단에 걸리는 전압을 뜻한다. 이 미분양자효율 η_d 는 광출력의 효율을 나타내며, 반도체레이저의 양·부를 나타내는 주요한 파라메터이다.

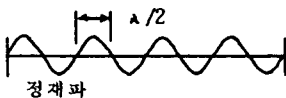
3. 반도체레이저의 발진파장과 증폭이득

3.1 1 왕복 광증폭이득

이 절에서는 발진에 필요한 이득조건과 발진파장조건들을 소개하고자한다.



(a)



(b)

그림 3.1 LD에 있어서 광의 증폭과 공진

우선 그림 3.1과 같이 $Z=0$ 에서 광전계 $E=E_0 e^{j\omega t}$ 가 진행을 시작했다면 점 z에서의 광전계의 증폭계수는 광강도의 1/2이 되기때문에

$$E(z, t) = E_0 e^{j\omega t} e^{j(\alpha-\alpha)z/2} e^{-j\beta z} \quad (3.1)$$

이 된다. 여기서 ω 는 광파의 각주파수, β 는 z방향의 전파정수 $\beta=2\pi n/\lambda$ 이며, n은 매질의 등가 굴절률, λ 는 진공중의 광파장을 뜻한다. 광이 z=l인 거울에 도달하면 광의 전계는 \sqrt{R} 의 반사를 받고

$$E(l, t) = \sqrt{R} E_0 e^{j\omega t} e^{j(\alpha-\alpha)l/2} e^{-j\beta l} \quad (3.2)$$

이된다. 이와 같이하여 1 왕복후의 광파의 전계는

$$E(2l, t) = \sqrt{R} \sqrt{R} E_0 e^{j\omega t} e^{j(\alpha-\alpha)l} e^{-j2\beta l} \quad (3.3)$$

이된다.

3.2 발진조건

만일 1 왕복후 전계의 크기 및 위상이 다음식과 같이 최초의 전계의 그것과 같다면 발진이 지속되고, 이것이 발진조건이 된다.

$$E(2l, t) = \sqrt{R} \sqrt{R} E_0 e^{j\omega t} e^{j(\alpha-\alpha)l} e^{-j2\beta l} = E_0 e^{j\omega t} \quad (3.4)$$

이 식으로부터 다음과 같은 발진조건을 도출해낼 수 있다.

$$R e^{(\alpha-\alpha)l} e^{-j2\beta l} = 1 \quad (3.5)$$

이 식을 실수부와 허수부로 분리한다면 실수부가 발진에 필요한 광증폭이득을 결정하는 전력조건, 허수부가 발진파장을 결정하는 위상조건이 된다.

$$R e^{(\alpha-\alpha)l} \cos(2\beta l) = 1 \quad \text{전력조건} \quad (3.6)$$

$$R e^{(\alpha-\alpha)l} \sin(2\beta l) = 1 \quad \text{위상조건} \quad (3.7)$$

3.3 발진파장과 임계치 이득

(3.7) 식에서 $Re^{(\alpha-\alpha)l}$ 은 0이 아니므로 $\sin(2\beta l) = 0$ 가 되어야하며 따라서

$$2\beta l = 2\pi m \quad (m = 1, 2, 3 \dots) \quad (3.8)$$

이 되어야 한다. 따라서 발진파장은

$$\lambda = 2l n / m \quad (3.9)$$

가 되어야 한다. 반도체레이저에 있어서는 공진기 길이 l은 보통 300 μm 정도, n=3.5정도 이기때문에

$\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ 라한다면 공진기내에는 약 $m=2500$ 정도의 정재파가 존재할수 있다. 정수 m 가 ± 1 변화했을때 공진파장의 변화, $\delta \lambda$ 는 다음식과 같이 된다.

$$\delta \lambda = -\lambda^2 / (2n_{\text{eff}}) \quad (3.10)$$

여기서 n_{eff} 는 실효굴절률로써

$$n_{\text{eff}} = n - (\partial n / \partial \lambda) \lambda \quad (3.11)$$

이다.

한편, 임계치이득은 (3.8) 식의 관계를 (3.6) 식에 대입시키면 $\cos(2\beta l) = 1$ 이된다. 따라서 (3.6) 식은

$$\text{Re}(\alpha - \alpha l) = 1 \quad (3.12)$$

이되고 이식으로부터 발진에 필요한 임계치 이득 g_{th} 는

$$g_{\text{th}} = \alpha + (1/l) \ln(1/R) \quad (3.13)$$

이된다.

반도체레이저는 (2.13)식에 소개하였듯이 발진이득은 전도대의 전자와 가전자대의 호몰의 에너지 준위가 가지는 broadening 영향때문에 $\Delta \omega \approx 1/\tau_{\text{cov}}$ 의 대역폭을 가지게 되며 이를 파장폭으로 나타내면

$$\Delta \lambda = -\lambda^2 / (2\pi c \tau_{\text{cov}}) \quad (3.14)$$

가 된다. 여기서 $\tau_{\text{cov}} \approx 10^{-13}$ s 이므로 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ 라고 한다면 유도방출이득폭은 약 30~40 Å 정도가 된다.

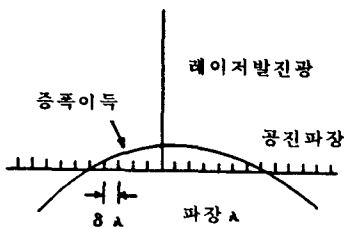


그림 3.2 LD의 공진파장과 증폭이득

한편, (3.10)식에서 $\delta \lambda$ 는 약 3~4 Å 정도가 되므로 그림 3.2에 나타나 있는바와같이 10개 정도의 파장이 발진하게 된다. 그런데, 잘만들어진 반도체레이저에 있어서 정상상태에서의 발진 파장은 단일로 될 수가 있다. 이는 가장 이득이 큰 파장이 우선

발진하게 되면 이 발진 모드가 파장이 약간다른 인접 공진모드의 이득을 억제 시켜버리는 효과가 있기 때문이다.

보통 FP형 LD에 있어서 TE모드의 반사율은 TM모드의 반사율에 비하여 수십% 크기 때문에 일반적인 LD는 주로 TE도파로 모드만이 발진을 하게 된다.

3.4 반도체레이저의 스펙트럼폭

타레이저에 비하여 반도체레이저는 공진기의 길이가 짧기때문에 자연방출광이 레이저 광출력에 포함되는율이 훨씬크며, 주입전자·호몰이 잡음형태로써 불규칙하게 변동하는 현상과 온도, 주입전하량의 변동등에 의하여 활성층의 굴절율이 변동하는 영향때문에 반도체레이저의 스펙트럼폭 Δf 는 타레이저에 비하여 대단히 넓다.

일반적으로 스펙트럼폭 Δf 는 다음식으로 기술하고있다.

$$\Delta f = Cs / (2\pi \tau_p) \cdot \{(1 + \alpha^2) / (1 / I_{\text{th}} - 1)\} \quad (3.15)$$

여기서 Cs 는 자연방출광이 발진스펙트럼에 포함되는 율로서

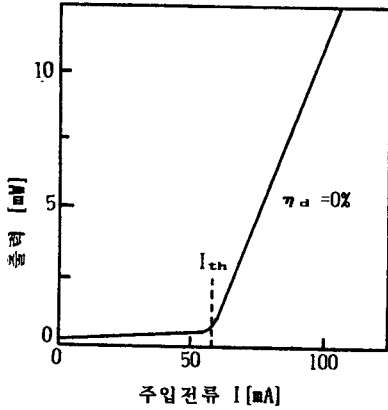
$$Cs = \Gamma \lambda^4 / (4\pi^2 n^3 \Delta \lambda V_a) \quad (3.16)$$

으로 표현되며 일반적으로 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 정도의 값을 가지는것으로 알려져있다. 한편, α 는 캐리어변화에 따른 굴절율의 변화와 이득의 변화의 비로써 반도체레이저의 Δf 를 평가하는 중요한계수이다. 보통 α 의 값은 레이저의 매질과 구조에 따라 달라서 2~6 정도가 된다는것이 알려져있다. (3.6)식에서 알수있듯이 Δf 는 제적에 반비례하는 한편, 반도체레이저가 타레이저에 비하여 제적이 대단히 작기때문에 Δf 가 그만큼 크게되고 잘설계된 LD인 경우라도 $\Delta f \approx 10$ MHz 정도이다.

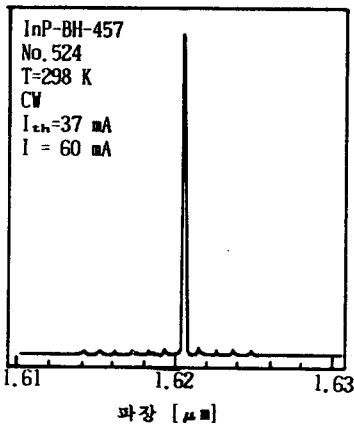
4. 반도체레이저의 정특성

4.1 광출력 대 전류의 정특성

보통 반도체레이저의 길이는 200 ~ 300 μm , 활성층의 폭이 1 ~ 5 μm , 두께가 0.1 ~ 0.2 μm 정도이다. N_a 는 $\sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이다. 이때문에 동작전류밀도는 1 ~ 3KA/cm² 정도로 매우높다. 그림 4.1은 InGaAsP/InP 계 LD의 실제적인 동작특성을 보여주고있다. 그림에서 알수 있듯이 I_{th} 이하에서는 자연방출광에 의한 미약한 광출력이 방출되지만 I_{th} 이상에서는 강력한 레이저출력이 방출된다. 이 광출력의 미분양자효율 η_d 는 GaAlAs/GaAs 계의 LD인경우 70 ~ 80%, InGaAsP/InP계의 LD인경우 40 ~ 70% 정도로 대단히 높다. 그림 4.1의 b에 보여주고 있는 바와같이 직류동작에서는 거의 단일모드 동작을 하지만 3.3 절에서 설명하였듯이 약 10개의 모드가 형성되어 있음을 볼 수가 있다.



(a) 광출력 · 전류특성



(b) 발진파장 (직류동작시)

그림 4.1 LD의 발진특성

한편, 레이저 동작시 인가전압은 거의 일정하여 각파장의 에너지간격에 해당되는 전압은 GaAlAs/GaAs 계 LD인 경우 1.4~1.6V, InGaAsP/InP 계 LD인 경우 0.7~0.9V정도이다.

4.2 임계전류값의 온도의존성 및 계특성

LD는 반도체재료를 사용하고 있기때문에 타레이저에 비하여 온도에 따른 I_{th} 와 발진파장의 변화가 심하다. I_{th} 의 온도에 따른 변화는 이론적으로도 해석 가능하지만 일반적으로는 다음과 같은 경험적인 식에 의하여 평가해 나가고 있다.

$$I_{th} = I_0 \exp(T/T_0) \quad (4.1)$$

여기서, T_0 는 특성온도로서 GaAs계 LD인 경우 120°C 정도, InGaAsP/InP 계 LD인 경우 40~70°C 정도가 된다. 따라서, LD를 통신이나 CD 및 프린터의 광원등 시스템에 이용할때는 온도보상회로를 부가시

켜 주어야하는 난점을 안고있다.

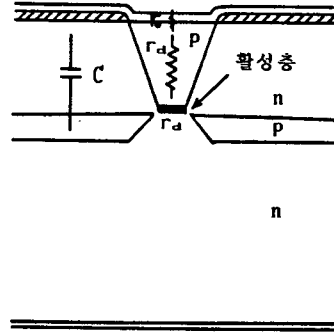


그림 4.2 LD의 전기회로정수

한편, 그림 4.2에 나타나있는 바와같이 LD는 전기적으로 볼때 활성층의 미분저항 r_a 와 확산저항 r_o , 전극접촉저항 r_o 로 구성되는 직렬저항과 전극간에 병렬로 걸리는 부유용량 C 를 가지고 있다. 직렬저항은 활성층 폭이 좁으면 좁을수록 커지고 C 의 값은 전극면적에 비례한다. 일반적으로 직렬저항은 1~10Ω정도이고 C 는 1~10pF정도이다.

LD의 출사단면은 파장에 비하여 꽤 작기때문에 광출력의 출사각은 수십도정도로 타레이저에 비하여 대단히크다. 한편, 최대 광출력은 전류에 의한 온도상승에 의하여 제한되지만 주로 반사경이 견딜수 있는 최대 광출력밀도 (GaAs계 LD인 경우 20~30 MW/cm²정도)로 제한되는 경우가 많다. 일반적으로는 10 mW 내외이고 특수한 구조를 택한 경우는 100~200 mW정도의 출력도 얻어내고 있다.

4.3 발진파장의 정특성

LD는 앞에서 지적하였듯이 직류동작에서는 단일모드로 발진하지만 주위온도나 전류가 증가하면 활성층의 온도가 상승하여 천이에너지 간격이 단축되므로써 발진파장이 변화하게된다. 그림 4.3은 이와 같은 현상을 그림으로 나타낸것이다.

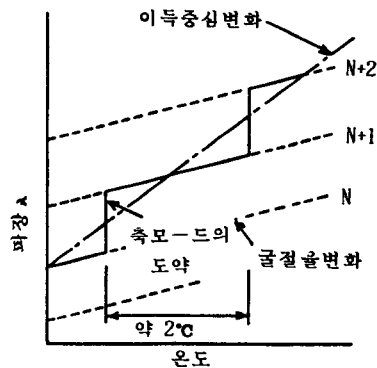


그림 4.3 LD의 발진파장의 온도변화

그림에 나타나있는 바와같이 온도의 증가에 따라 발진모드—는 인접 모드—로 도약을 하게되고 이때 모드—도약 온도간격은 대략 2~3 °C 정도이다. 한 모드—의 파장은 온도 상승에 따른 굴절률 변화에 의하여 0.1°C (GaAs) 정도의 온도계수로 변화를 하게되며, 모드—도약을 포함한 파장의 변화는 3Å/°C 정도이다.

5. 반도체레이저의 개발현황 및 장래

지금까지 반도체레이저의 동작특성을 이해하는데 필요한 기초적인 동작원리와 개념들을 간추려서 소개하였다. 반도체레이저는 소형이고, 대량생산이 가능하며, 고효율 및 신뢰성이 높고 또 직접고속변조라는 간단한 변조방식을 채택할수 있다는 장점을 가지고 있기때문에 산업소자로서 갖추어야할 여건을 완비한 셈이다. 그러나, 단색성, 지향성 및 고출력성등 레이저의 성능면에서 본다면 타레이저에 비하여 비교할 수 없을 정도로 열악한 사정에 있었다. 1960~1979년 사이에는 상온연속발진, 1970~1980년 사이에는 신뢰성확보(수명)에 주력을 기울였었고, 1970년대 말에는 연속동작 100만시간에 가까운 LD도 만들어 내게되어이제 신뢰성문제는 크게 염려할 필요가 없어지게 되었다. 따라서, 1980년대에 들어서면서는 레이저가 레이저다운 성능을 가지게끔하기 위하여 부단한 노력이 경주되었으며, 그후 10여년이 지난 오늘날 상당한 성능개선이 이루어진 편이다.

5.1 단색성

반도체레이저는 재료적, 구조적으로 단색성확보가 어려운 장치이다.

재료적인 측면: 반도체재료는 에너지대와 대사이 에 천이하는 성질을 가지고있기때문에 준위와 준위사이에 천이하는 타레이저 ($8\text{Å} \sim 10^{-6}\text{Å}$) 에 비하여 넓게 ($8\text{Å} \sim 10^{-3}\text{Å}$) 마른다. 따라서 이문제를 양자우물구조 및 외부공진기등 구조적으로 해결해 나가기 위한 연구들이 진행중에 있는 반면, 에너지대내에 준위를 형성할수있는 불순물을 선정하여 이문제를 해결해 볼려는 연구도 시도되고 있다.

1차원 양자우물구조인 경우에는 $8\text{Å} \sim 10^{-4}\text{Å}$ 까지 보고가 있으며, Bragg 반사기를 가진 LD의 경우는 $\sim 5 \times 10^{-5}\text{Å}$ 정도까지도 안정화시키고 있는 실정이다. 한편, 외부공진기에 위상동기를 건 LD일 경우에는 10^{-6}Å 대역의 단색성도 실현될수 있음이 입증되어 있기때문에 향후 2차원 및 3차원 양자우물구조의 LD가 개발되고 여기에 위상동기방법을 채택한다면 타레이저에 못지않는 단색성도 확보될 것으로 기대된다.

5.2 지향성

반도체레이저의 출사단면은 $1\mu\text{m}$ 미만이므로해서 출사각 (θ) 은 타레이저 ($\sim 0.01^\circ$) 에 비하여 대

단히 큰 10° 정도이다. 이 문제를 개선하기 위한 방법으로 위상동기된 레이저배열(array)에 대한 연구가 이루어지고 있으며 현상으로는 40개의 배열로써 0.1° 의 지향성을 얻어내고 있는 실정에 있다. 향후, 위상동기된 면발광 레이저나 2차원 단면배열을 가진 LD가 개발이 된다면 지향성 문제에 있어서도 타레이저의 성능에 접근시킬수 있을 것으로 보인다.

5.3 고출력

반도체레이저의 효율은 타레이저에 비하여 엄청나게 좋으나 소형이고 출사단면적이 작기때문에 출력은 근본적으로 타레이저에 비하여 작은 편이다. LD의 고출력은 주로 반사경이 지평할수 있는 광전력밀도에 의하여 제한되기 때문에 반사경의 반사율을 줄여준다면지 출사단면적을 넓게한 구조를 택할 경우에는 200~300 mW의 광출력도 얻어낼수가 있다. 그리고 위상동기를 걸어준 LD배열을 이용하면 이 출력을 배가시킬수도 있다. 현재 40개의 LD배열을 행하여 2.5 W 정도의 출력을 얻어내고 있는 실정이나 면발광 LD배열 또는 2차원 단면LD배열등의 구조를 택하면 수십 W의 출력도 기대해 볼 수 있을것이다.

5.4 고속변조 및 초단광펄스 발생

반도체레이저가 광통신용소자로서 각광을 받게된 이유중 하나가 고속 직접변조가 가능하다는 것이다. 그리고, 현재 상용화되어 있는 변조방식은 모두 직접변조방식을 채택하고 있는 실정이다. 그런데, GHz이상의 직접변조를 걸었을 경우에는 공진현상에 의하여 carrier의 유동이 심하게 일어나게되며 이는 곧 메질의 굴절률을 변화하게하여 발진신폭의 증가와 불안정성을 동반하게 된다. 이는 광섬유통신의 전송대역폭을 제한시키는 근본적인 원인이 되기 때문에 이를 해결하기 위하여 Bragg 반사기 구조 또는 multi section 구조등에 의한 동적 단일모드 LD들이 제안되어 끈질긴 연구가 지속되고 있다. 현재 2Å 이하의 선폭을 유지하면서 2~3GHz의 변조, 또는 6Å 정도의 선폭을 유지하면서 10 GHz이상의 변조를 건 경우들이 보고되고 있다. 향후, 이 분야에 있어서도 3차원 또는 2차원 양자우물구조의 LD가 개발되면 성능이 더욱 향상될것으로 기대된다. 한편, 타레이저에서는 fs 급 초단광펄스 발생이 가능한 것으로 알려지고 있으나, 반도체레이저의 경우는 gain스위칭기술을 이용하면 수ps급 펄스를 얻어낼수 있는 것으로 알려져 있다. 한편, 반도체레이저에 초단펄스의 변조를결면 적색편이의 chirpping 현상 ($8\text{Å} \sim 10\text{Å}$) 이 있기때문에 광섬유의 분산특성을 이용한다면 광펄스의 압축이 가능하다. 이현상을 이용한다면 수백 ps 미만의 광섬유를 이용하여 수십ps의 광펄스도 ps미만의 광펄스로 정형해낼 수 있는 가능성이 엿보인다. 최근 이에 대한 연구도 진행되고 있

는 실정이다.

6. 맺음말

본고에서는 반도체레이저의 개념과 원리를 이해하는데 필요한 기초적인 내용들 소개하는 한편, 반도체레이저의 개발현황에 대하여서도 요약 소개하였다. 끝으로 표에는 반도체레이저의 제작기술에 대한 국내의 기술현황 및 개발목표 또는 방향등에 대하여 정리해 보았다.

뚜렷하게 용도를 구분지을 수는 없으나 대체적으로 볼때 레이저의 고성능쪽은 통신과 정보처리용으로 사용될것이고, 고효율, 고지향성은 군사용 및 일반 광전자산업용으로 이용될 것으로 생각된다. 표에서 파장과 OEIC분야는 기술개발이 완료된 연후에는 결국 고성능 고효율쪽으로 구분되어 지겠지만, OEIC는 아직 개념형성 및 기초기술확립단계에 불과하며 파장에 있어서 7800Å~8500Å대역 및 1.3 μm ~1.5 μm 대역은 이미 상용화단계에 들어서 있지만, 보다 단파장 또는 보다 장파장쪽 반도체레이저에 대하여서는 아직 재료탐사 및 기초기술개발 단계에 있다.

표에서 알 수 있듯이 거의 모든 부문에 걸쳐 선진기술은 실용화 및 상용화단계에 들어서 있는데 반해 국내기술은 불과 중요한 몇몇 부문만 제외하고서는 아직도 대부분 미착수상태에 있다.

표에 나타나있는 규격과 성능을 가진 반도체레이저를 제작하기 위하여는 우선 재료 (고순도 반도체재료 정제기술), 단결정성장기술, heteroepitaxial 기술, 공정기술, 측정분석기술등이 필요하다.

이 모든문제들을 향후 5~10여년 내에 소정의 수준까지 끌어올린다는 것은 숙련된 연구인력, 장비, 연구지원등의 면에서 볼때 상당한 무리가 따르리라 예상된다. 재료는 상당한 기술축적이 있어야 하는 분야이므로 별도의 장기적인 계획을 수립하여 추진해 나가도록하고, 나머지부분은 한데 묶어 우리나라 관련 모든 학술, 연구기관이 협력하여 마치 한 연구기관 안에 소속되어 있는 것과 같은 정도의 조직력을 발휘하기만 한다면, 현재 반도체 소자산업이 마련해 놓은 기반이 어느정도 되어 있기때문에 향후 5년이나 10년내에 소정의 목표달성은 낙관적이라 볼 수 있다.

표. 국내외 LD 기술의 비교

분야	내용	기술 정도		선진기술의 목표 또는 연구방향	
		선진	국내		
고성능	단일모드	0	△	상용화	
	고속변조	50 GHz	×	100 GHz 이상	
	파장가변	20 Å	△	100 Å, 실용화	
	파장다중	5 파	×	수십파, 상용화	
	저전류	2 ~5mA	20~50mA	1mA 이하	
고출력	단일칩	200mW	×	~300mW, 실용화	
	Array	2.5W	△	~10W, 실용화	
	지향성	0.1°	×	0.1° 미만, 실용화	
파장	가시광	7800 Å	0	△	고출력, 대량생산
		6000 Å	6200 Å	×	5000 Å 미만, 실용화
	1.3 ~1.5 μm	0	실용화	대량생산, 고성능화	
	2 μm 이상	2.8 μm	×	실온연속동작, 실용화	
OEIC용		△	×	실용화	

0 : 확립, △ : 착수, × : 미착수