

半導體레이저의 高調波 찌그리짐 特性

孫珍鉉 · 柳大根 · 洪彰禧

The Higher Harmonic Characteristics of Lases Diodes

Son Jin-Hyun · Ryu Dae-Keun · Hong Tchang-Hee

<目 次>

- | | |
|-------------------------|---------------------|
| 1. 序 論 | 3.2 自然放出係數 |
| 2. 半導體레이저의 動作特性 | 3.3 光子壽命 |
| 2.1 運動方程式 | 3.4 擴散效果 |
| 2.2 動作係數들의 性質 | 3.5 變調電流 찌그리짐의 影響 |
| 2.3 發振開始近傍에서의 特性 | 4. 檢 討 |
| 2.4 高調波特性實驗 | 4.1 아날로그 變調可能 대역폭 |
| 3. 高調波特性을 利用한 動作係數값의 推定 | 4.2 各 係數값들의 推定에 대하여 |
| 3.1 電荷의 自然放出壽命 | 5. 結 論 |

Abstract

It is pointed out that the higher harmonic characteristics of laser diodes are useful to measure the values of laser diode parameters. In this work, the values of carrier lifetime τ_s , photon lifetime τ_p , spontaneous-emission pactor C, and carrier diffusion parameter W/L of a AlGaAs laser diode were measured by the characteristics as $\tau_s \sim 0.85\text{ns}$, $\tau_p \sim 0.85\text{ps}$, $C \sim 5 \times 10^{-5}$, and $W/L \sim 3 \sim 5$, respectively,

Furthermore it is mentioned that the driving current distortion of laser diode severely influences the harmonic distortion of light output.

1. 序 論

光섬유通信用 光源으로서는 半導體레이저가 使用되고 있다. 이러한 반도체레이저는 極小型이며, 高效率, 長壽命이기 때문에 通信用光源으로서는 他레이저에 비하여 훨씬 有利的한 條件을 갖춘 素子이며, 한편 이러한 特長에 덧붙여 直接 變調方式을 써서도 數GHZ라는 超高速變調를 結 수 있기때

문에 大容量情報傳送用 光源으로서는 안성맞춤인 素子이다.

반도체레이저를 驅動시키는 電流를 信號의 크기에 따라 調節하면 이에 比例하여 出力光強度가 變調된다. 이러한 變調方式은 一般電磁波의 變調에 사용되는 振幅變調나 周波數變調와 比較한다면 光強度變調(Intensity Modulation)에 該當되며, 한편 Faraday 効果나 Kerr 效果를 이용하여 레이저 빛을 變調시키는 方式(外部變調)에 比較한다면 内部變調 또는 直接變調에 속하는 變調方式이다. 또 이 變調方式은 그 自體가 가지는 簡便性때문에 현재 개발되어 있는 거의 모든 光섬유통신에는 이 方法이 채용되고 있다.

한편 반도체레이저 자체가 가지고 있는 非直線性때문에 雜音과 非直線性에는 強한 성질을 가지고 있는 디지털통신방식이 역시 현용 光섬유통신의 主流를 이루고 있으며, 이에 대한 연구는 방대하게 행하여져 왔다. 그러나 한편 디지털 통신은 아날로그통신방식에 비하여 하나의 정보를 전송시키기 위하여 약 10배에 가까운 變調帶域幅을 필요로 하기 때문에 대량 정보를 요하는 多重회선 TV신호의 傳送에는 아날로그變調方式이 有利하다. 그럼에도 불구하고 아직까지 TV信號의 傳送에는 發光다이오드를 이용한 아날로그전송이나, 레이저다이오드일 경우에는 디지털전송을 택하게 된 動機는 일전의 레이저다이오드들은 光出力特性上에 나타나는 Kink라는 비직선성을 가지고 있었기 때문이라고 볼 수 있다. 그러나 레이저의 제작기술이 발달함에 따라 발진모드를 제어할 수 있게 되었고 결국 이러한 Kink 현상도 제거할 수 있게 되었다.^{1~4)} 따라서 반도체레이저는 수백 MHz의 廣帶域幅을 가지는 素子라는 것이 속속 판명되기 시작하였고 이에 따라 아날로그변조에 이용하기 위한 기초연구들이 행하여지게 되었다.^{5~7)} 문헌(1)~(4)에는 Kink가 없는 레이저다이오드인 경우는 고주파 찌그러짐이 현저히 줄어들어 든다는 내용을 이론과 실험을 통하여 밝히고 있으며, (5)~(7)에는 레이저의 動作파라미터가 찌그러짐 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰되어 있다. 그러나 아직 變調전류의 찌그러짐이 광출력 찌그러짐에 주는 영향에 대하여서는 고찰되어 있지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 이 점에 대하여 절량적으로 고찰하고자 한다. 한편 실험에 사용하는 레이저의 동작 파라미터들을 고주파 찌그러짐 특성을 이용하여 측정하는 방법을 제안하고 있으며, AlGaAs系 반도체레이저를 가지고 動作係數들의 값을 추정하고 있다.

2. 半導體레이저의 動作特性

2.1 運動方程式(Rate Equations)

軸方向과 橫方向 모두 단일모드로 動作하는 반도체레이저(Laser Diode: LD)의 動作特性解析에 사용되는 一般의인 運動方程式은 다음과 같다.^{8,9)}

$$\frac{dn(x,t)}{dt} = \frac{J}{ed} + D \frac{\partial^2 n(x,t)}{\partial x^2} - gF(x)^2 \cdot s \cdot n(x,t) - \frac{n(x,t)}{\tau_s} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{ds}{dt} = (gs + \frac{c}{\tau_s}) \int_{-\infty}^{\infty} F(x)^2 n(x,t) dx - \frac{1}{\tau_p} s \dots\dots\dots(2)$$

여기서 (1)式은 LD 共振器로 주입된 電荷의 時間變化率을 나타내고 있으며, $n(x,t)$ 는 電荷密度

J 는 電流密度, e 와 d 는 각각 電荷量과 共振器의 有効 두께, D 는 電荷의 擴散係數, g 는 光利得, F 는 光의 橫方向分布, s 는 光子密度, τ_s 는 自然放出電荷壽命을 나타내고 있다. 한편 (2)式은 共振器 內에 發生한 光子의 時間變化率을 나타내고 있으며, C 는 自然放出光이 發振光에 포함되는 率로서 自然放生光係數이며 τ_p 는 光子가 共振器에서 소멸되는 率인 光子壽命을 나타내고 있다.

(1), (2)를 해석하기 위하여서는 電荷와 光의 空間分布에 대하여서는 문헌 (8)의 과정과 해석방법을 그대로 인용한다. 한편 고조파 찌그리짐 특성해석에 있어서는 문헌 (7)의 해석방법을 취하였으며, 動作電流와 光應答에 대하여는 다음과 같은 Fourier 급수전개방법을 택한다.

$$J = J_0 + \sum_q \{ J_m^c \cos(q\omega t) + J_m^s \sin(q\omega t) \} \dots\dots\dots(3)$$

$$s = S_0 + \sum_q \{ S_q^c \cos(q\omega t) + S_q^s \sin(q\omega t) \} \dots\dots\dots(4)$$

2.2 動作係數들의 性質

찌그리짐 특성의 해석에 있어서는 여러 動係係數들의 物理的인 性質들을 定性的으로 考察해 둠으로서 計算을 보다 손쉽게 行하고, 또 動作係數값의 變化에 따른 特性의 變化를 쉽게 理解할 수 있기 때문에 이 節에서는 이들에 대하여 言及하고자 한다.

① 光利得 g

光利得 g 는 發振開始 값 電荷密度 n_{th} 와는

$$gn_{th} = \frac{1}{\tau_p} \dots\dots\dots(5)$$

과 같은 관계를 가지고, ¹⁰⁾ 한편,

$$n_{th} = \frac{\tau_s}{ed} J_{th} \dots\dots\dots(6)$$

와 같은 관계를 가지고 있으므로, ¹⁰⁾ 방정식 (1), (2)를 J_{th} 와 n_{th} 로 規格化를 시킨다면 g 의 값은 특성해석상에는 직접적으로 영향을 미치지 않는다.

② 電荷 e 와 공진기두께 d

이 역시 (6)式에서 보여 주는 것처럼 n_{th} 와 J_{th} 에 그 내용이 포함된다.

③ 電荷의 자연방출수명 τ_s

이는 특성해석의 시간을 t/τ_s 로 규격화시킴으로써 변조角周波數가 $\omega \times \tau_s$ 형태로 되기 때문에 규격화변조角周波數에 그 성질이 포함된다.

④ 光子壽命 τ_p

특성해석상에는 $\tau_s/\tau_p \equiv T$ 라는 계수로서 그 값이 주어지며 문헌(10)에 따르면 그림 1과 같은 성질을

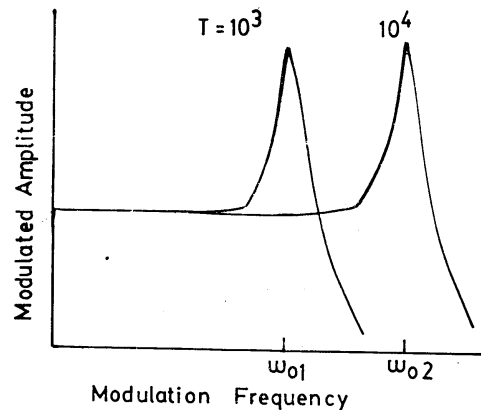


그림 1. 반도체레이저의 주파수 응답특성

가지고 있다. 즉 τ_p 가 작아지면 작아질수록(T 가 커질수록) 변조가능대역폭이 증가하게 되며 小信號理論으로부터는 공진角周波 ω_0 는

$$\omega_0 \times \tau_s = \sqrt{T(I/I_{th}-1)^2} \dots\dots\dots(7)$$

인 성질이 있음이 알려져 있다.¹⁰⁾

한편 LD에 있어서 τ_s 는 1~5ns의 값을 가지며, τ_p 는 대략 빛이 LD 공진기를 한 바퀴 회전하는데 걸리는 시간으로서 LD 공진기의 길이를 300 μ m, 굴절율을 3.6이라 하며 1~2ps인 값을 가지게 되기 때문에 $T \approx 10^8 \sim 10^4$ 정도의 값을 가지는 것으로 추정된다. 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 T 係數는 공진주파수 근처의 고속변조영역에서는 변조특성에 대단히 큰 영향을 미치지만 저속변조에서는 거의 그 영향이 나타나지 않는 특성을 가지고 있다. 따라서 극저속변조時的 찌그러짐 특성해석에는 이 영향을 고려하지 않아도 될 것이다. 그러나 변조차단주파수를 결정함에 있어서는 T 의 영향이 주가 될 것이기 때문에 본 논문에서는 찌그러짐 특성으로부터 이 값을 측정하는 방법을 제안하고 실험에 이용한 LD에 대하여 이 값을 측정한다.

⑤ 自然放出光係數 C

自然放出光係數라 함은 그림 2, 광출력스펙트럼에 나타나 있는 바와 같이 全自然放出光 中에 레이저光에 포함되는 率을 나타낸다. 즉,

$$C = \frac{\text{레이저光에 포함되는 自然放出光}}{\text{全自然放出光出力}}$$

그림에 표시된 入力電流對光出力特性($I-L$ 곡선)과 비교설명하면 자연방출광은 전류증가에 따라 I_{th} 까지는 점차 증가해 가다가 I_{th} 에서는 거의 포화되고, 그 이상의 電流에서의 입력전류는 모두 레이저光이 되어 나온다. 따라서 C 係數는 I_{th} 근처에서, 즉 곡선의 만곡부분에서는 레이저 동작에 크게 영향을 미치지만 I_{th} 보다 높은 동작전류에 있어서는 레이저 동작에 크게 영향을 끼치지 않을 것이다. C 의 값에 대하여서는 LD 공진기모델을 이용한 이론으로부터 10^{-5} 정도의 값을 가진 것으로 예상되었고,¹¹⁾ 문헌(12)에는 이를 실험적으로 증명하고 있다.

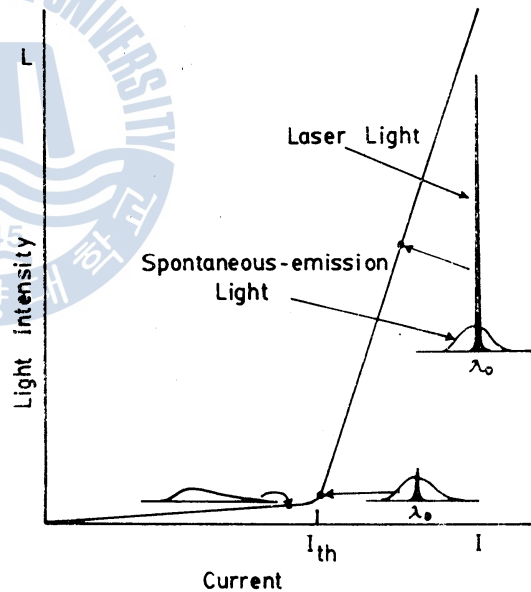


그림 2. 전류입력 대 광출력 특성에 따르는 파장변화

한편 C 는 $I-L$ 곡선의 만곡정도와 관련을 가지고 있기 때문에 찌그러짐 특성에는 커다란 영향을 미칠 것이 예상된다. 한편 문헌 (3),(7)에는 이의 영향에 대하여 바이아스전류가 J_{th} 이상에서의 특성에 관하여서만 연구되었지만, 본 논문에서는 바이아스전류가 I_{th} 미만, 즉 $I_{th}-I_m < I_0 < I_{th}$ 에서 C 의 영향을 고찰하고, 찌그러짐 특성을 이용하여 C 의 값을 추정할 수 있는 방법을 제안하고 실험에 이용한 LD에 대한 이 값을 측정한다.

⑥ 확산계수 D

반도체에서는 전하의 分布가 공간적으로 傾度를 가지게 되면 확산효과가 일어나게 된다. 이때 확산계수와 평균확산 길이 L 과의 사이에는 다음과 같은 관계가 있음이 아인슈타인에 의해서 밝혀져 있다.

$$L = \sqrt{D\tau_s} \dots\dots\dots(8)$$

한편 반도체이론에 의하면 k 를 볼츠만상수, T 를 절대온도라 할 때 다음과 같은 관계가 있음이 알려져 있다.

$$D \simeq \left(\frac{kT}{e}\right)\mu_e \quad (\text{cm}^2/\text{sec}) \dots\dots\dots(9)$$

단, μ_e 는 반도체내에서 일어나는 電荷의 이동을 기술하는 상수로서 移動度라 하며 LD 재료인 GaAs인 경우는 $1,000 \sim 8,000(\text{cm}^2/\text{vs}\text{sec})$ 정도임이 밝혀져 있다. 따라서 D 는 $26 \sim 208\text{cm}^2/\text{sec}$, $\tau_s \sim 1\text{ns}$ 이므로 L 은 약 $1 \sim 5\mu\text{m}$ 정도의 값을 가지고 있는 것으로 추정된다.

한편, (1), (2)식의 계산에 있어서는 공진기폭(W)을 L 로 규격화하여 사용하는 것이 일반적이며, ⁹⁾ 현용 LD의 공진기폭은 $1\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 이므로 $W/L=1 \sim 5$ 정도의 값을 가지는 것으로 추정된다.

이 계수의 動作特性에 미치는 영향은 그림 3에 나타나 있는 바와 같이 발생광은 근본적으로 Gaussian 分布를 하게 되며 유도방출은 식(1)에 나타나 있는 바와 같이 電荷量, 즉 光利得과 光의 곱에 의하여 일어나기 때문에 電荷의 空間分布가 發生하게 되며 필연적으로 레이저의 동작에는 확산영향이 동반하게 된다. 따라서 그림 3에 표시되어 있는 바와 같이 광강도가 크면 클수록 電荷의 空間分布傾度가 급해지며 확산영향이 커지게 된다. 한편, 변조전류의 시간변화율이 확산속도와 비교될만큼 빨라지면 확산의 영향은 급증할 것임이 예상된다. 이 영향에 대하여서는 문헌(9)에 언급되어 있다.

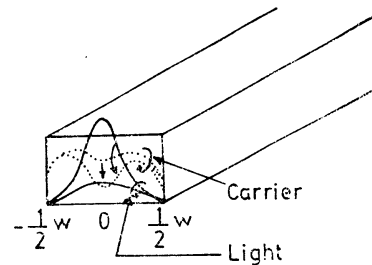


그림 3. 레이저공진기 내의 전하 및 광의 분포

문헌 (4)와 (7)에는 제2고조파찌그러짐 특성에 대한 이론과 실험을 통하여 W/L 의 값을 추정하고 있으나, 본 논문에서는 변조전류의 찌그러짐이 光出力 찌그러짐 특성에 미치는 영향을 考察하고 W/L 값의 측정에는 이 영향을 考慮하여야 함을 지적하고 있다.

2.3 I_{th} 近傍에서의 특성

LD의 $I-L$ 曲線에는 I_{th} 근처에서 대단한 非直線性이 나타나고 그림 2에 보인 바와 같이 LD는 주파수특성상에도 비직선성을 가지고 있기 때문에 I_{th} 를 포함한 영역부근에서는 선형적으로 이론해석을 행해 나갈 수가 없다. 따라서 이 부근에서는 一般的으로 Fourier 급수해석법이 유효하며, 이 방법에 대하여서는 문헌(7)에 소개되어 있다.

문헌 (5), (6), (7)에는 I_{th} 에서 제3고조파가 극소값을 가진다는 사실이 이론과 실험을 통하여 지적되어 있지만 그 원인에 대하여서는 아직까지 확실히 규명되어 있지 않았었다. 그런데 이 사실은 다

음에 설명하는 바와 같이 半波整流波에 대한 Fourier 급수전개의 성질을 도입함으로써 쉽게 이해할 수가 있다.

그림 4는 $I=I_{th}+I_m\cos\omega t$ 를 (1)式에 대입하여 계산한 광출력 특성의 결과이다. 여기서 $I_m=0.1I_{th}$ 를 사용하고 있으며 고조파특성은 제3차항만 발췌되어 있다. 변조주파수가 높을수록 3차고조파의 최소치가 증가하는 것을 볼 수 있다.

한편, $I_{th}-I_m < I_b < I_{th}+I_m$ 영역에서의 $I-L$ 곡선은 변조주파수에 따라 심한 변화가 있음을 알 수 있는데 이는 그림에서 표시되어 있는 바와 같이 변조진폭 중 I_{th} 이상인 전류(사선친부분)만이 光出力을 내기 때문이다. 이에 따른 出力光의 특성은 그림 5에 표시되어 있는 것처럼 마치 半波整流된 파형과 같은 형태가 된다. 이 파형에 대한 Fourier 급수는

$$\begin{aligned} e(\theta) = & \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \cos\theta + \frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{3} \cos 2\theta \right) - \frac{1}{15} \cos 4\theta \dots\dots\dots(10) \\ & + \frac{1}{35} \cos 6\theta + \dots\dots\dots + \frac{(-1)^{n+1}}{4n^2-1} \cos 2n\theta + \dots \end{aligned}$$

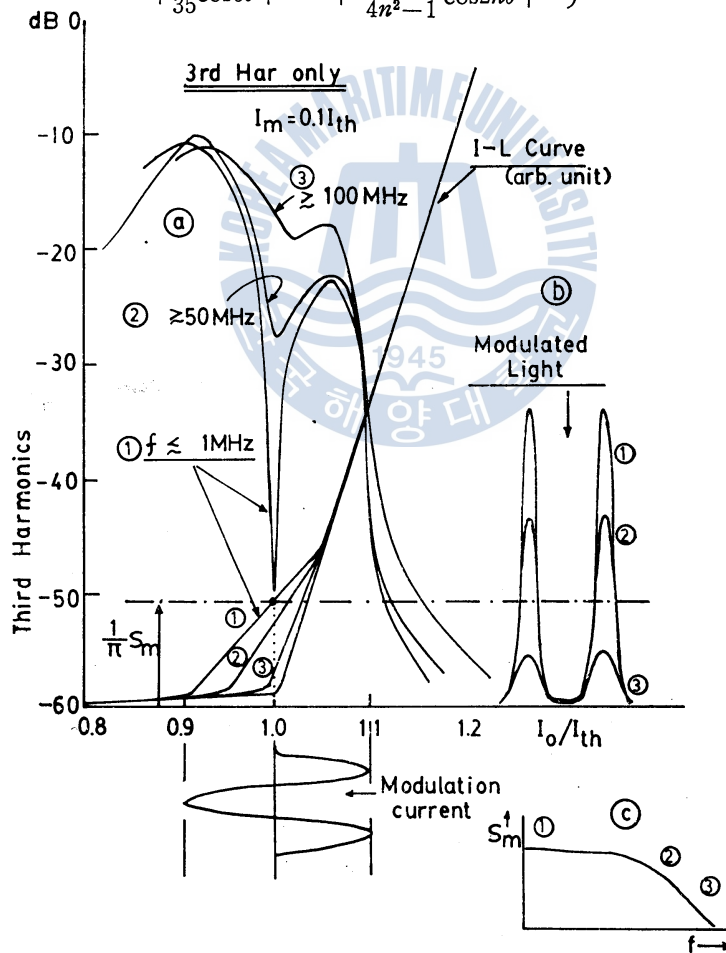


그림 4. 발진개시전류 부근에 있어서의 3차 고조파특성
 ㉑ 3차 고조파특성, ㉒ 변조된 광출력특성, ㉓ 주파수특성

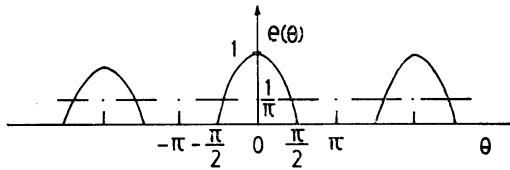


그림 5. 반파정류파형

電流 I_{th} 라 完義하는 것은 극히 타당한 일이라 생각된다.

그림 6은 AlGaAs系 LD를 이용한 (9)식의 결과를 비교한 것으로서 기수차수를 제외하면 (9)식의 결과와는 실험사실과 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 한편 그림 4(c)에 나타나 있는 바와 같이 LD는 주파수특성을 가지게 되므로 고주파로 갈수록 응답특성이 악화되며 이에 따라 반파정류 특성이 약화되고 따라서 제3차 및 기수차고조파성분도 증가되어 간다.

2.4 고조파특성실험

실험에는 NEC에서 제작된 AlGaAs계 NLD 31 08PLD를 이용하였다. 그림 7은 실험에 사용된 LD

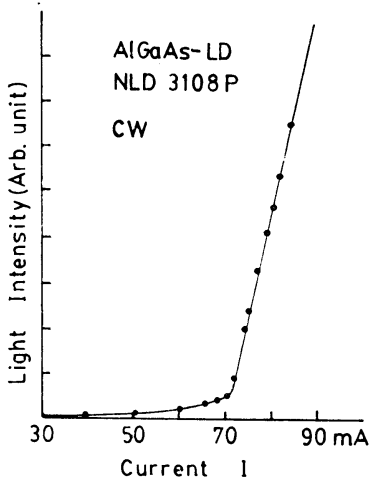


그림 7. 실험에 사용된 LD의 I-L특성

실험에는 그림 8과 같은 장비들을 이용하였다. 신호원의 주파수특성은 250MHz까지 고조파성분이 -45dB 미만이었으며 그림 9은 주파수에 따른 신호발생기의 고조파성분을 측정한 그림이다.

로 주어지며 평균치는 $\sim \frac{1}{\pi}$ 이 된다. 그림 4의 고조파 특성해석으로부터 얻어진 결과와 비교한다면 I_{th} 에서 광출력의 平均値는 $\sim \frac{1}{\pi} S_m$ 이 되므로 I_{th} 에서는 거의 반파정류특성이 나타남을 알 수 있고 역으로 제3차, 제5차 기수차수가 최소로 되는 점을 發振開始

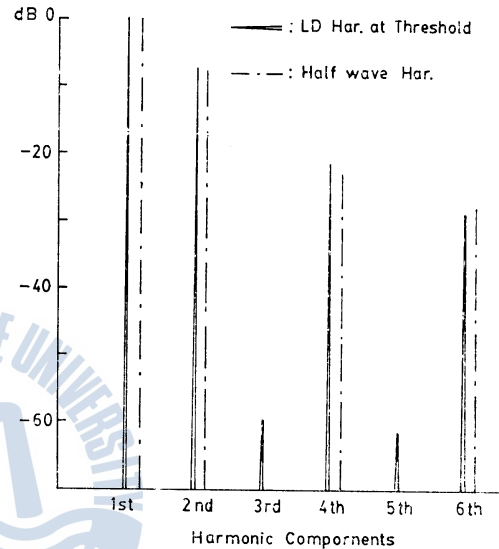


그림 6. 발진개시에서의 LD고조파 특성과 반파정류파의 고조파 특성

의 I-L 특성을 나타낸다. $I_{th}=71mA$ 이며, 그림에서 알 수 있듯이 I_{th} 이상에서는 직선성이 양호한 LD이다. 일반적으로 상품화되어 있는 LD 규격에는 LD의 구조와 τ_s , τ_p , C, L 등 LD 계수에 대하여서는 명기되어 있지 않기 때문에 다음 절에서는 고조파 찌그러짐 특성을 이용하여 이 값을 추정하기로 한다.

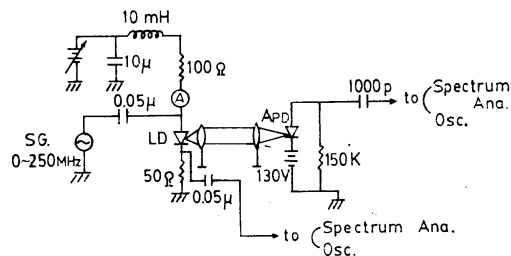


그림 8. 고조파측정 실험구성

한편 5차이상의 고조파는 모두 -60dB 미만의 특성을 가지고 있었다. 본 연구에서는 이 특성을 고려하여 수치계산을 행하였다.

한편 측정에는 1.8GHz의 대역폭을 가진 스펙트럼 분석기를 이용하였으며 受光에는 차단주파수가 ~5GHz인 APD를 사용하였기 때문에 이 장치들이 측정에 미치는 영향은 극미한 것으로 생각된다.

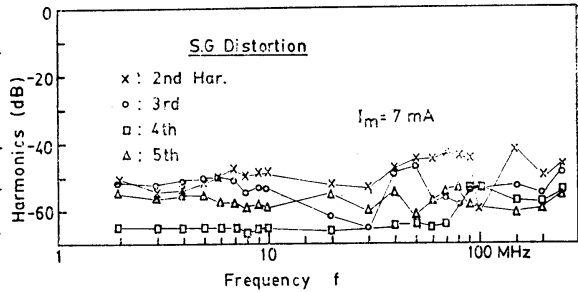


그림 9. 신호발생기의 고조파특성

3. 高調波特性을 이용한 LD動作係數의 推定

3.1 전하의 자연방출수명 τ_s

그림 4에 표시된 바와 같이 I_{th} 근방에서 제3고조파의 특성은 규격화된 변조주파수 $\omega \times \tau_s$ 값에만 의존한다. 문헌(14)에는 I_{th} 에서의 제3차고조파의 진폭은 저주파변조인 경우에

$$\frac{|S_3|}{|S_1|} = \frac{1}{4} \omega \times \tau_s \dots\dots\dots(11)$$

로 표시됨을 밝히고 있다. 본 논문에서는 이 사실에 근거를 두고 τ_s 의 값을 다음과 같이 측정하였다.

그림 10은 τ_s 를 측정할 예로서 실선은 이론값이고 o表는 실험값이다. (11)式을 이용하면 $\tau_s = 0.85$ ns로 계산된다. 그리고 그림 11은 I_{th} 근방에서 바이아스전류변화에 따른 3차고조파변분을 나타내는

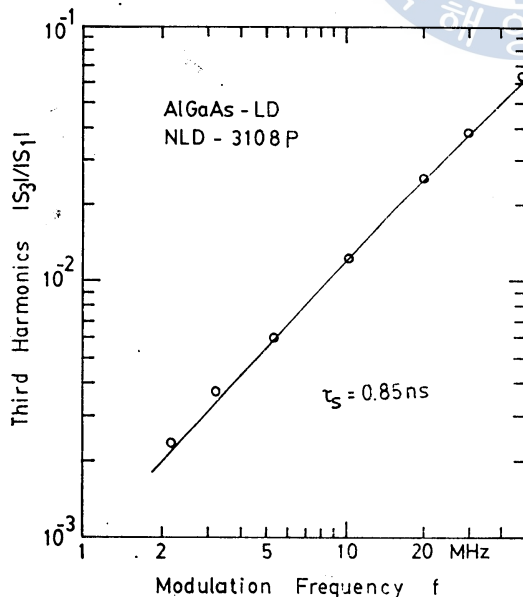


그림 10. 3차고조파에 의한 전하의 자연방출광 수명 측정

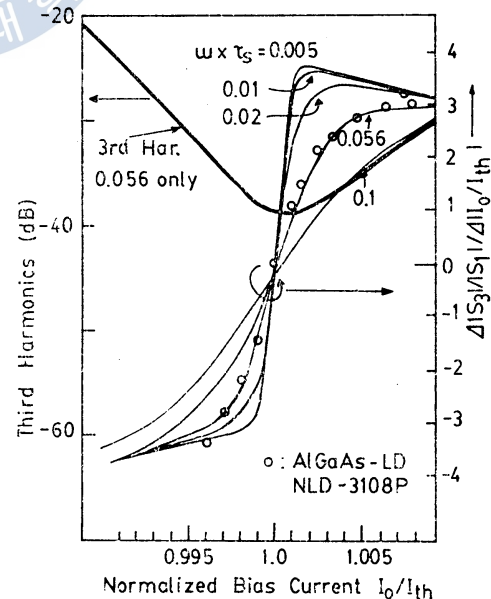


그림 11. 3차고조파의 미분에 의한 전하 수명 측정에

그림으로서 실선은 $\Delta I_0 = 0.001 I_{th}$ 간격으로 하고 $\omega \times \tau_s$ 값을 파라메트로 하여 $\frac{\Delta |S_3| / |S_1|}{\Delta I_0 / I_{th}}$ 을 구한 계산 결과이며 0表示는 10MHz에 대한 실험결과이다.

이 그림으로 판단한다면 역시 $\tau_s = 0.8 \sim 0.9 ns$ 사이의 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이것은 τ_s 의 측정에는 상기 어느 방법을 택하여도 좋다는 것을 암시하고 있는 것이다.

3.2 自然放出光係수 C

從來 C값의 측정에는 그림 2에서 설명한 바와 같이 I-L曲線의 만곡부분의 만곡정도를 이용하여 왔지만,¹²⁾ 만곡부는 C에 따른 변화가 급격하지 않기 때문에 측정정도에는 문제가 있게 된다. 그러나 고조파특성을 이용하면 고조파의 차수가 증가함에 따라 만곡부에서 일어나는 변화는 급격해져 가므로 이 특성을 이용하면 C의 값을 보다 정도 높여 측정해 낼 수 있다.

그림 12은 C의 값을 파라메트로 하여 계산한 I_{th} 근처의 고조파특성을 나타내고 있다. 이 특성은 $I_m = 0.12 I_{th}$ 로 하고 계산한 값이기 때문에 $I_0 \geq 0.9 I_{th}$ 의 바이아스에서 변조전류의 침투값은 I_{th} 를 넘게 되고 넓은 부분은 LD 발진을 유발시키기 때문에 펄스응답을 하게 되므로서 그림과 같이 $I_0 \geq 0.9 I_{th}$ 에서는 대단히 큰 고조파 성분들이 나타나게 된다.

한편, 제2절에서 지적한 바와 같이 저주파변조(1~10MHz)이기 때문에 T에 대한 변화는 거의 없었으며, I_{th} 근방의 특성이기 때문에 확산영향도 거의 없었다.

그림 13은 제5차 고조파 특성을 이용하여 C값을 측정한 예로서 그림에서 보던 사용한 LD의 C값

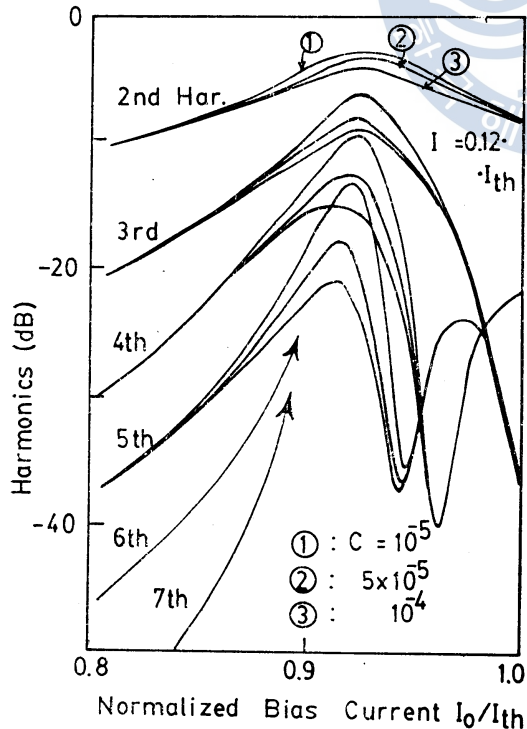


그림 12. 발진개시 부근에서의 고조파의 자연방출광 계수 의존도

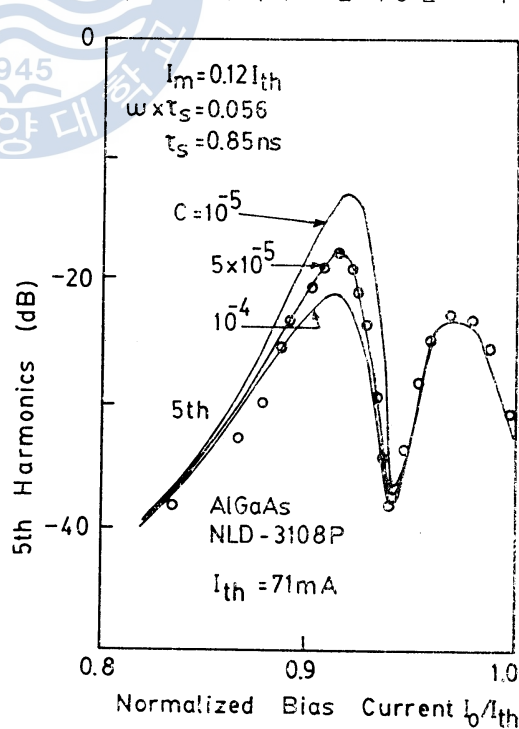


그림 13. 자연방출광 계수 측정예

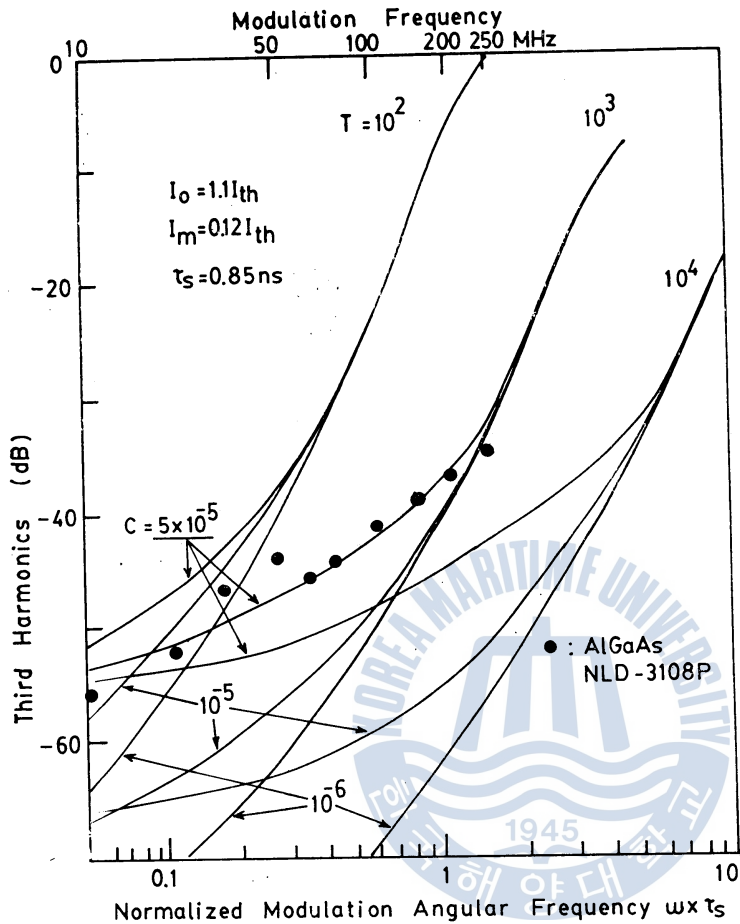


그림 14. LD의 주파수 특성에 의한 광자수명 $T = T_s / T_p$ 의 측정예

질을 이용하면 100MHz 이하의 비교적 낮은 변조주파수영역에서도 충분히 T 의 값을 추정해 낼 수가 있다.

그림 14는 본 연구에서 사용한 AlGaAs LD의 T 값을 측정한 예를 보여주고 있다. 이 추정에 사용된 T_s 와 C 의 값은 前節에서 측정한 값을 사용하고 있다. 실선은 3차 고조파에 관한 이론계산결과로서 T 의 값을 $10^2 \sim 10^4$ 을 택하고 있으며 I_m 과 I_0 는 실험에 사용된 값을 이용하였고, 회로의 찌그림을 고려하여 계산을 행하였다.

그림에서 點들은 실험값을 말해 주고 있으며, 이론곡선과 비교한다면 T 는 10^3 정도의 값을 가지는 것으로 생각된다. 따라서 τ_p 의 값은 0.85ps로 추정이 된다.

한편, 보다 고차의 고조파를 이용하면 더 높은 정도를 가진 T 값을 추정해 낼 수가 있지만 차수가 높아질수록 고조파의 진폭이 줄어들어 드는 반면, 작은 진폭의 고조파들을 측정함에 있어서는 3.5절에 언급하는 바와 같이 회로의 미소한 찌그림정도가 고조파 특성에 미치는 영향이 크므로 실험상에는 특별한 주의가 필요하게 된다.

은 약 5×10^{-5} 정도라고 推定된다.

3.3 光子壽命 τ_p

T 는 電荷의 자연방출수명 (τ_s)과 光子수명 (τ_p)의 비 ($T \equiv \tau_s / \tau_p$)로써 2.2節에서 설명한 바와 같이 LD의 변조상한 주파수를 결정하는 중요한 動作係數이다. 따라서 T 값을 측정하면 τ_p 값을 추정할 수가 있다. 지금까지 이 값의 측정은 LD의 공진주파수를 측정하므로써 (7)式으로부터 구하는 것이 일반적인 방법이었다. 그러나 LD의 공진주파수는 수백 MHz 이상에서 일어나기 때문에 초고속변조장치 및 측정장비들을 요하며, 초고주파실험이므로 실험상 대단한 어려움이 뒤따르게 된다. 그러나, 본節에서 설명하는 고주파의 성

3.4 擴散效果

확산효과를 나타내는 動作係數인 LD공진기폭(W)과 확산길이(L)의 比(W/L)는 LD의 직선성 良否를 결정하는 결정적인 要因이라는 사실이 알려져 있다. (4~7)

한편, 직선성에 미치는 W/L 의 영향은 제2.2절에서 언급한 바와 같이 바이아스전류가 증가함에 따라 증가하는 특성을 지니고 있다. 그런데 문헌(7)에서는 바이아스전류가 꽤 높은 점에 있어서도 고조파특성에 미치는 C 의 영향은 크게 나타나기 때문에 특성해석상에는 사용 LD의 C 의 값을 먼저 알아 두어야 된다는 것을 지적하고 있다. 본 절에서는 3.2절에서 추정한 C 의 값을 이용하여 확산효과를 추정해 보고 저한다. 한편 그림 1에 표시되어 있는 바와 같이 저주파변조 $\omega \times \tau_s \leq 0.1$ 약 20MHz) 영역에 가서는 고조특성에 미치는 T 의 영향은 무시할 수 있으므로 실험에서는 10MHz 특성을 이용하였으며 계산에는 이 주파수에 해당하는 규격주파수 $\omega \times \tau_s = 0.056$ 을 사용하였다.

그림 15는 상기 계수들을 가지고 W/L 을 파라메타로 하여 계산한 2차 고조파의 바이아스 특성을 나타낸다. 점선은 입력전류를 정현파라 가정하여 계산한 이론결과 實線은 실험결과이다.

한편, 다음 3.5절에서 지적하는 바와 같이 변조전류의 고조파특성이 光出力특성에 미치는 영향은 대단히 크므로 실선은 바이아스에 따른 변조전류의 제2고조파성분(---선)을 고려하고 $W/L=1$ 에 대하여 계산한 결과이다.

실험결과의 $I_0=1.1 I_{th}$ 근방에서 나타나는 고조파의 돌출현상은 사용 LD가 가지고 있는 $I-L$ 곡선상의 미소한 비직선성에 의한 것으로 생각되고, 이는 W/L 특성을 조사하는데 있어서는 근본적인 문제는 아니라고 생각된다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 高바이아스에서는 변조전류의 고조파에 의해서 光出力특성이 제한되어 버리기 때문에 高바이아스에서는 W/L 의 값을 추정할 수 없지만 $I_0=1.1 I_{th}$ 근방에서의 곡선의 만곡으로부터 추정하여 본다면 W/L 은 대략 3~5 정도의 값을 가지고 있는 것으로 판단이 된다.

그러나 이값의 신빙성여부를 확인하기 위하여서는 우선 변조전류의 고조파성분을 제거시킬 필요

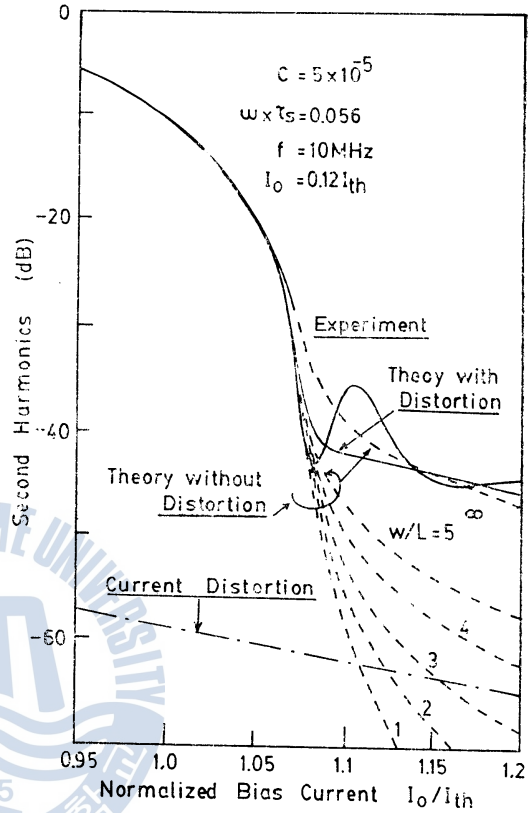


그림 15. 전류의 고조파성분이 광출력 고조파에 미치는 영향

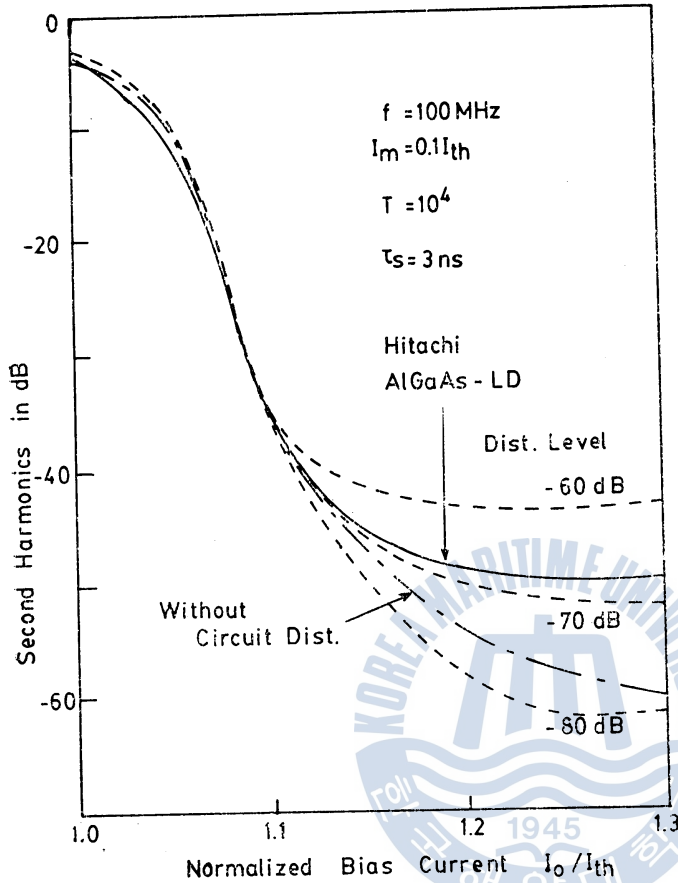


그림 16. 전류의 고조파성분이 광출력 고조파에 미치는 영향에 대한 실험과 이론의 비교

하지만 여기서는 기대될 수 있는 값중에서 $W/L=3$ 을 택하였다.

그림에서 알 수 있듯이 $I_0 \leq 1.2 I_{th}$ 영역에서는 고조파진폭이 변조전류의 고조파진폭에 의하여 결정되며, 각 곡선에 있어서 그 영향은 전류의 고조파가 -80 일 때 광출력은 -60 dB와 같이 약 20 dB 증가하는 것으로 나타난다. 바꾸어 말한다면 -60 dB 미만의 광출력 고조파특성을 측정하기 위하여서는 적어도 변조전류의 고조파진폭은 -80 dB 미만이라야 함을 지적하고 있는 것이다.

따라서 Hitachi 자료집에 나온 LD는 이 경우에는 변조전류의 고조파진폭이 -70 dB 정도였음이 추측되며, 만일 이를 줄인다면 LD가 가지고 있는 실제 찌그러짐 정도인 -60 dB 정도까지의 특성을 얻어 낼 수 있을 것으로 생각된다.

4. 검 토

4.1 아날로그변조가능대역폭

지금까지 조사한 LD 各 係數들의 값을 가지면 사용하는 LD가 가지고 있는 아날로그변조가능대

가 있을 것으로 생각된다.

3.5 변조전류 찌그러짐의 영향

변조전류의 고조파성분이 미치는 영향에 대하여서는 문헌(7)에 간단히 언급되어 있으나 아직 이 영향에 대한 定量的인 자세한 연구는 이루어져 있지 않은 실정이다.

이節에서는 Hitachi에서 발행한 Al-GaAs LD에 대한 규격집으로부터 자료를 추출해 내어 이론적인 수치계산과 비교 검토하므로써 변조전류가 미치는 영향을 조사하기로 한다.

그림 16은 이 영향을 조사하기 위한 그림으로서 Hitachi LD에 대한 자료(실선)와 $T=10^4$, $\tau_s=3$ ns, $C=5 \times 10^{-6}$ 에 대하여 제2차 고조파에 대한 수치계산결과를 나타내고 있다.

변조전류의 영향으로서는 I_{m2}/I_{m1} 을 -80 dB, -70 dB, -60 dB로 하여 계산하였다. 그림 15에서 보인 바와 같이 W/L 가 증가할수록 고조파진폭은 증가

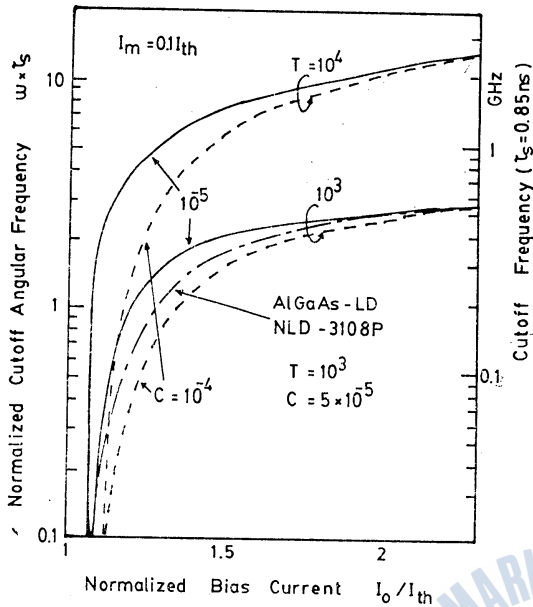


그림 17. 실험에 사용된 LD의 아날로그 변조대역

역폭을 추정해 볼 수 있다. 문헌(7)에는 아날로그 변조대역폭을 추정함에 있어서는 LD 계수들 중에 T 와 C 의 값이 결정적인 역할을 한다는 사실이 지적되어 있다.

그림 17은 일반적으로 TV 정보를 아날로그로 보내기 위하여 요구되는 찌그러짐정도인 -40dB 에 송수신기 및 전송선로의 영향 등을 생각한 -10dB 를 가하여 -50dB 를 찌그러짐 정도의 상한으로 잡고, 바이아스에 따른 차단주파수의 증가를 보이는 그림이다. 여기서 변조진폭은 $0.1 I_{th}$ 로 고정시켜 놓고 있다.

실험에 사용한 LD인 경우는 $T \approx 10^3$, $C = 5 \times 10^{-5}$ 였으므로 변조가능 차단주파수는 \dots 선과 같이 표시된다. 따라서 이 LD인 경우 바이아스가 $1.1 I_{th}$ 이상이 되면 약 50MHz 이상의 대역폭을 얻을 수 있을 것으로 추정된다.

4.2 각계수값들의 추정에 대하여

(1) 電荷의 자연방출수명 τ_s

전하의 자연방출수명을 추정함에 있어서는 발진개시 값에 대한 수명만 측정하였지만 사실 바이아스전류값이 발진개시값에 가까워 질수록 급격히 감소하게 되고 레이저발진이 일어난 이후에는 거의 일정한 값을 가진다는 사실이 알려져 있으므로 본 연구에서 측정된 τ_s 의 값은 고조파특성에 그 대로 사용하여도 무방할 것으로 기대된다. 그러나 측정시 변조전류의 고조파에 의한 영향을 생각한다면, 작은 진폭의 고조파를 측정하여 τ_s 값을 추정하는 데에는 주의를 요하며 이에 대한 고찰이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

(2) 자연방출광계수 C

자연방출광계수 C 의 값은 본 연구에서 제의한 방법을 이용하는 것이 지금까지 사용되어 온 방법 보다 측정정도를 높일 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이 방법은 초기의 연구이므로 종래의 방법과 비교 검토하여 측정방법의 타당성을 입증시킬 필요가 있다.

(3) 光子壽命 τ_p

τ_p 를 측정하는 방법 중 일반적으로 알려진 것은 펄스변조시 일어나는 완화진동주파수를 측정하여 식(7)로부터 추정해 내는 방법이다.¹⁰⁾

그러나 식(7)은 小信號理論으로부터 얻은 것이며, 한편 신호의 진폭이 커진다면 공진주파수도 저

주파쪽으로 옮겨 간다는 사실이 밝혀져 있으므로 일반적인 실험에 있어서는 (7)식을 그대로 이용할 수는 없다.

한편, 고조파특성을 해석하는 문헌(7)의 방법은 100% 이상의 변조도 ($I_m/(I_b - I_{th}) \geq 1$)에도 이용할 수 있는 방법이므로 보다 저주파에서 정밀하게 τ_p 의 값을 추정할 수가 있다. 그러나 이 방법 역시 본 연구에서 처음으로 시도된 것이기 때문에 일반적인 방법과의 비교검토가 필요하다.

(4) 擴散效果(W/L)

LD 동작에 있어서 확산효과는 완화진동을 제지시키는 역할을 한다는 사실이 알려졌으며,⁹⁾ 한편 확산효과는 고조파진폭의 최소값을 결정하는 요소라는 사실도 밝혀져 있다.⁴⁻⁷⁾

본 논문에서는 변조전류의 찌그러짐이 고조파특성에 미치는 영향이 크다는 것을 밝힘으로써 문헌(4)~(7)에서 추정된 W/L 값은 다소가에 수정을 가해야 함을 지적하였다.

한편, 본 논문 및 문헌(4)~(7)에서는 운동방정식 중 電荷의 공간분포를 Cosine형으로, 광강도 분포를 Cosine제곱형으로 가정하여 이론해석을 향하고 있다. 이러한 가정은 BH-LD (Berried Hetero Structure-LD)인 경우에는 그 構造上 잘 맞을 것으로 생각되나 일반적인 LD인 경우에는 電荷의 分布가 그 구조에 따라 달라지며, 또 光強度分布는 Cosine제곱형보다는 Gaussian형에 가깝기 때문에 LD에 따라서는 문헌(4)~(7)의 해석방법은 제1차 近似로서의 意義밖에 가지고 있지 못하다. 따라서 W/L을 정밀하게 측정하기 위하여서는 L의 값을 측정하는 일반적인 방법을¹⁵⁾ 이용하는 것이 바람직하다.

4.1절에서 언급한 바와 같이 아날로그변조대역폭은 T와 C의 값에 의해서 결정되기 때문에 W/L의 값을 정밀하게 알 필요는 없는 것으로 생각된다.

그러나, 사용 LD의 구조에 알맞는 모델을 도입한 이론을 이용한다면 고조파특성을 이용하여 확산계수 L을 측정할 수 있는 새로운 방법이 마련될 것으로 기대된다.

5. 結 論

본 연구에서는 반도체레이저(LD)의 動作特性을 해석하는 운동방정식을 자세히 고찰하고, 이를 토대로 고조파 특성해석으로부터 운동방정식에 사용되는 각종 動作係數값을 추정하는 방법을 제안하였다.

AlGaAs-LD를 사용한 측정에서 전하의 자연방출광수명 τ_e 를 0.85ns로, 光子수명 τ_p 는 0.85ps로 추정하였다.

한편 發振開始값부근의 5차 고조파특성을 이용하여 自然放出光係數 C의 값을 5×10^{-5} 으로 측정하였으며, 이 값들을 이용하여 아날로그變調帶域巾을 調査한 결과 실험에 사용한 LD인 경우 바이아스전류가 $I_0 = 1.1 I_{th}$ 이상에서는 약 50MHz 정도의 대역폭을 얻을 수 있을 것으로 추정하였다.

나아가서는 본 연구에서는 變調電流의 찌그러짐 정도가 光出力特性에 미치는 영향을 고찰하였으

며, 變調電流의 찌그러짐 정도는 광출력찌그러짐을 약 20dB정도 上昇시킨다는 것을 밝히고 變調特性實驗에 있어서는 이 점에 注意하여야 한다는 것을 지적하였다.

감사의 말

본 研究에 必要한 實驗裝置의 사용을 허락하여 주신 韓國電氣通信研究所 光通信研究室 姜 民호 박사님께 감사드립니다.

參 考 文 獻

1. M. Maeda, K. Nagano, I. Ikushima, M. Tanaka, K. Saito, and R. Ito, "Burried heterostucre lasers for wideband linteroptical sources", Proc. of 3rd European Conf. on Opt. Commun., Munchen, pp. 120~122, Sept. 1977.
2. K. Ikeda, K. Matsui, M. Ishii, and W. Susaki, "Harmonic distortion of TJS-Lasers", Paper of Technical Group on Opt. and Quantum Electron. of IECE of Jap., OQE77-103, pp.63~66, Feb. 1978.
3. K. E. stubkjaer, "Nonlinearity of DH-GaAlAs Lasers", Electron. Lett., Vol. 15, pp. 61~63, Jan. 1979.
4. T. Hong and Y. Suematsu, "Harmonic distortion in direct modulation of injection lasers", Trans. IECE of Jap., Vol. E62, pp. 142~147, Mar. 1979.
5. M. Maeda, K. Nagano, and K. Saito, "Harmonic distortion in semiconductor lasers,, 5th European Conf. on Opt. Comm., Sept. 1979.
6. K. E. Stubkjaer and M. Danielsen, "Nonlinearity of GaAlAs laser-harmanic distortion", IEEE J. Q. E., Vol. QE-16, pp. 531~537, May 1980.
7. T. Hong, Y. Suematsu, S.C. Chung, and M. Kang, "Harmonic Characteristics of Laser Diodes". J. Opt. Communications, Vol. 2, pp. 42-48, Mar. 1982.
- 8 J. Buus and M. Danielsen, "Carrier diffusion and higher order transversal modes in spectral dynamics of the semiconductor laser", IEEE J. Q. E, Vol. QE-13, pp. 669~674, Aug. 1977.
- 9, K. Furuya, Y. Suematsu, and T. Hong, "Reduction of resonance-like peak in direct modulation due to carrier diffusion effect in injection laser", Appl. Optics, Vol. 17, pp. 1949~1952, Jun. 1978.
10. T. Ikegami and Y. Suematsu, "The direct modulation of semiconductor junction laser", Trance. IEEE of Jap., Vo. 51-B, pp. 57~63, Feb. 1968.
- 11) Y. Suematsu and K. Furuya, "Theoretical spontaneous factor of injection lasers", IEEE of Jap., E61, pp. 467, Sept. 1977.
12. Y. Suematsu, S. Akiba, and T. Hong, "Measurement of Spontaneous-emission factor of AlGaAs double-heterostructure semiconductor lasers", IEEE J. Q. E, QE-13, pp. 756, Sept. 1977.
11. 洪彰禧, "高調波 찌그러짐 특성을 이용한 반도체레이저의 注入전하수명 측정", 한국해양대학 선박공학연구 소 논문집, 1983. 4.
14. T. Ikegami and Y. Suematsu, "Large signal characteristics of directly modulated semiconductor injection lasers", Trans. IECEof Jap., 53-B, p. 513; sept. 1970.
15. M. Ettenberg, H. Kressel, and S. L. Gilbert, Minority carrier diffusion Length and recombination lifetime in GaAs: Ge prepared by liquid-phase epitaxy", J. Appl. Phys., Vol.44, pp.827, Feb. 1973.

