

光通信用 GaAs/(Ga, Al)As DH-LED의 最適 周波數 應答에 대한 研究

(The Optimum Frequency Response of GaAs/(Ga, Al)As
DH-LED for Optical Communication)

吳 煥 述*, 金 暎 權*

(Hwan Sool Oh and Yung Kwon Kim)

要 約

本 論文은 光通信用 光源의 가장 重要한 設計變數인 周波數應答의 最適化를 위하여 對稱 GaAs/(Ga, Al)As DH-LED를 모델로 채택하여 다이오드의 設計變數들인 活性層의 不純物濃度, 活性層幅, 少數 캐리어壽命, 禁止帶幅, 屈折率, 空間電荷容量, 注入電流密度 등의 物理的 諸因子들의 相互關係를 체계적으로 정립하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 最適設計變數值들을 設定하는데 그 目的이 있다.

Abstract

In this paper, we have used symmetrical GaAs/(Ga,Al) As DH-LED as a model for the optimization of frequency response which is the most important design parameter of the optical communication-LED. And optimum design parameters have been chosen to improve performance factors of the DH-LED by computer simulation. This is for the purpose of systematic consideration of the interrelation of the physical parameters such as impurity concentration of the active layer, thickness of the active layer, minority carrier lifetime, space charge capacitance and injected current density.

I. 序 論

Ⅲ-V族 化合物半導體를 이용한 光通信用 光源은 시대적 요청에 따라 활발히 開發되고 있다. 특히 GaAs와 AlAs는 格子常數가 거의 同一하여 格子間의 不整合이 적고 Ga의 一部를 Al로 치환하여 LPE法을 이용한 GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs 異種接合이 容易하므로 光通

信用 發光다이오드의 製作에 널리 사용되어 왔다.^[1] 發光다이오드는 放射方向에 따라 表面放射形과 端面放射形 構造로 나누며 後者は 스펙트럼幅이 좁고 發光面積이 적어서 高變調帶域과 高速應答 및 光纖維와의 結合效率를 높일 수 있으므로 최근 아나로그 傳送에 最適인 構造로 대두되고 있다.^[2] 특히 周波數 應答은 光通信시스템에서 가장 重要한 設計變數이며 비록 50MHz 정도 까지의 變調가 기준 論文을 통해 發表된 경우는 있으나^[3] 遮斷周波數와 다이오드의 性能指數와의 關係를 체계적으로 정립한 論文은 없었다.

本 論文은 光通信用 光源을 아나로그 變調로 驅動시킬 때 周波數應答의 最適化를 위하여 活性層에 Ge를 억셉터로 液相成長한 端面放射形 GaAs/(Ga, Al) As

*正會員, 建國大學校 工科大學 電子工學科
(Dept. of Electron. Eng., Kon Kuk Univ.)

接受日字: 1984年 2月 17日

(※ 本 論文은 1983年度 産學協同財團 學術研究費로 수행된 것임.)

對稱 2 重異種接合 發光다이오드(DH-LED)를 모델로 채택하여 다이오드의 性能指數들인 活性層의 正孔濃度, 活性層幅, 少數캐리어壽命, 禁止帶幅, 屈折率, 空間電荷容量 및 注入電流密度 등의 物理的 諸變數들을 理論的 概念으로 체계있게 解析하였다.

II. 모델 解析

異種接合은 최초로 W. Anderson^[1]이 Ge-GaAs 接合에서 이루어졌고 H. Krömer가 GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs 接合의 가능성을 예언한 후 Panish, Hayash(BTL) 그룹, Alferov, Andereev(소련) 그룹, Kressl, Nelson(RCA) 그룹에서 집중적으로 研究해 왔다. GaAs-GaAlAs系 異種接合은 n-GaAs/P-GaAs/P-(Ga, Al)As의 SH構造가 처음으로 시도되었고 연이어 n-GaAs/n-(Ga, Al)As/P-GaAs/P-(Ga, Al)As/P-GaAs의 DH構造가 대두되었다. 本 論文에서 모델로 設定한 GaAs-(Ga, Al)As 對稱 DH-LED는 LPE法에 의해 成長된 것을 기본으로 삼고 周波數應答의 最適化를 꾀하기 위하여 光出力이 低下되지 않는 範圍에서 禁止帶幅과 屈折率이 다른 活性層(P-GaAs)과 光導波路(P, n-Ga_{1-x}Al_xAs)層에서 캐리어와 光的 拘束을 따로 分離시켜 利得을 制御하도록 했다. 그림 1은 P-GaAs와 n-Ga_{1-x}Al_xAs 間의 에너지밴드構造이며 接合後 PN接合面에 spike ΔEc와 stepΔEv가 兩界面間의 電子親和力差 Δx로 인하여 形成되지만 Al組成比x를 0.3으로 할 때 Δx ≈ 0으로 되어 spike와 Notch現象을 최대한으로 줄일 수 있으므로^[11] 이러한 化合物半導體에 의한 GaAs-GaAlAs異種接합다이오드의 에너지밴드解析은 일반적인 PN接合다이오드의 Schottky 障壁理論과 유사하므로 近似 모델로 解析할 수 있다. 즉 接觸電位 qV_D는

$$qV_D = \phi_1 - \phi_2 \tag{1}$$

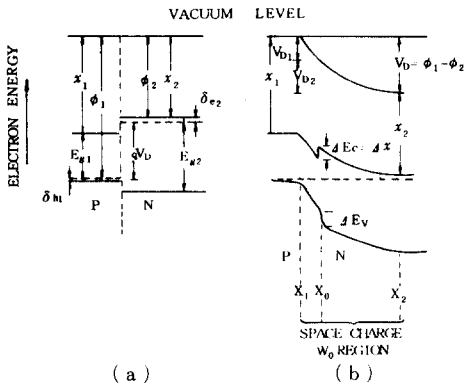


그림 1. 理想的인 anisotype 異種 接合 모델
Fig. 1. Model of the ideal anisotype heterojunction.

$$= E_{g1} + \Delta x - \delta_{n1} - \delta_{ez} \tag{2}$$

이고 注入電流密度는 n-Ga_{1-x}Al_xAs에서 P-GaAs로 移動하는 電子電流가 지배적이므로

$$J \approx J_n = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} (e^{qv/kT} - 1) \tag{3}$$

로 된다. 그리고 印加電圧 V에 의한 空乏層幅 w₀를 x₁, x₂의 合으로 나타내면

$$X_1 = \frac{2\epsilon_1 \epsilon_2 N_D}{qN_A} [(\epsilon_1 N_A + \epsilon_2 N_D)]^{1/2} (V_D - V)^{1/2} \tag{4}$$

$$X_2 = \frac{2\epsilon_1 \epsilon_2 N_A}{qN_D} [(\epsilon_1 N_A + \epsilon_2 N_D)]^{1/2} (V_D - V)^{1/2} \tag{5}$$

이고 空間電荷容量 C_{sp}(V)는

$$C_{sp}(V) = \frac{qN_A N_D \epsilon_1 \epsilon_2}{2(\epsilon_1 N_A + \epsilon_2 N_D)} (V_D - v)^{1/2} \tag{6}$$

이다. Ga_{1-x}Al_xAs의 禁止帶幅 E_g와 屈折率 n_r은 Vegard 法則에 의하여^[12]

$$E_g = 1.435 + 1.261x + 0.240x^2 \tag{7}$$

$$n_r = 3.590 - 0.710x + 0.091x^2 \tag{8}$$

로 나타내고 Al組成比 x값이 클수록 E_g는 增加하고 n_r은 減少함을 알 수 있다. 그리고 다이오드에 純마이여스가 印加할 때 活性層인 P-GaAs(幅d)에서 放射壽命 τ_r은

$$\tau_r = \frac{qd p_0}{2J} \left[\left(1 + \frac{4J}{qBdp_0^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \tag{9}$$

로 나타내고^[13] 여기서 注入電流密度가 낮으면

$$\tau_r \approx 1/P_0 \tag{10}$$

이고 注入電流密度가 크면

$$\tau_r \approx (gd/B)^{1/2} J^{-1/2} \tag{11}$$

가 되어 活性層의 正孔濃度에 무관함을 알 수 있다. 또 再結合常數 B는 正孔濃度 P₀가 1 × 10¹⁹cm⁻³범위까지의 거의 不變이었고 1.5 × 10⁻¹⁰cm²/s로 고정하였다. 그리고 活性層에서 放射壽命을 T. Moss의 量子力學論으로 解析하면^[14]

$$\tau_{BB} = \frac{1}{B_{BB}(n+P)} = \frac{32C^2 (\pi k T)^{3/2} m_0^{1/2} m_e m_r^{3/2}}{C_0(n+P) n_r E_g^2 h^3} \tag{12}$$

$$\tau_{BA} = \frac{1}{B_{BA} N_A^2} = \frac{\sqrt{2} C^2 m_r^{3/2} m_0^{1/2}}{8C_0 N_A^2 \pi n_r m_e^{1/2} (E_g - E_A)^2 a_A^{*3} G(a)} \tag{13}$$

이며 τ_{BB}와 τ_{BA}는 각각 밴드-밴드間과 밴드-억셉터間 천이할 때 放射壽命이다. 그리고 Shockley-Van Rosdrock(SVR)法에 의한 放射壽命 τ^{sh}는 P-GaAs 活性層에서 τ^{sh} = N_c/R₀ exp[(-E_g - F_p)/kT] (14)

이고 R₀는 放射遷移率이며

$$R_0 = \int_0^\infty \frac{8\pi^2}{C^2} n_r^2 \nu^2 k(h\nu) \exp(-h\nu/kT) d\nu \tag{15}$$

로 정의한다.¹¹⁾ 그런데 活性層內에는 轉位密度와 線缺陷으로 非放射遷移를 일으키며 이는 Shockley-Read-Hall 統計에 따르면 非放射再結合率 U_{nr} 과 非放射壽命 τ_{nr} 은

$$U_{nr} \approx \sigma_n v_{th} N_t \Delta n \quad (16)$$

$$\tau_{nr} = \Delta n / U_{nr} = (\sigma_n v_{th} N_t)^{-1} \quad (17)$$

로 된다. 따라서 放射壽命과 非放射壽命에 의한 總少數 캐리어壽命 τ_n 과 内部量子效率 η_i 는 각각

$$\tau_n = (1/\tau_n + 1/\tau_{nr})^{-1} \quad (18)$$

$$\eta_i = (1 + \tau_r/\tau_{nr})^{-1} \quad (19)$$

로 나타내며 τ_{nr} 이 클수록 η_i 가 1에 接近됨을 알 수 있다. τ_r 을 짧게 하기를 하여 活性層의 正孔濃도를 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上 添加하면 band tail이 形成되어 有效禁止帶幅 E_g' 가

$$E_g' = 1.424 - 1.6 \times 10^{-8} [P]^{1/3} \quad (20)$$

로 縮少됨을 Halperin-Lax理論⁵⁾에서 밝힌 바가 있다.

III. 最適 周波數 應答을 위한 模擬實驗

GaAs/(Ga, Al)As DH-LED를 아나로그變調로 이용할 때 最適周波數應答인 高變調帶域과 高速應答이 必要로 하며 이를 CW와 Pulse變調로 驅動시킬 때 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 最適設計變數值들을 設定한다.

1. CW Analog變調時.

P-GaAs活性層에서 放射되는 光束을 ϕ_1 이라 할 때

$$\phi_1 = \frac{\eta_i}{\tau_n} \int_0^d \ln(x) \exp[-\alpha(d-x)] dx \quad (21)$$

이며 $n(x)$ 는 注入電子濃度, α 는 吸收係數이다. 그리고 變調周波數 ω 에 의존한 光束 $\phi_1(\omega)$ 는

$$\phi_1(\omega) = \frac{\eta_i i_{d1}}{q} \frac{F(d, L_n^*(\omega), D_n, \alpha, s)}{(1 + j\omega\tau_n)} \quad (22)$$

로 나타내고 여기서 F 는 다이오드의 物理的 諸量을 표시하는 性能指數이며

$$F = 1 - \frac{SL_n^*/D_n}{\text{Sinh}(d/L_n^*) + SL_n^*/D_n \cosh(d/L_n^*)} \quad (23)$$

로 된다. 또 擴散電流 i_{d1} 은 空間電荷容量 C_{sp} 와 接合電壓 u_1 의 함수로 나타내면

$$i_{d1} = i_1 - j\omega C_{sp} u_1 \quad (24)$$

$$u_1 = \frac{kT}{q\phi_0} \frac{G}{\sqrt{1 + j\omega\tau_n}} i_{d1} \quad (25)$$

이고 G 는 임피던스因子이며

$$G = \frac{\coth(d/L_n^*) + SL_n^*/D_n}{1 + SL_n^*/D_n \coth(d/L_n^*)} \quad (26)$$

로 된다. 따라서 空間電荷容量과 擴散容量을 모두 고려할 때 光束 $\phi_1(\omega)$ 의 周波數應答은

$$\phi_1(\omega) = \frac{\eta_i i_1}{q} \frac{F}{1 + j\omega\tau_n (1 + \tau_{sp}/\tau_n G \sqrt{1 + j\omega\tau_n})} \quad (27)$$

이다. 이때 3dB 遮斷周波數 f_c 는

$$f_c = 1/2\pi\tau_n \quad (28)$$

이다.

2. Pulse Analog 變調時

일반적인 PN接合 다이오드는 펄스電流 I_T 로 驅動될 때 C_{sp} 에 의한 變化가 C_d 에 비해 아주 느리므로 本論文에서 모델로 채택한 對稱 CaAs/(Ga, Al)As DH-LED에서도 C_{sp} 를 常數로 두고 解析하였다. 즉 I_T 의 變化는

$$\frac{dI}{dt} = \frac{B\tau_n I_0 (I+1) (I_T - 1)}{C_{sp} + B\tau_n I_0 (I+1)} \quad (29)$$

로 나타내며 여기서 I_0 는 節和電流, $\beta = q/2kT$, $\tau = t/\tau_n$, $I = I_d/I_0$, $I_T = I_T/I_0$ 로 두고 $I > 1$, $I_T > 1$ 일 때 式(29)를 積分하면

$$\tau = \frac{C_{sp}}{\beta\tau_n I_T} \ln I + \left(\frac{C_{sp}}{\beta\tau_n I_T} + 1 \right) \ln \left(1 - \frac{I_d}{I_T} \right)^{-1} \quad (30)$$

이다. 式(30)에서 hI_T ($0 < h < 1$)의 上昇時間은

$$t(h) = \frac{C_{sp}}{\beta I_T} \ln \left[\frac{h}{(1-h)} \frac{I_T}{I_0} \right] + \tau_n \left(\frac{1}{1-h} \right) \quad (31)$$

이며 $h_1 I_T$ 와 $h_2 I_T$ 間의 上昇時間은

$$t(h_2) - t(h_1) = \frac{C_{sp}}{\beta I_T} \left[\frac{h_2(1-h_1)}{h_1(1-h_2)} \right] + \tau_n \ln \left(\frac{1-h_2}{1-h_1} \right) \quad (32)$$

이다. 그리고 式(31)에서 出力의 $\frac{1}{2}$ 點까지의 上昇時間을 $t_{1/2}$ 로 가정하면

$$t_{1/2} = \frac{C_{sp}}{\beta I_T} \ln \frac{I_T}{I_0} + \tau_n \ln 2 \quad (33)$$

로 되며 10~90% 上昇時間 t_n 은 式(32)로부터

$$t_n = \left(\frac{2C_{sp}}{\beta I_T} + \tau_n \right) \ln 9 \quad (34)$$

가 된다. $t_{1/2}$ 과 t_n 을 줄이기 위해서는 式(33), (34)에서 增大해야 하며 이때 $t_{1/2}$ 과 t_n 은 각각

$$t_{1/2} \approx \tau_n \ln 2 \quad (35)$$

$$t_n \approx \tau_n \ln 9 \quad (36)$$

가 되며 오직 소수 캐리어壽命에만 의존함을 알 수 있다.

IV. 結果考察

本論文에서 모델로 設定한 對稱 GaAs/(Ga, Al)As DH-LED는 活性層의 不純物로 Ga를 添加할 때 最適周波數 應答에 必要한 다이오드의 物理的 諸要素를 考察하면

첫째, 再結合常數 B 값을 SVR法으로 계산하여 $1.5 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$ 로 고정하였다. 이는 기존論文인 Halperin-Lax의 禁止帶幅縮少와 Casey⁶⁾의 吸收係數效果를 삽입했을 때와 近似하고 또 正孔濃도에 관계없이

定함을 Namizaki⁷⁾의 實驗値에서도 確因하였다.

둘째, 少數캐리어壽命 τ_n 을 比較分析한 結果는 그림 2에 있고 여기서 曲線 1은 式(9)로 구했으며 式(20)에 의한 有效禁止帶幅의 縮小效果를 넣으면 曲線 2가 된다. 이는 Casey의 實驗値와 近似하다. 曲線 3과 4는 常溫에서 밴드-밴드間과 밴드-억셉터間 遷移壽命인 τ_{BB} , τ_{BA} 를 式(12)(13)으로 구한 것이고 曲線 3은 Ettenberg,¹⁴⁾와 Hwang¹⁵⁾의 實驗値와 接近함을 보였고, 이는 正孔濃도가 $1 \times 10^{16} < P_0 < 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 範圍에서 理論과 實驗의 近似를 立證하고 있다.

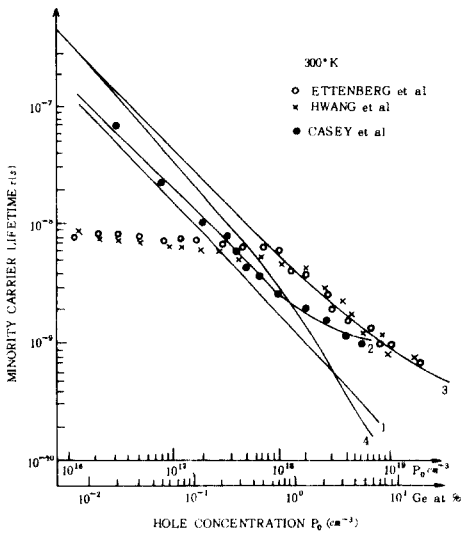


그림 2. 正孔濃도에 따른 少數캐리어 壽命
Fig. 2. Minority carrier lifetime as a function of Ge concentration in the active layer at 300°K.

셋째, 100mA의 驅動電流가 印加될 때 活性層幅 d와 正孔濃도 P_0 에 따른 3dB遮斷周波數 f_c 를 구하여 그림 3에 도시하였다. 이를 Darson¹⁰⁾의 實驗値와 比較해 보면 P_0 가 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以下에서 d를 줄이면 f_c 가 增大되고 그 以上에선 d에 無関함을 알 수 있다. 그러므로 Photon의 吸收現象이 나타나지 않는 領域에서 最適인 活性層幅은 0.1 μm 로 하였다. 理論에 의하면 P_0 가 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 에서 f_c 를 1GHz까지 올릴 수 있었지만 Auger效果에 의한 非放射再結合으로 内部量子效率 η_i 가 激減되므로 本 論文에서는 發光效率과 周波數가 最適値를 갖는 P_0 를 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 로 設定하고 이때 遮斷周波數는 250MHz를 얻었다.

넷째, 펄스電流로 驗動할 때 1/2電力點에 도달하는 時間과 10~90%의 上昇時間이 電流에 따라 變化하는

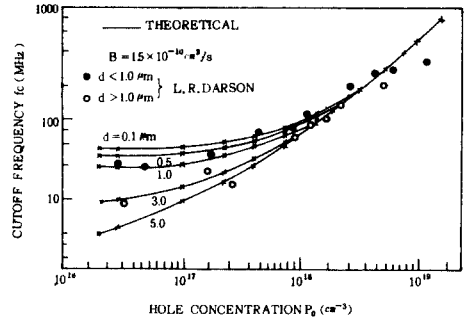


그림 3. 活性層의 正孔濃도에 의한 遮斷周波數
Fig. 3. Cutoff frequency versus hole concentration in active region.

것을 그림 4에 나타내고 이는 Tsarenkov¹¹⁾와 Zuck¹²⁾의 理論이 없는 實驗値에 매우 近接시킬 수가 있었다. 또 P_0 를 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 로 할 때 C_{sp} 값은 t_n 에서 300PF, $t_{1/2}$ 에서 200PF이며 後者は 零바이어스일 때 C_0 값($\approx 210\text{PF}$)에 近似하였다. 그리고 100mA 以上の 驗動電流에서 上昇時間은 C_{sp} 에 관계없이 一定함을 알 수 있으며 이는 理論인 式(35), (36)에서도 잘 보여 주고 있다. 결국 高變調帶域과 高速應答를 實現하기 위해서는 少數캐리어壽命의 단축이 公同된 열쇠를 쥐고 있음을 알 수 있다. 따라서 τ_n 을 줄이기 위하여 安定한 光出力을 얻는 範圍에서 驗動電流와 活性層의 正孔濃도를 올려야 하고, 부수적인 방안으로 C_{sp} 를 가급적 줄

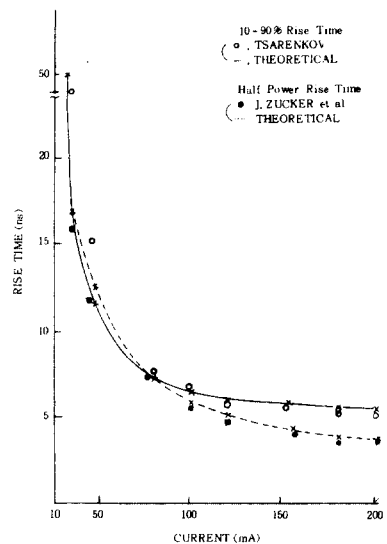


그림 4. 電流變化에 따른 t_R 과 $t_{1/2}$ 關係
Fig. 4. 10-90% risetime t_R and half power risetime $t_{1/2}$ together with measured values as a function of current.

여야 하며 이를 위해서는 内部的인 면에서 Proton Bombardment법이나 stripe構造가 外部的인 면에서 current peaking法이 대두된다.

다섯째, C_{sp} 에 의한 時定數 τ_{sp} 와 C_d 에 의한 少數 캐리어壽命 τ_n 이 周波數 應答에 미치는 影響을 그림 5에 나타낸다. 여기서 그림 (a)는 τ_{sp} 를 固定시키고 τ_n 을 τ_{sp} 보다 차츰 增大시켜갈 때의 分布圖이다. 이때 τ_{sp} 가 2ns일 때보다 작은 0.2ns로 할 때 相對應答이 半으로 떨어지는 遮斷變調帶域이 增加됨을 알 수 있다. 그림 (b)는 反對로 τ_n 을 0.2ns와 2ns로 固定시키고 τ_{sp} 를 보다 크게 하여 同一한 方法으로 變化시킨 경우이며 이와같이 τ_{sp} 가 커지면 遮斷變調帶域이 매우 激減됨을 볼 수 있다. 本 論文에선 最適正孔濃度를 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 로 할 때 遮斷周波數가 250MHz였고 이는 τ_n 과 τ_{sp} 가 그림 5 (a)에서 각각 3ns, 2ns에 해당된다.

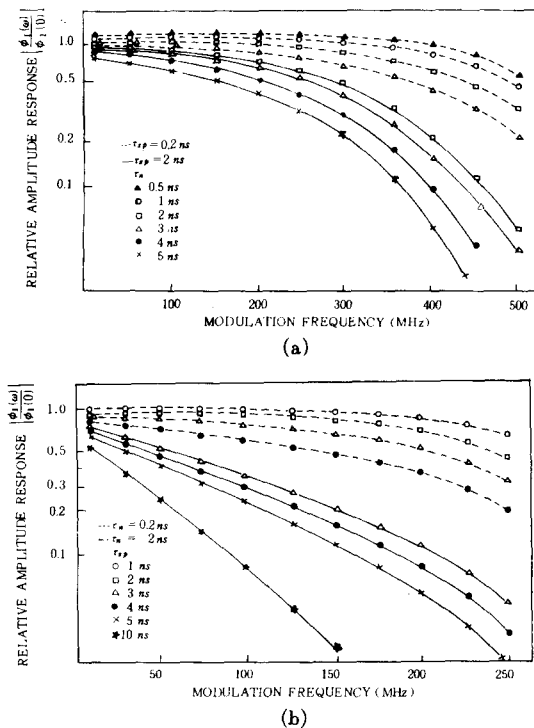


그림 5. GaAs/(Ga, Al)As DH-LED의 周波數應答
Fig. 5. The frequency response of the GaAs/(Ga, Al)As DH-LED.

V. 結 論

本 論文은 周波數應答의 最適化를 위하여 對稱 GaAs/(Ga, Al)As DH-LED를 모델로 設定하여 다이오드의 設計變數들인 活性層의 正孔濃度, 活性層幅 少數 캐리어壽命, 擴散距離, 吸收係數, 禁止帶幅, 屈折率 및 空

間電荷容量 등의 物理的 諸因子들의 相互關係를 체계 있게 整理하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 最適設計變數值들을 구했다. 活性層의 억셉터 不純物로 Ga 가 Zn 보다 유리하고 GaAs와 AlAs는 格子常數가 거의 同一하여 LPE法으로 異種接合할때 界面에서의 不整合을 最低限으로 줄일 수 있는 잇점을 이용했다. 그리고 모델解析에 의한 理論을 基礎論文의 實驗值에 가장 近接시키기 위하여 再結合常數 B 값을 $1.5 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$ 로 하였다. 결국 高變調帶域과 高速應答을 위해서는 少數 캐리어 壽命의 단축이 필수적이고 發光量子效率과 遮斷變調帶域을 모두 만족시키는 最適正孔濃度를 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 으로 하였고 이때 3dB 遮斷周波數와 少數 캐리어 壽命은 각각 250MHz와 3ns였다. 끝으로 本 論文은 1983年度 産學協同財團學術研究費에 의하여 수행된 것임을 밝힌다.

參 考 文 獻

- [1] 吳煥述, "GaAs/(Ga, Al)As 3重異接合 發光 다이오드의 周波數 應答의 最適化," 연세대학교 박사학위논문, 2, 1984.
- [2] 吳煥述, 金暎權, 金鳳烈, "GaAs-(Ga, Al)As 3重 hetero 접合 LED의 周波數 應答의 最適化", 電子工學會 夏季學術大會論文集, 7, 1983.
- [3] C. Burrus, "Direct modulation efficiency of LED's for optical fiber transmission application," *Proc. IEEE*, vol. 63, pp.329-331, Feb. 1975.
- [4] W. Anderson, "Mode confinement and gain injection lasers," *IEEE. J. Quant. Elect.*, vol. 1, pp. 228-232, 1965.
- [5] B. Halperin, M. Lax., "Impurity band tail in the high density limit. I. minimum counting methods," *Phys. Rev.*, vol. 148, pp. 722-729, 1966.
- [6] H. Casey, "Concentration dependent absorption and spontaneous emission of heavily doped GaAs," *J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 2, pp. 631-643, Feb. 1976.
- [7] H. Namizaki, "Current dependence of spontaneous carrier lifetimes in GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs double heterostructure lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 24, no. 10, pp. 486-487, May 1974.
- [8] M. Ettenberg, H. Kressel, S.L. Gilbert., "Minority carrier diffusion length and recombination lifetime in GaAs: Ge prepared by Liquid phase epitaxy," *J.*

- Appl. Phys.*, vol. 44, no. 2, pp. 827-831, Feb. 1973.
- [9] C. Hwang, J.C. Dymant., "Dependence of threshold and electron lifetime on acceptor concentration in GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 7, pp. 3240-3244, July 1973.
- [10] L.R. Darson, "Near equilibrium LPE growth of GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs double heterostructures," *J. Cryst. Growth.*, vol. 27, pp. 86-90, 1974.
- [11] G.V. Tsarenkov, "Transient characteristics of electroluminescent diodes," *Sov. Phys. Semicond.*, vol. 5, pp. 2016-2020, 1972.
- [12] J. Zucker, "The design of optimum high radiance double heterojunction (Al, Ga)As LED's for optical communication systems," *IEDM. Tech. Dig.*, 633, 1976.
- [13] Z. Alferov, "Al Ga As - GaAs heterojunction injection lasers with a low room temperature threshold", *Sov. Phys., Semicond.*, vol.3, pp. 1107, 1970.
- [14] T.S. Moss, *Semiconductor Opto Electronics*. Buffer Worth, 1973.
- [15] W. Van Roosbroeck and W. Shockley, "photon radiative recombination of electrons and holes in germanium," *Phys. Rev.*, vol. 94, pp. 1558, 1954.
-