

論文95-32A-11-3

반도체 레이저 다이오드의 2차원 수치해석

(A Two-dimensional Numerical Analysis of Semiconductor Laser Diodes)

金 炯 來 *, 郭 桂 達 *

(Hyeong Rae Kim and Kae Dal Kwack)

요 약

본 논문에서는 상업용 반도체소자 시뮬레이터인 MEDICI를 수정하여 스트라이프 구조 반도체 레이저 다이오드를 해석할 수 있는 2차원 수치해석 시뮬레이터를 개발하였다. 반도체 레이저 다이오드의 특성을 구하기 위해서는 반도체 소자의 기본방정식에 Helmholtz 파동방정식과 광자의 비울방정식을 해석하여야 하며, 반도체 레이저 다이오드에서 중요한 재결합기구인 자연방출에 의한 재결합율과 유도방출에 의한 재결합율을 추가하여야 한다. 따라서 우리는 MEDICI를 이용하여 반도체 레이저 다이오드를 시뮬레이션할 수 있도록 Helmholtz 파동방정식과 광자의 비울방정식을 해석하는 루틴과 중요한 두가지 재결합항을 추가하였다. 그리고 이와 같이 개발된 시뮬레이터의 타당성을 검증하기 위해 이득도파형 및 굴절율도파형 이중이중접합구조(DH : Double Heterostructure) 반도체 레이저 다이오드를 시뮬레이션하였다. 얻어진 결과는 이미 발표된 문헌의 결과와 비교적 잘 일치하였다. 또한 본 논문에서 제시한 방법은 다양한 DH 레이저 다이오드의 특성을 파악하여 최적 설계를 하는 도구로 사용될 수 있으리라 기대된다.

Abstract

In this paper, we developed a two-dimensional numerical simulator which could analyze the stripe geometry semiconductor laser diodes by modifying the commercial semiconductor device simulator, MEDICI. In order to study the characteristics of semiconductor laser diodes, it is necessary to solve the Helmholtz wave equation and photon rate equation in addition to the basic semiconductor equations. Also the recombination rates due to the spontaneous and the stimulated emissions should be included, which are very important recombination mechanisms in semiconductor laser diodes. Therefore, we included the solution routines which analyzed the Helmholtz wave equation and the photon rate equation and two important recombination rates to simulate the semiconductor laser diodes. Then we simulated the gain-guiding and index-guiding DH(Double Heterostructure) semiconductor laser diodes to verify the validity of the implemented functions. The results obtained from simulation are well consistent with the previously published ones. This allows us to know the operating characteristics of DH laser diodes and is expected to use as a tool for optimum design.

I. 서 론

1960년대 주입형 반도체 레이저 다이오드가 개발된

이래 광산업도 많은 발전을 보이고 있다. 특히, 전형적인 반도체 레이저 다이오드는 폭 $400 \mu\text{m} \times$ 두께 $100 \mu\text{m} \times$ 길이 $300 \mu\text{m}$ 로 소형이고, 칩 자체에 광학적인

*正會員, 漢陽大學校 電子工學科
(Elec. Eng. Dept., Hanyang Univ.)

接受日字: 1995年4月3日, 수정완료일: 1995年10月30日

부품을 완비하고 있어 우수한 신뢰성을 가지며, 다른 레이저에 비해 효율이 매우 높으며(수~수십%), 고속으로 직접변조가 가능하며, 소비전력이 작으며, 매우 넓은 파장 선택폭(650 nm ~ 1.7 μ m)을 갖는 등 매우 우수한 특성을 보유하고 있기 때문에 광섬유 통신, CD (Compact Disk), 레이저 프린터, 지시기(pointer) 등 광전 산업의 광원으로서 많은 주목을 받고 있다¹¹⁾.

1980년대에 들어 반도체 레이저 다이오드의 구조가 복잡해지고 다양한 응용분야를 가지게 됨에 따라 반도체 레이저 다이오드를 보다 정확히 해석하여 소자의 구조를 최적 설계하는 분야도 많은 연구가 진행되고 있다. 반도체 레이저 다이오드를 해석하기 위한 방법으로는 해석적 방법^{12,3,4,5)}, 1차원 수치해석방법¹⁶⁾ 및 2차원 수치해석방법^{17~14)} 등 3가지가 있다. 이중 해석적인 방법이나 1차원 수치해석방법은 많은 근사를 취해야하며, 발진개시전류밀도(threshold current density) 이상의 특성을 해석하기 힘든 단점이 있다. 따라서 소자의 구조가 복잡해지는 현재에는 주로 2차원 수치해석방법이 사용되고 있다.

2차원 수치해석방법은 소자의 2차원 구조에 대해 Poisson 방정식을 해석하여 전위(potential) 분포를 구하고 전자 및 전류의 연속방정식을 해석하여 전자 및 정공 농도를 구하며, 열조건방정식을 해석하여 결정 격자의 온도를 계산한다. 이러한 값을 바탕으로 복소함수로 주어지는 Helmholtz 파동방정식을 2차원으로 수치해석하여 위치에 따른 빛의 상대적인 세기를 계산한다. 마지막으로 광자(photon)의 비율방정식을 해석하여 방출되는 광자의 수를 계산하고 그에 따른 출력광의 세기(output power)를 계산한다. 이 방법은 계산 시간은 약간 많이 걸리지만 2차원 소자 구조에 대한 다양한 물리량을 계산할 수 있어 소자의 최적 구조를 설계하는 도구로 사용될 수 있다.

본 논문에서는 2차원 수치해석방법에 의하여 반도체 레이저 다이오드를 해석할 수 있는 방법을 제시한다. 즉, 미국 TMA사의 상업용 반도체소자 시뮬레이터인 MEDICI를 수정·발전시켜 반도체 레이저 다이오드를 해석할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다. 현재까지의 MEDICI는 Poisson 방정식과 전자 및 정공의 전류연속방정식을 해석하는 기능 및 열조건방정식(thermal condition equation)을 해석하는 기능이 포함되어 있다. 그러나 위치에 따른 방출광의 세기 분포를 계산하

기 위한 Helmholtz 파동방정식과 방출되는 광자의 수를 계산하기 위한 광자의 비율방정식을 해석하는 기능은 포함되어 있지 않았다. 게다가 반도체 레이저 다이오드에서는 일반 전자소자와는 달리 두가지 매우 중요한 재결합과정 - 유도방출(stimulated emission)에 의한 재결합율과 자연방출(spontaneous emission)에 의한 재결합율 - 이 포함되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 MEDICI의 원시프로그램(source program)을 바탕으로 하여 위에서 설명한 기능을 추가하였다.

그리고 본 시뮬레이터의 타당성을 제시하기 위해 CD 등의 광원으로 널리 사용되고 있는 GaAs/AlGaAs계 반도체 레이저 다이오드(방출파장 ~0.9 μ m)와 고품질의 광통신용 광원으로 널리 사용되고 있는 InGaAsP/InP계 레이저 다이오드(방출파장 ~1.3 μ m)에 대해 시뮬레이션하였다. 특히 InGaAsP/InP계 반도체 레이저 다이오드는 온도에 따른 특성의 변화가 매우 심하게 일어나고 있는데, 이를 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 본 시뮬레이터는 이득도파형(gain-guiding)뿐만 아니라 굴절율도파형(index-guiding)에 대해서도 시뮬레이션할 수 있음을 알 수 있었으며, 결국 MEDICI를 이용하여 반도체 레이저 다이오드의 구조를 최적 설계할 수 있게 되었다.

본 논문은 서론에 이어 제 2절에서는 반도체 레이저 다이오드를 해석하기 위한 수학적 모델에 대해 설명하고, 제 3절에서는 수치해석과정에 대해 설명하며, 제 4절에서는 이득도파형 및 굴절율도파형 반도체 레이저 다이오드에 대해 적용한 시뮬레이션 결과에 대해 설명한다. 그리고 마지막으로 제 5절에서는 결론을 기술한다.

II. 수학적 모델

이 절에서는 반도체 레이저 다이오드를 2차원으로 수치해석하기 위한 특성방정식에 대해 설명한다. 반도체 레이저 다이오드에 대한 특성방정식은 반도체 레이저 다이오드의 전기적 특성을 지배하는 전기적방정식과 광학적 특성을 지배하는 광학적 특성방정식의 두 부분으로 나누어 설명할 수 있다.

1. 반도체 레이저 다이오드의 전기적 특성방정식
반도체 레이저 다이오드의 전기적 특성을 지배하는

특성방정식은 전위분포를 지배하는 Poisson 방정식과 전자 및 정공의 농도분포를 지배하는 전자 및 정공에 대한 전류연속방정식으로 구성되며, 이와 별도로 결정 격자의 온도를 지배하는 열조건방정식이 있다^{1, 7, 11, 12, 14, 16]}. 전기적 특성방정식은 MEDICI의 프로그램^{16]}을 이용하고 있기 때문에 여기서는 우리가 추가한 두가지의 중요한 재결합과정에 대해서만 설명한다.

반도체 레이저 다이오드에서의 순재결합율은

$$R = R_{SRH} + R_{Aug} + G_{av} + R_{sp} + R_{st} \quad (1)$$

로 주어지며, 여기서 R_{SRH} , R_{Aug} , G_{av} , R_{sp} 및 R_{st} 는 각각 Shockley-Read-Hall 재결합, Auger 재결합, 충돌이온화(impact ionization)에 의한 생성, 자연방출에 의한 재결합 및 유도방출에 의한 재결합을 나타낸다. 반도체 레이저 다이오드는 높은 순방향비어스에서 동작하는 소자이므로 충돌이온화에 의한 영향을 무시할 수 있으며, SRH 재결합이나 Auger 재결합의 경우 다양한 문헌^[7, 12, 14, 16]에 이미 제시되어 있으므로, 여기서는 반도체 레이저 다이오드의 해석에 있어서 가장 중요한 유도방출에 의한 재결합과 자연방출에 의한 재결합 항만을 살펴본다.

레이저 동작이 일어나는 경우 가장 중요한 재결합항인 유도방출에 의한 재결합은

$$R_d = \frac{c_0}{n_{eff}} g(x, y) I(x, y) S \quad (2)$$

로 계산할 수 있으며, 여기서 c_0 는 진공에서의 빛의 속도, n_{eff} 는 유효굴절율(effective refractive index), S 는 방출되는 광자의 수이며, $g(x, y)$ 는 국소 이득(local gain) 혹은 물질이득(material gain)이고, $I(x, y)$ 는 정규화된 빛의 세기로 각각 다음과 같이 주어진다.

$$g(x, y) = a [N(x, y) - n_c] , \quad (3)$$

$$N(x, y) = \min [n^f(x, y), p(x, y)]$$

$$I(x, y) = \frac{|E(x, y)|^2}{\int \int |E(x, y)|^2 dx dy} \quad (4)$$

식 (3)에서 a 와 n_c 는 각각 국소이득계수(local gain constant) 및 투명캐리어농도(transparency carrier concentration)로 본 논문에서는 GaAs 물질계에 대해 $a = 1.08 \times 10^{-16} [\text{cm}^2]$, $n_c = 1.35 \times 10^{18} [/\text{cm}^3]$

의 값을 취하였으며^[2, 5], InGaAsP 물질계에 대해서는 $a = 1.35 \times 10^{-16} [\text{cm}^2]$, $n_c = 1.111 \times 10^{18} [/\text{cm}^3]$ 의 값을 취하였다^[19]. 또한 식 (4)에서 $E(x, y)$ 는 Helmholtz 파동방정식의 해로 광학적 전계(optical electric field)라 한다.

한편 자연방출에 의한 재결합은

$$R_{sp} = B [n^f(x, y) p(x, y) - n_0^f(x, y) p_0(x, y)] \quad (5)$$

로 주어지며, 여기서 $n^f(x, y)$ 는 전도대의 Γ 계곡(valley)에서의 전자농도, $p(x, y)$ 는 정공의 농도, $n_0^f(x, y)$ 및 $p_0(x, y)$ 는 각각 열평형상태에서 전도대의 Γ 계곡의 전자농도 및 정공농도이며, B 는 발광성 재결합 상수(radiative constant)로 GaAs 및 InGaAsP 물질계에 대해 각각 다음과 같은 경험적인 값을 사용하였다^[7, 11, 19].

$$B = 1.52 \times 10^{-10} - 1.2 \times 10^{-20} \cdot \min [n^f(x, y), p(x, y)] \quad (6)$$

[cm^3/s]

for GaAs ($\lambda = 0.9\mu\text{m}$)

$$B = 1.2 \times 10^{-10} \quad [\text{cm}^3/\text{s}] \quad (7)$$

for InGaAsP ($\lambda = 1.3\mu\text{m}$)

또한 GaAs/AlGaAs계 물질의 열전도도나 고유열에 대한 값은 참고문헌 [17] 및 [18]에 제시된 값을 사용하였다.

2. 반도체 레이저 다이오드에 대한 광학적 방정식
반도체 레이저 다이오드에 대한 광학적 방정식은 방출되는 빛의 형태를 지배하는 Helmholtz 파동방정식과 방출되는 광의 출력을 지배하는 광자의 비율방정식(rate equation)으로 구분할 수 있다^[5, 11].

1) Helmholtz 파동방정식

Helmholtz 파동방정식은 Maxwell 방정식으로 부터 다음과 같이 유도할 수 있다^[2, 11, 14].

$$\nabla^2 E(x, y) + (k_0^2 \bar{n}^2 - \beta^2) E(x, y) = 0 \quad (8)$$

여기서 $E(x, y)$ 는 복소값(complex value)으로 주어지는 광학적 전계이고, k_0 는 진공에서의 파수(wave number)로서 $(2\pi/\lambda_0)$ 로 주어지고, β 는 모드의 전파 상수(propagation constant)이며, \bar{n} 는 복소굴절율(complex refractive index)로 다음 식으로부터 계산할 수 있다

$$\begin{aligned} \bar{n}(x, y)^2 &= \epsilon(x, y) \\ &= \bar{n}_0^2 + (-\alpha_R + j) \frac{\bar{n}_0 g(x, y)}{k_0} - j \frac{\bar{n}_0}{k_0} (c_n n + c_p p) \quad (9) \end{aligned}$$

여기서 \bar{n}_0 는 물질이 벌크(bulk) 상태에 있을 때의 굴절율, α_R 은 선폭확대계수(linewidth enhancement factor), $g(x, y)$ 는 국소이득, c_n, c_p 는 각각 자유캐리어 흡수계수(free carrier absorption coefficient)이다. 본 논문에서는 $\alpha_R = 4.0$ 의 값을 취하였으며^[11], 자유캐리어 흡수계수는 GaAs 물질계에 대해서는 $c_n = 3.0 \times 10^{-18}$ [cm²], $c_p = 7.0 \times 10^{-18}$ [cm²]의 값을 택하였으나^[7,11], InGaAsP 물질계에 대해서는 타당한 값을 제시한 참고문헌을 구하지 못해 $c_n = 0.0$ [cm²] 및 $c_p = 0.0$ [cm²]의 값을 취하였다. 식 (9)을 자세히 살펴보면, 전기적 특성방정식의 해가 ($\bar{n}^2 - \bar{n}_0^2$)의 항을 통하여 광학적 특성방정식에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

한편 주어진 미분방정식을 2차원 수치해석하기 위해서는 경계에서의 값, 즉, 경계조건(boundary condition)을 알아야만 한다. 파동방정식에 대한 경계조건은 대칭적인 경계에서의 조건과 전극이나 유전체와의 경계조건으로 나누어 생각할 수 있으나, 본 논문에서는 소자의 2차원 구조 전체에 대해 시뮬레이션하였기 때문에 파동방정식에 대한 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{E}(x, y)|_{\text{all the boundary}} = 0 \quad (10)$$

2) 광자에 대한 비율방정식
광자에 대한 비율방정식은

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \left(\frac{c_0}{n_{eff}} G_m - \frac{1}{\tau_{ph}} \right) S + C \tilde{R}_{sp} \quad (11)$$

로 주어지며, 여기서 G_m 은 모드이득(mode gain), τ_{ph} 는 광자의 수명(lifetime), C 는 자연방출계수(spontaneous emission factor), \tilde{R}_{sp} 는 자연방출율이다. 이때 G_m, \tilde{R}_{sp} 는 소자의 영역에 대한 평균값의 개념으로

$$A = \frac{\int \int A'(x, y) |\tilde{E}(x, y)|^2 dx dy}{\int \int |\tilde{E}(x, y)|^2 dx dy} \quad (12)$$

으로 구할 수 있으며, 여기서 A 는 구하고자 하는 평균값이고 $A'(x, y)$ 는 국소지점에서의 값이다. 한편 τ_{ph} 는

$$\frac{1}{\tau_{ph}} = \frac{c_0}{n_{eff}} (\alpha_{CL} + \alpha_{act} + \alpha_m) \quad (13)$$

으로 주어지며, 여기서 α_{CL} , α_{act} 및 α_m 은 각각 클래딩층(cladding layer)에서의 흡수에 의한 손실, 활성층에서의 흡수에 의한 손실 및 벽개면(cleaved facet) 거울에서의 손실이다. 일반적으로 활성층에서의 흡수에 의한 손실 α_{act} 는 자유캐리어의 흡수에 의한 손실 α_{fc} 이다. 그러나 InGaAsP와 같은 일부 물질에서는 자유캐리어의 흡수에 대한 계수값이 알려져 있지 않다. 따라서 그러한 경우에는 활성층에서의 흡수손실(α_a)을 정의하고 $\alpha_{act} = \alpha_a$ 라 가정하여 계산하였다. α_{CL} 과 α_{act} 는 식 (12)의 평균값을 구하는 식을 이용하여 계산할 수 있으며, α_m 은 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha_m = \frac{1}{2L_c} \ln\left(\frac{1}{R_l R_r}\right) \quad (14)$$

여기서 L_c 는 Fabry-Perot 공진기(cavity)의 길이이며, R_l, R_r 은 각각 전방 및 후방에 위치하고 있는 벽개면 거울의 반사율(reflectivity)이다.

정상상태(steady-state)에서는 시간에 따른 미분항을 무시할 수 있으며, 자연방출계수가 상당히 작기 때문에 ($C \sim 10^{-4}$) 자연방출율에 의한 항을 무시할 수 있다. 따라서 결과적인 광자에 대한 비율방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G_m = \alpha_r = \alpha_{CL} + \alpha_{act} + \alpha_m \quad (15)$$

광자에 대한 비율방정식은 반도체 레이저 다이오드의 광학적 특성방정식과 전기적 특성방정식을 결합시켜주는 아주 중요한 방정식이며, 발전개시전류밀도 이상에서의 특성을 해석하기 위해서는 반드시 포함시켜야만 한다.

이제 지금까지 구한 광자의 수 S 와 파동방정식의 해 \tilde{E} 로부터 방출되는 광출력을 다음과 같이 계산한다^[7,11].

$$\begin{aligned} P &= h\nu \eta_D \int \frac{S}{\tau_{ph}} dV \\ &= \frac{hc_0^2 S}{2\lambda_0 n_{eff}} \frac{\ln(1/R_l R_r)}{1 + \sqrt{R_l/R_r(1-R_r)}(1-R_r)} \cdot \int \int |\tilde{E}|^2 dx dy \quad (16) \end{aligned}$$

III. 이산화 과정 및 수치해석 절차

1. 이산화 과정

반도체 레이저 다이오드를 해석하기 위해서는 다섯

가지의 특성방정식을 자기무당착(self-consistent)한 해를 가지도록 풀어야 한다. 그러나 이 다섯가지의 방정식은 복잡한 양상으로 얽혀 있으며, 해석적인 해를 구한다는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 수치해석적인 방법이 도입되어야 한다.

수치해석법이란 미분방정식으로 주어지는 특성방정식을 이산화(discretization) 과정을 통해 행렬로 구성되는 대수방정식으로 바꾸고 그 행렬식을 해석함으로써 원하는 결과를 얻는 방법이다^{15,16}. 이산화 과정은 일반적으로 유한차분법(FDM : Finite Difference Method)과 유한요소법(FEM : Finite Element Method)이 널리 사용된다. 유한차분법은 수학적 전개에 의한 방법으로 이산화과정이 간편하지만 물리적인 의미는 적다. 반면 유한요소법은 이산화과정이 물리량은 연속한다는 조건으로부터 출발하기 때문에 정확한 의미는 부여할 수 있으나 이산화 과정이 너무 어렵다는 단점이 있다.

MEDICI에서 사용하는 이산화 과정은 비교적 쉬운 면서도 FEM이 제공하는 물리량의 연속이라는 의미를 부여할 수 있는 일반화된 박스 이산화(GBD : Generalized Box Discretization) 혹은 제어체적법(control volume approach)이라 부르는 방법을 사용하고 있으며, 그리드(grid)는 삼각형을 사용한다. 본 논문에서는 MEDICI의 원시 프로그램을 이용하였기 때문에 Helmholtz 파동방정식의 이산화에는 GBD를 이용하였다. GBD 과정을 개념적으로 설명하면 다음과 같다¹²⁰.

먼저 일반적인 위치에 종속하는 미분방정식을 다음과 같이 표현하자.

$$\nabla \bar{F}(x, y) = u(x, y) \quad (17)$$

이 식 (17)을 그림 1에 표시된 제어체적(control volume)에 대해 적분하면

$$\int \int_{A_i} \nabla \bar{F} dx dy = \int_C \bar{F} \cdot \vec{n} dS = \int \int_{A_i} u(x, y) dx dy \quad (18)$$

을 얻을 수 있다. 여기서 A_i 는 해당되는 제어체적의 면적이고, C_i 는 그 제어체적의 경계(perimeter)이며, \vec{n} 은 제어체적의 경계에 수직한 방향의 방향벡터이다. 즉, 이산화하고자 하는 미분방정식을 식 (18)에 적용하여 계산하면 행렬로 구성된 대수방정식을 구할 수 있다.

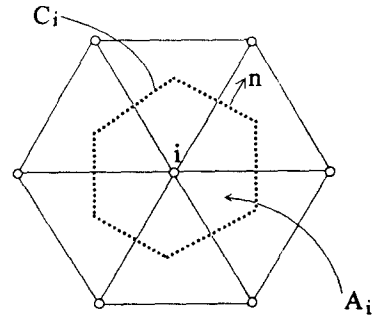


그림 1. MEDICI에서 사용하는 그리드의 모식도
Fig. 1. The schematic diagram for a grid used in MEDICI.

2. 수치해석 절차

본 논문에서는 Poisson 방정식과 전자 및 전류의 전류연속방정식에 대한 해법은 MEDICI의 원시프로그램을 이용하였다¹⁶. 그러나 반도체 레이저 다이오드의 특성해석에 필수적인 유도방출에 의한 재결합항과 자연방출에 의한 재결합항을 포함시켰으며, Helmholtz 파동방정식의 해를 구하는 과정과 광자에 대한 비울방정식으로부터 광자의 수를 구하는 과정을 포함시켰다. 또한 반도체 레이저 다이오드의 해석에 필요한 물질상수를 설정하는 루틴을 포함시켰다.

한편, Helmholtz 파동방정식을 이산화하면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$K \tilde{E} = \lambda B \tilde{E} \quad (19)$$

여기서 K 는 복소행렬로 주어지며, B 는 실수이고 양정의(positive definite) 행렬이며, \tilde{E} 는 구하고자 하는 해벡터(solution vector)이다. 식 (18)은 고유치 문제(eigen value problem)로 주어짐을 알 수 있으며, 이때 λ 를 고유값(eigen value), \tilde{E} 를 고유벡터(eigenvector)라 부른다. 실제적으로 K 가 복소행렬로 주어지기 때문에 고유값 및 고유벡터도 복소값을 가지게 된다. 고유값 문제는 일의적인(unique) 해가 존재하지 않으며, 고유값을 구한 후 이를 이용하여 고유벡터를 계산하는 과정을 거친다. 고유값 문제의 해를 빠른 방법으로 구하는 것은 반도체 레이저 다이오드의 해를 구하는데 있어 필수적이며, 본 논문에서는 RQIIM(Rayleigh Quotient Inverse Iterative Method)^{11,21}을 사용하였다. 또한 RQIIM을 이용하

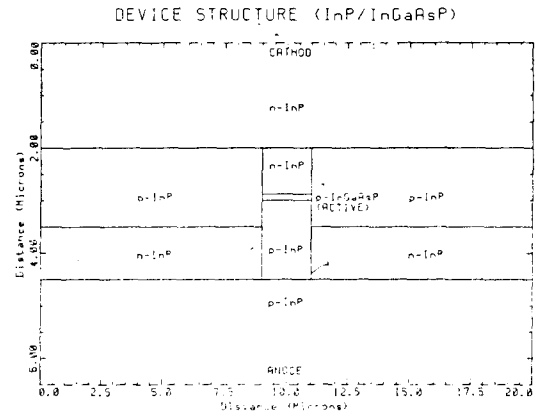
여 고유치문제를 해결하기 위해서는 고유값과 고유벡터에 대한 초기값이 필요하다. 여기서는 고유값에 대한 초기값으로 해석적인 방법¹²²⁾으로 구한 결과를 이용하였으며, 고유벡터의 초기값으로는 경계에서는 0 그리고 나머지 영역에서는 1의 값을 주었다. Helmholtz 파동방정식은 복소함수로 주어지기 때문에 많은 주의를 기울여야 한다. 본 논문에서는 변수를 복소수로 잡지 않고 광학적 전계 E 를 실수항과 허수항으로 나누고 이를 하나의 해벡터로 묶는 결합법(coupled method)을 사용하였다.

시뮬레이터의 실행순서는 먼저 열평형상태에서 전기적 특성방정식을 해석하여 전위 분포와 캐리어농도 분포를 구한다. 이 결과를 바탕으로 하여 Helmholtz 파동방정식을 해석하여 국소적인 빛의 분포를 계산한다. 이어 모드이득을 계산하고 그 값과 총손실의 값을 비교한다. 모드이득이 총손실보다 작으면 바이어스를 증가시켜 같은 과정을 반복한다. 이 때 방출되는 광자의 수 S 는 0이다. 그러나 인가되는 바이어스가 증가하여 문턱값(threshold value) 이상이 되면 모드이득 G_m 의 값이 총손실 α_T 보다 커지게 되며, 이 경우에는 S 의 값을 증가시킨다¹⁶⁾. 그러면 식 (2)로 주어지는 유도방출에 의한 재결합항이 증가하게 되며 결과적으로 전자와 정공농도가 줄어들게 되며 국소이득도 또한 줄어든다. 즉, S 가 증가하는 만큼 G_m 이 감소하게 되며, 최종적으로 $G_m = \alpha_T$ 의 조건이 만족되면 Helmholtz 파동방정식을 해석하고 광출력을 계산한다. 연속된 실행에서 광출력의 값이 일정하게 유지되면 바이어스를 증가시켜 지정한 마지막 바이어스에 도달할 때까지 실행을 계속한다. 즉, 광자에 대한 비율방정식은 미분방정식의 형태가 아니므로 이산화 과정을 거칠 필요가 없으며, 방출되는 광자의 수를 조절하여 광자에 대한 비율방정식이 만족되도록 처리함으로써 고려할 수 있다.

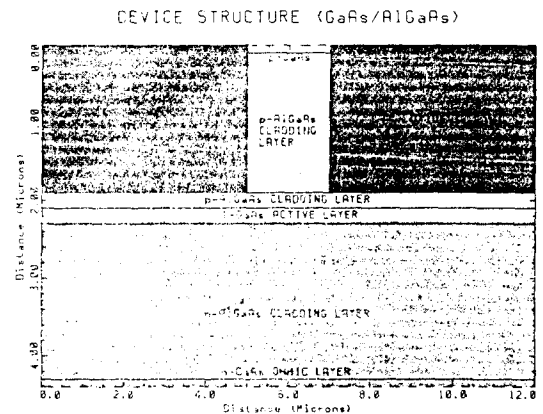
IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2에는 본 논문에서 시뮬레이션한 소자를 나타내고 있다. 그림 2(a)는 고품질의 광통신용 광원으로 널리 사용되고 있는 InGaAsP/InP계 BH 적외선 반도체 레이저(방출광의 파장 $1.3 \mu\text{m}$)이다. 이 소자의 활성층 두께는 $0.12 \mu\text{m}$ 이고, InGaAsP에 대한 도핑농도는 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, InP에 대한 도핑농도는

$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이며, Fabry-Perot 공진기의 길이는 $300 \mu\text{m}$ 이다. 이 구조에서 활성층 좌우에 있는 n-InP 및 p-InP 층은 전류가 스트라이프 내부로만 흐를 수 있도록 하는 전류차폐층(current blocking layer)이다.



(a)



(b)

그림 2. 시뮬레이션한 소자의 구조. (a) InGaAsP/InP 매립형 이중이종접합구조 레이저 다이오드, (b) GaAs/AlGaAs 이득도파형 레이저 다이오드

Fig. 2. The simulated device structure. (a) InGaAsP/InP buried heterostructure (BH) laser diode, (b) GaAs/AlGaAs gain-guiding laser diode.

InGaAsP/InP계 반도체 레이저 다이오드는 온도에 따른 특성변화가 매우 심하게 나타나며, 이는 온도에 따른 Auger 재결합의 증가, 온도의 증가에 따른 누설 전류(Current Leakage)의 증가 및 가전자대의 밴드

간 흡수에 기인한다고 알려져 있다¹¹⁹⁾. 특히 온도가 약 265K 이상이 되면 Auger 재결합계수는 확연히 증가하게 되며¹²³⁾, 이 때의 특성온도 T_0 는 65K로 매우 낮아진다. 그러나 많은 연구의 결과 온도의 변화에 따른 가전자대의 밴드간 흡수의 변화는 거의 무시할 수 있다는 것이 알려져¹²⁴⁾ 본 논문에서는 온도에 따른 밴드간 흡수의 변화는 고려하지 않았다. 또한 그림 2(b)는 CD 등의 광원으로 사용되고 있는 GaAs/AlGaAs계 이득도파형 반도체 레이저(방출광의 파장 0.9 μm)이다. 이 소자의 활성층 두께는 0.2 μm 이며, p-GaAs 및 n-GaAs 오염성 영역의 도핑농도는 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 이고, p-AlGaAs 및 n-AlGaAs 클래딩 영역의 도핑농도는 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이며, GaAs 활성층의 도핑농도는 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 그리고 Fabry-Perot 공진기의 길이는 300 μm 이다.

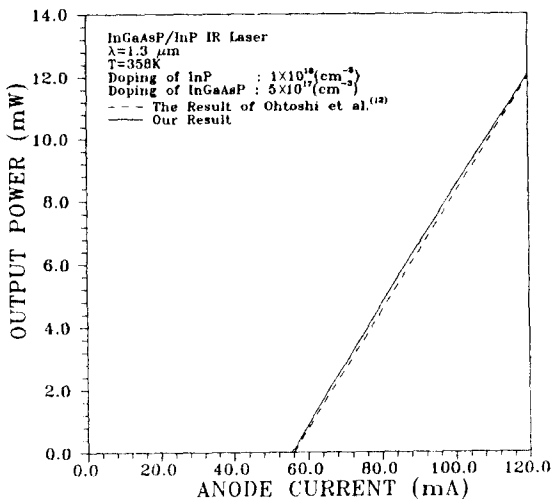


그림 3. InGaAsP/InP BH 레이저 다이오드의 L-I 특성곡선

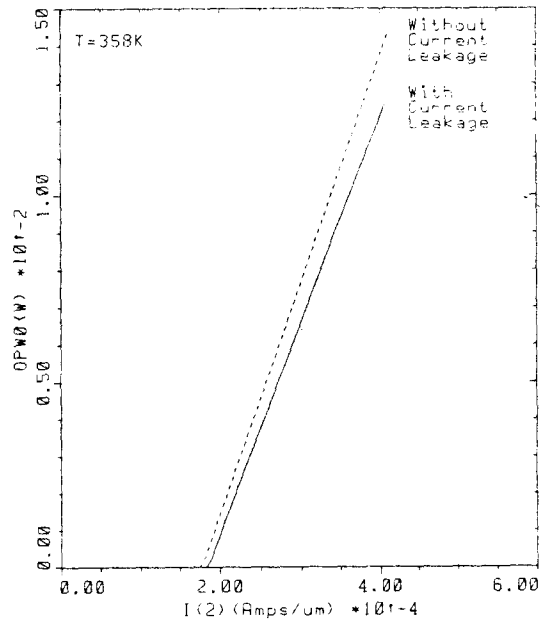
Fig. 3. The L-I characteristics of InGaAsP/InP BH laser diode.

그림 3은 본 논문에서 개발한 시뮬레이터의 타당성을 검증하기 위해 Ohtoshi 등¹¹²⁾의 L-I(광출력-전류) 특성곡선과 본 논문의 시뮬레이터로 구한 L-I 특성곡선을 비교한 것이다. 참고문헌 [12]는 온도가 상승했을 때 전류누설이 어느정도인가를 평가하기 위한 논문으로 소자가 동작할 수 있는 최대의 온도가 358K라 생각하여 이 온도에서 시뮬레이션하였다. 따라서 그림 3은 모든 파라미터를 참고문헌 [12]에 맞

추어 시뮬레이션한 그림이다. 그림에서 실선은 본 논문에서 제시한 시뮬레이터로 구한 것이며, 점선은 Ohtoshi 등의 결과이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제시한 시뮬레이터의 결과가 타당성을 가짐을 알 수 있다. 또한 이 구조에서의 집속계수 (confinement factor) Γ 는 0.238 로 얻어지며 이 값 또한 참고문헌 [19]에 제시된 것과 잘 일치한다.

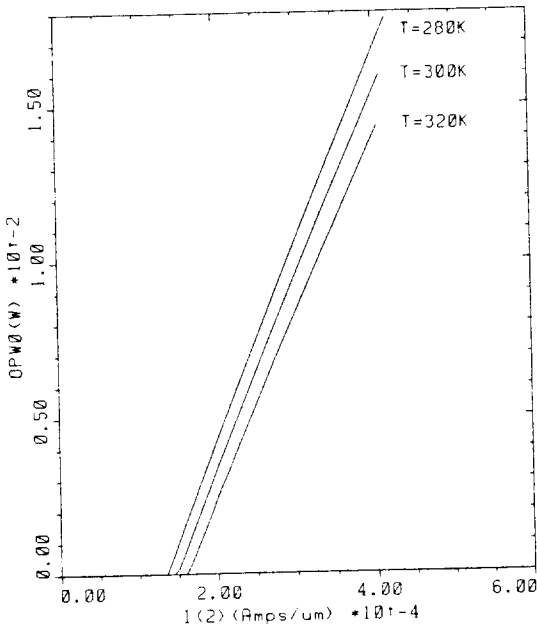
그림 4는 온도가 변화될 때 InGaAsP/InP BH 레이저 다이오드의 특성변화를 나타내고 있다. InGaAsP는 밴드갭이 상당히 작기 때문에 Auger 재결합율은 온도의 변화에 매우 민감하다. 따라서 소자의 동작온도가 변화하는 경우 온도에 따른 Auger 재결합율의 변화를 반드시 포함하여야 한다. 또한 온도가 증가하게 되면 활성층으로 주입된 캐리어의 일부가 상대편 이종접합 계면을 넘어가는 누설전류가 발생하게 된다. 주입된 캐리어가 레이저 광출력으로 변환되기 위해서는 주입된 캐리어가 활성층에 갇혀 유도방출에 의한 재결합이 일어나야 하는데 이와 같은 누설전류는 광출력에 기여하지 못하게 된다. 수치해석법으로 누설전류의 효과를 완벽하게 알아내기는 어렵다. 그러나 대부분의 누설전류는 전류차폐층을 통하여 흐르기 때문에, 누설전류의 효과를 알아보기 위해서는 전류차폐층을 통

L-I characteristics



(a)

L-I characteristics



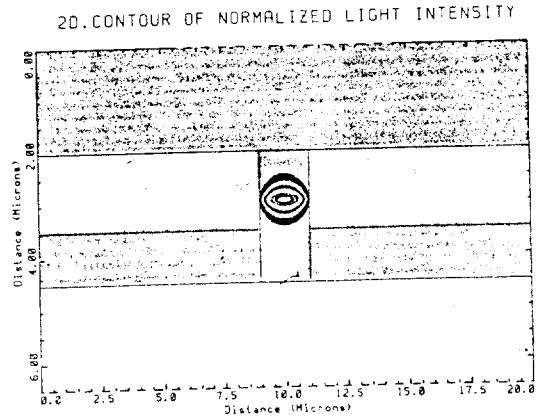
(b)

그림 4. (a) 누설전류의 효과, (b) 온도에 따른 L-I 특성곡선의 변화

Fig. 4. (a) The effect of current leakage, (b) The variations of L-I characteristics with temperature.

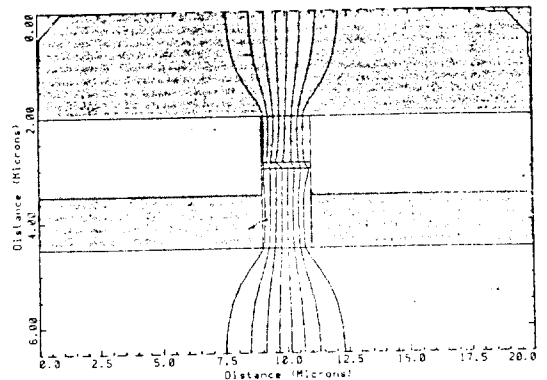
하여는 어떠한 전류도 흐를 수 없다고 가정하여 시뮬레이션한 결과와 전류차폐층에 정상적인 물질상수를 지정하여 시뮬레이션한 결과를 비교함으로써 그 효과를 어느정도 파악할 수 있다. 그림 4(a)는 누설전류가 광출력에 얼마만한 영향을 미치는지 알아보기 위한 것이다. 이 그림에서 실선은 누설전류에 의한 효과를 포함하고 있는 것이고, 점선은 누설전류에 의한 효과를 무시한 것이며, 다른 모든 파라미터는 같은 값으로 주었다. 이 그림에서 보면 온도가 358K에서 누설전류에 의한 효과가 상당히 발생함을 알 수 있으며, InGaAsP/InP계 레이저 다이오드의 특성을 제대로 해석하기 위해서는 누설전류에 의한 효과를 반드시 포함시켜야 함을 알 수 있다. 또한 그림 4(b)는 누설전류와 Auger 재결합에 의한 효과를 모두 고려한 상태에서 온도의 변화에 따른 L-I 특성곡선의 변화를 나타낸 것이다. 온도가 증가하면 발진개시전류(threshold current)가 증가하게 되며, 또한 미분양자효율

(differential quantum efficiency)도 떨어지게 됨을 알 수 있다.



(a)

Flowlines (V=1.3)

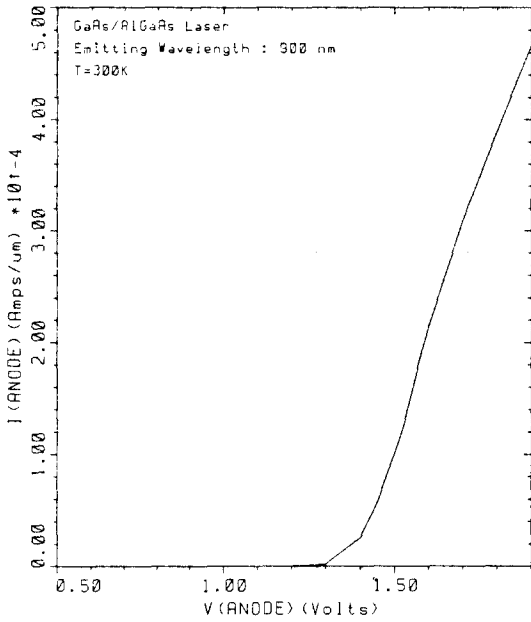


(b)

그림 5. (a) 정규화된 빛의 세기 분포에 대한 컨타우어, (b) 전류의 흐름선

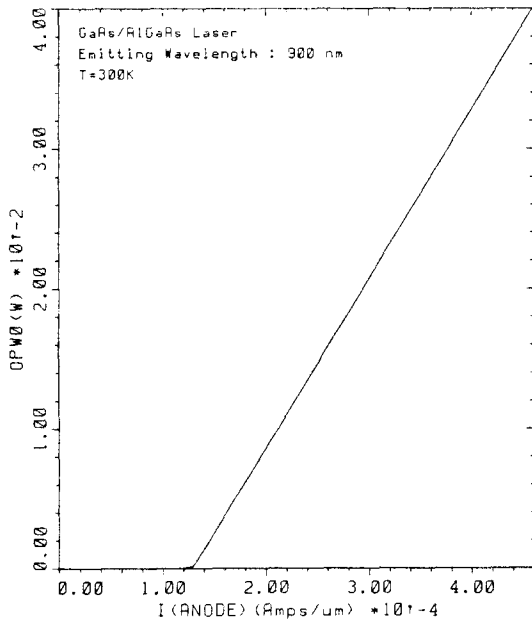
Fig. 5. (a) The contour of normalized light intensity distribution, (b) The current flowlines.

그림 5(a)는 1.3 [V]의 전압이 인가되었을 때 정규화된 빛의 세기를 나타내고 있다. BH 구조는 활성층이 굴절율이 작은 물질로 완전히 둘러싸인 구조이며 방출광의 파장에 비해 스트라이프의 폭은 꽤 넓기 때문에 방출되는 광의 횡방향 세기 분포는 거의 스트라이프 내부에 집중된다. 그러나 활성층의 두께가 0.12 μm로 매우 얇기 때문에 수직방향으로는 광학적 전계가 퍼지게 되며 이로 인해 집중계수가 작아지게 된다. 또한 그



(a)

L - I characteristics



(b)

그림 6. GaAs/AlGaAs 이득도파형 레이저 다이오드의 (a) I-V 특성곡선 및 (b) L-I 특성곡선.

Fig. 6. (a) The I-V characteristics and (b) L-I characteristics for GaAs/AlGaAs gain-guiding laser diode.

림 5(b)는 1.3 [V]의 전압이 인가되었을 때의 전류 흐름선을 나타낸다. 이 그림에서 보던 전류차폐층에 의해 거의 모든 전류는 스트라이프의 내부로 흐르게 된다.

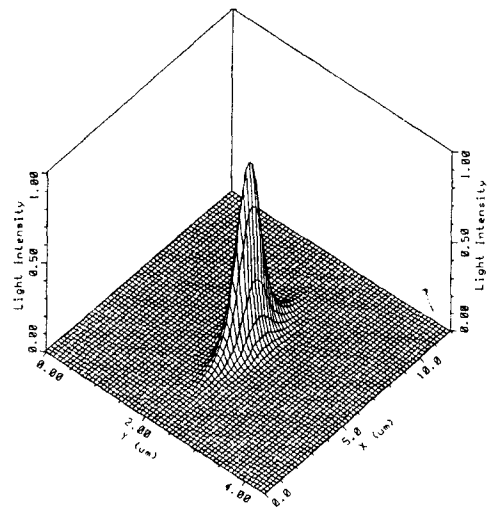
그림 6부터 그림 8까지는 GaAs/AlGaAs 이득도파형 레이저 다이오드에 대한 그림이다. 이득도파형 레이저는 빛이 횡방향으로 집중되는 원인이 굴절율차에 의한 것이 아니라 활성층에서 횡방향으로의 국소이득에 의해 일어나기 때문에 붙여진 이름이다.

그림 6(a)는 방출광의 파장이 0.9 μ m인 GaAs/AlGaAs 이득도파형 레이저 다이오드의 I-V(전류-전압)특성곡선을 나타내고 있다. 레이저 다이오드의 I-V 특성곡선은 이상적인 다이오드 특성곡선과 비슷한 양상을 보이다가 다이오드에 인가된 전압이 1.53 [V] 이상이 되면 이상적인 다이오드의 특성곡선으로 부터 이탈하는 양상을 보인다. 그 이유는 1.53 [V] 이상의 전압이 인가되었을 때 레이저 동작이 일어나게 되며, 이 때에는 유도방출에 의한 재결합율이 가장 주된 재결합으로 작용하게 된다. 전압이 증가할수록 유도방출에 의한 재결합은 더욱 증가하게 되며 이상적인 다이오드 특성곡선으로 부터 더욱 멀어지게 된다.

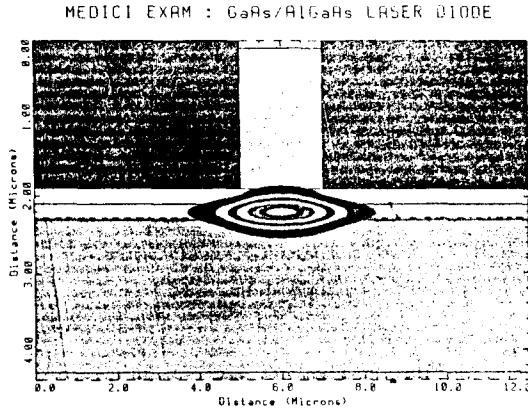
그림 6(b)는 이 소자에 대한 L-I 특성곡선을 보여주고 있다.

그림 7은 1.6 [V]의 전압이 인가되었을 때, 즉 $I = 1.66 \times I_{th}$ 일 때 GaAs/AlGaAs 이득도파형 반도체

MEDICI EXAM : GaAs/AlGaAs LASER DIODE



(a)



(b)

그림 7. GaAs/AlGaAs 이득도파형 레이저 다이오드의 정규화된 빛의 세기 분포 : (a) 3차원적 그림, (b) 컨타우어

Fig. 7. The distribution of normalized light intensity of GaAs/AlGaAs gain-guiding laser diode : (a) The 3 dimensional surface profile, (b) The contour plot.

레이저 다이오드의 정규화된 빛의 세기 분포를 나타내고 있다. 그림 7(a)는 이 분포를 3차원적으로 그린 것이며, 그림 7(b)는 컨타우어로 그린 것이다. 이 구조에서는 전류가 스트라이프 내부로 집중되도록 하기위해 전류차폐층으로 산화물(SiO_2)을 사용하고 있다. SiO_2 의 굴절율은 GaAs 나 AlGaAs 에 비해 매우 작으며, 따라서 SiO_2 층의 굴절율이 빛의 세기 분포에 약간의 영향을 주게 된다. 이 때의 집중계수 Γ 는 0.604로 주어진다.

그림 8은 1.6[V]의 전압이 인가되었을 때, 즉 $I = 1.66 \times I_{th}$ 일 때 소자 내부의 온도 분포를 보여주고 있다. 이 소자는 온도가 300K로 고정된 히트싱크(heat sink)에 장착된 상태에서 동작하고 있다고 가정하였다. 소자내부에서 온도가 상승하는 요인은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 첫째는 전류가 흐르면서 발생하는 주열(Joule Heating)이고, 둘째는 비발광성 재결합(nonradiative recombination)에 의한 것이다. 이 소자에서 전류는 모두 스트라이프 내부를 통해 흐르다가 SiO_2 층이 끝나는 점에서부터 퍼지게 된다. 또한 비발광성 재결합은 주로 활성층에서 일어나게 되는데, 그 이유는 클레딩층에서는 거의 한 종류의 캐리어

만 존재하기 때문이다. 따라서 소자내부에서 가장 온도가 높은 지점은 활성층이며, 많은 전류가 흐르게 되는 스트라이프 부분에서도 온도가 상당히 증가한다.

LDLTIA Lattice temperature($V_I = 1.6V$)

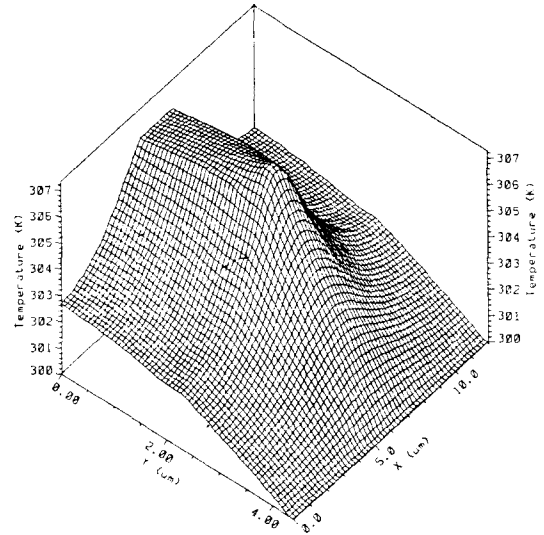


그림 8. GaAs/AlGaAs 이득도파형 레이저 다이오드의 온도 분포

Fig. 8. The temperature distribution of GaAs/AlGaAs gain-guiding laser diode.

V. 결 론

본 논문에서는 DH 반도체 레이저 다이오드의 특성 해석을 하기위해 2차원 수치해석 시뮬레이터를 개발하였다. 이 시뮬레이터는 미국 TMA사의 상업용 반도체 소자 시뮬레이터인 MEDICI를 근간으로 하여 반도체 레이저 다이오드를 해석할 수 있도록 확장한 것이다. 전기적 특성을 해석하는 부분은 MEDICI의 프로그램을 이용하고, Helmholtz 파동방정식을 해석하는 부분과 광자의 비울방정식을 해석하는 부분을 추가하였다. 그리고 반도체 레이저 다이오드에서 매우 중요한 재결합과정인 유도방출에 의한 재결합항과 자연방출에 의한 재결합항을 추가하였다. Helmholtz 파동방정식을 이산화하는 방법으로는 MEDICI에서 사용하고 있는 삼각형 그리드 구조에 대한 일반화된 박스 이산화(GBD)법을 사용하였다.

또한 우리가 작성한 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 GaAs/AlGaAs계 물질로 제작된 이득도파형과 InGaAsP/InP계 물질로 제작된 강굴절율도파형인 BH(Buried Heterostructure) 레이저 다이오드에 대해 시뮬레이션하였다. 결과로는 전압-전류 특성곡선, 전류-광출력 특성곡선, 위치에 따른 캐리어농도 분포, 위치에 따른 정규화된 빛의 세기 분포 등이 있으며, 필요한 경우 보다 많은 물리적 정보를 얻을 수 있다. 그리고 InGaAsP/InP계 레이저 다이오드의 온도에 따른 특성변화를 알아보았다. 시뮬레이션을 통해 얻은 결과는 지금까지 알려진 것과 비교적 잘 일치하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 방법은 DH로 이루어진 반도체 레이저 다이오드를 최적 설계하는데 이용할 수 있으리라 생각된다.

차후의 과제로는 방출되는 빛의 파장에 따른 특성 해석, 발생하는 열에 따른 특성 변화의 해석, DH 반도체 레이저의 최적 설계, 양자우물구조(quantum well structure) 반도체 레이저의 해석 등이 있으며, 우리가 개발한 시뮬레이터는 차후 MEDICI의 신버전에 채택될 예정이다.

감사의 글

* 본 연구가 진행될 수 있도록 지원해준 미국 TMA사의 로이 주얼(Roy Jewell)사장과 연구진행과정에서 많은 도움을 준 순천대학교 정보통신공학과 박장우교수에게 진심으로 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 伊藤良一, 中村道治, 半導體レーザー [基礎と應用], 培風館, 1989.
- [2] H.C.Casey and M.B.Panish, *Heterostructure Lasers*, Academic Press, Inc., 1978.
- [3] H.Yonezu, I.Sakuma, K.Kobayashi, T.Kamejima, M.Ueno, and Y.Nannichi, "A GaAs-AlxGa1-xAs Double Heterostructure Planar Stripe Laser," *Jap.J.Appl.Phys.*, vol.44, pp.5021-5028, 1973.
- [4] T.L.Paoli, "Waveguiding in a Stripe-Geometry Junction Laser," *IEEE*

- J.Quan.Elec.*, vol.QE-13, pp.662-668, 1977.
- [5] W.T.Tsang, "The effects of lateral current spreading, carrier out-diffusion, and optical mode losses on the threshold current density of GaAs-AlxGa1-xAs stripe-geometry DH lasers," *J.Appl.Phys.*, vol.49, pp.1031-1044, 1978.
- [6] T.Kumar, R.F.Ormondroyd, and T.E.Rozzi, "A self-consistent Model of the Lateral Behavior of a Twin-Stripe Injection Laser," *IEEE J.Quan.Elec.*, vol.QE-22, pp.1975-1985, 1986.
- [7] T.Ohtoshi, K.Yamaguchi, C.Nagaoka, T.Uda, Y.Murayama, and N.Chinone, "A Two-Dimensional Device Simulator of Semiconductor Lasers," *Solid State Elec.*, vol.30, pp.627-638, 1987.
- [8] G.Hatokoshi, M.Kurata, E.Iwasawa, and N.Moteji, "General Two-Dimensional Device Simulator for Laser Diodes," *Trans.IEICE*, vol.E-71, pp.923-925, 1988.
- [9] K.B.Kahen, "Two-Dimensional Simulation of Laser Diodes in the Steady-State," *IEEE J.Quan.Elec.*, vol.QE-24, pp.641-651, 1988.
- [10] M.Ueno, S.Asada, and S.Kumashiro, "Two-Dimensional Numerical Analysis of Lasing Characteristics for Self-Aligned Structure Semiconductor Lasers," *IEEE J.Quan.Elec.*, vol.QE-26, pp.972-981, 1990.
- [11] G.L.Tan, N.Bewtra, K.Lee, and J.M.Xu, "A Two-Dimensional Nonisothermal Finite Element Simulation of Laser Diodes," *IEEE J.Quan.Elec.*, vol.QE-29, pp.822-836, 1993.
- [12] T.Ohtoshi, K.Yamaguchi, and N.Chinone, "Analysis of Current Leakage in InGaAsP/InP Buried Heterostructure Lasers," *IEEE J.Quan. Elec.*, vol.QE-25, no.6, pp.1369-1375, 1989.
- [13] S.Seki, T.Yamanaka, and K.Yokoyama, "Two-dimensional numerical analysis of

- current blocking mechanism in InP buried heterostructure lasers", *J. Appl. Phys.*, vol.71, no.7, pp.3572-3577, 1992.
- [14] M.Gault, P.Mawby, A.R.Adams, and M.Towers, "Two-Dimensional Simulation of Constricted-Mesa InGaAsP/InP Buried-Heterostructure Lasers," *IEEE J.Quan. Elec.*, vol.QE-30, pp.1691-1700, 1994.
- [15] S.Selberherr, *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*, Springer-Verlag, 1984.
- [16] *TMA MEDICI manual*, Thchnology Modeling Associates, Inc., 1994.
- [17] S.Adachi, *Properties of Aluminium Gallium Arsenide*, INSPEC, 1993.
- [18] O.Madelung, M.Schulz, and H.Weiss, *Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, Springer-Verlag, vol.17a, pp.212 -258, 1982.
- [19] G.Agrawal and N.K.Dutta, *Semiconductor Lasers*, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [20] M.R.Pinto, *Comprehensive Semiconductor Device Simulation for Silicon ULSI*, "Ph.D. Thesis of Stanford University, 1990.
- [21] W.Kerner, "Large-Scale Complex Eigenvalue Problems," *J.Comp.Phys.*, vol.85, pp.1-85, 1989.
- [22] 이상선, 윤대원, 김득영, 신동호, 김형래, "설계 및 특성분석에 의한 가시광반도체 레이저의 최적화," *현대전자산업주식회사 연구보고서*, 1993
- [23] A.Haug, "Evidence of the Importance of Auger Recombination for InGaAsP Lasers," *Elec.Lett.*, vol.20, no.2, pp.85-86, 1984.
- [24] H.C.Casey,Jr, "Temperature dependence of the threshold current density in InP-Ga_{0.28}In_{0.72}As_{0.6}P_{0.4}($\lambda=1.3\mu\text{m}$) double heterostructure lasers.", *J.Appl.Phys.*, vol.56, no.7, pp.1959-1964, 1984.

저 자 소 개



金 炯 來 (正會員)

1965年 2月 20日生. 1987年 2月 한양대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 1989年 2月 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사). 1991年 3월부터 한양대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학. 주

관심분야는 반도체소자의 수치해석 시뮬레이터 개발, 화합물 반도체소자 및 반도체 레이저 다이오드의 특성 해석 및 설계 등임.

郭 桂 達 (正會員) 第27卷 第7號 參照

현재 한양대학교 공과대학 전자공학과 교수