

논문 2004-41SD-8-7

임플란트된 표면 방출형 레이저에서 최적 임플란트 깊이와 최적 깊이 판정 방법

(Optimum Implant Depth and Its Determination in Implanted Vertical
Cavity Surface Emitting Lasers)

안 세 환*, 김 상 배**

(Se-Hwan An and Sang-Bae Kim)

요 약

전류집속을 위하여 Vertical Cavity Surface Emitting Laser(VCSEL)에 임플란트 공정으로 만들어지는 반 절연층의 깊이는 VCSEL의 특성 및 신뢰도에 많은 영향을 준다. 이 연구에서는 낮은 문턱전류와 높은 신뢰도의 관점에서 최적화된 임플란트 깊이를 정하고, 전기적 미분특성을 사용하여 최적화된 임플란트 깊이를 판정하는 간단한 방법을 제시하였다. 최적화된 임플란트 깊이는 임플란트 선단을 $1 - \lambda$ cavity에서 p-DBR mirror 약 2 주기 위에 위치시키는 것이다. 이 최적화된 임플란트 깊이는 임플란트 영역 밑을 옆 방향으로 흐르는 누설전류의 크기로부터 구할 수 있다. 전기적 미분특성은 이 누설전류를 찾아내는 좋은 방법인데, 이 전기적 미분특성을 이용하면 임플란트 깊이를 간단하고 빠르게 알아낼 수 있기 때문이다.

Abstract

The characteristics and reliability of implanted VCSELs are greatly influenced by the thickness of the semi-insulating layer made by ion implantation for the current confinement. We propose a simple and purely electrical method of estimating the optimum implant depth, and find that the implant front should be located 2-DBR periods above the $1 - \lambda$ cavity in order to obtain simultaneously the low threshold current and high reliability.

Keyword: VCSEL, semiconductor laser, implantation

I. 서 론

임플란트형 Vertical Cavity Surface Emitting Laser(VCSEL)는 제작 공정이 집적회로와 같은 평면 공정(planar technology)이고, 표면 방출형이기 때문에 웨이퍼 상태에서 광학적 특성 측정이 가능하다. 또 낮은 문턱전류, 높은 신뢰도, 저가격의 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 VCSEL은 Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, 10 Gigabit Ethernet, Fiber channel, HIPPI, VSR Interface 등의 통신분야와 의료, 계측용 센서로서

널리 사용되고 있다. 또한 많은 연구개발의 결과, 현재 VCSEL 기술은 통신용 광원으로 사용하기에 충분한 정도로 완숙되었으며, VCSEL의 수명도 10^7 시간 이상이다.^[1] AlGaAs를 사용하는 VCSEL 구조의 물질 특성은 높은 신뢰도를 보장할 만큼 우수하므로, AlGaAs VCSEL의 급속한 성능저하 원인은 주로 활성영역으로 전류를 집속하기 위하여 사용되는 임플란트에 의해 생성된 결정 결함이다. 따라서 VCSEL의 급속한 성능저하를 피하기 위해서는 임플란트 선단이 활성층이 포함되어 있는 $1 - \lambda$ cavity에서 몇 쌍의 distributed Bragg Reflector (DBR) mirror 위에 위치하여야 한다.^[2] 반면 임플란트 선단이 $1 - \lambda$ cavity에서 멀리 떨어져 있으면, 레이저 활성영역으로의 전류집속이 제대로 이

* 학생회원, ** 정회원, 아주대학교 전자공학부
(Department of Electronic Eng., Ajou University)
접수일자: 2004년1월12일, 수정완료일: 2004년7월29일

루어지지 않아 문턱전류가 증가하게 된다. 따라서 문턱 전류와 신뢰도를 고려한 최적의 임플란트 깊이를 알아 내는 것이 중요하다. 또 전자 현미경과 에칭을 이용하는 복잡하고 시간이 걸리는 방법 대신에, 임플란트 깊이를 판정하는 손쉬운 방법이 필요하다. 이 연구에서는 전기적 미분특성을 분석하여 임플란트 깊이의 차이에 따른 임플란트 선단 밑의 수평저항 값과 선단 밑으로 흐르는 수평방향 전류 값을 알아내었다. 이 정량적인 값으로부터 쉽게 임플란트 선단의 위치를 알아낼 수 있었다. 또, 임플란트 깊이의 차이에 따른 VCSEL의 성능 저하 차이를 비교하였고, 이로부터 최적의 임플란트 깊이를 제시하였다. 이 연구의 결과, 측정할 수 있는 전기적 특성으로부터 최적의 임플란트 깊이를 쉽고 빠르게 알아낼 수 있게 되었다.

II. 임플란트 깊이에 따른 특성변화와 임플란트의 최적 깊이

1. 임플란트 깊이에 따른 초기특성 변화

그림 1은 실험에 사용한 VCSEL의 단면도이다. 850 nm의 빛을 발생시키는 3 개의 GaAs 양자우물로 이루어진 활성층이 있는 구조이며 공진기의 광학적 길이는 $1-\lambda$ 이다. 공진기는 $1-\lambda$ cavity와 그 위에 있는 21.5 쌍의 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}$ p형 DBR mirror, 아래에 있는 39쌍의 n형 DBR mirror로 구성된다. 금속 전극은 높게 도핑된 p형 GaAs층과 n형 기판에 만들어지며, 각각 Au/Zn와 Au/Ge/Ni를 사용하였다. 임플란트 마스크의 반지름 r_{imp} 는 $11\ \mu\text{m}$, 금속전극 창의 반지름 r_{metal} 은 $8\ \mu\text{m}$ 이다.

임플란트 에너지를 변화시키면서 제작한 3가지 그룹의 VCSEL을 그림 2에 나타내었다. 왼쪽은 VCSEL의 단면 구조를 나타낸 전자현미경 사진이고, 오른쪽은 electroluminescence (EL) 현미경 사진이다. 왼쪽의 전자현미경 사진에서 그룹 A, B는 임플란트 선단이 $1-\lambda$ cavity에서 DBR mirror 4.5 그리고 2.5쌍의 두께만큼 위쪽에 위치하고, 그룹 C는 임플란트 선단이 $1-\lambda$ cavity에 닿아 있다. 오른쪽의 EL 현미경 사진에서 보면 그룹 A, B는 칩의 가장자리 부분과 가운데 부분에서 모두 빛이 나오는데, 칩의 가장자리에서 나오는 빛은 임플란트 선단 밑으로 흐르는 발광성 전류에 의한 것으로 레이저 발진에는 기여하지 못하는 반면, 칩의 가운데에서 나오는 빛은 레이저 발진에 기여하는

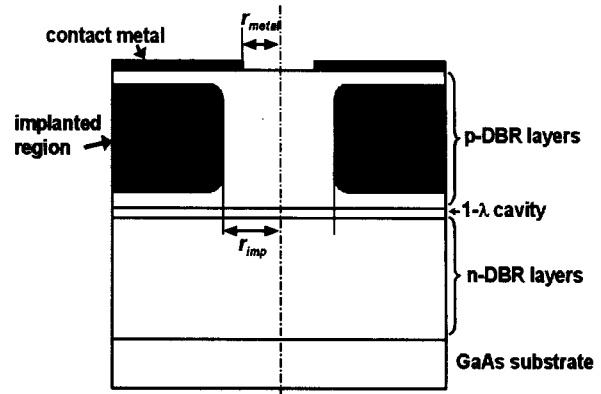


그림 1. 임플란트 VCSEL의 단면도
Fig. 1. Cross-sectional view of an implanted VCSEL.

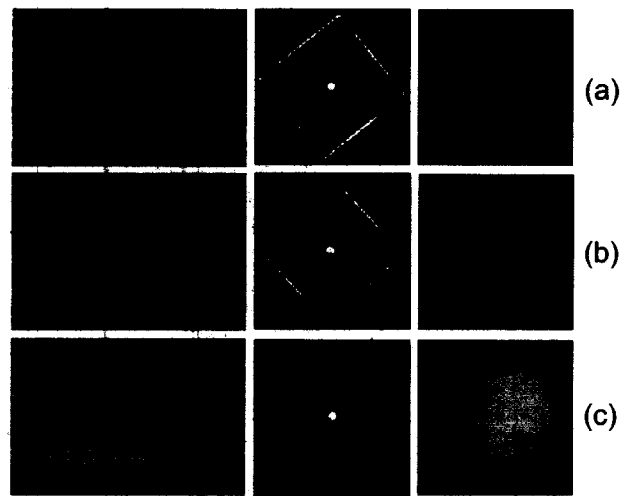


그림 2. 임플란트 VCSEL의 단면 전자현미경 사진과 0.1 mA의 순방향 전류에서 electroluminescence 현미경 사진: 임플란트 깊이가 증가하는 순서로 (a) 그룹 A, (b) 그룹 B, (c) 그룹 C로 이름 붙였다
Fig. 2. Cross-sectional scanning electron micrographs and corresponding electroluminescence microphotographs of the implanted VCSELs at the forward current of 0.1 mA: (a) group A, (b) group B, (c) group C devices in the sequence of increasing implant depth.

발광성 전류에 의한 것이다. 그러나 그룹 C는 임플란트 영역 밑의 활성층으로 발광성 전류가 흐르지 못하고 임플란트 영역의 가장자리를 따라 비발광성 전류가 흐르기 때문에 칩의 가장자리로 나오는 빛이 가장 약하고, 가운데에서 나오는 빛은 가장 강한 것을 볼 수 있다. 이 논문에서는 그룹 A, B의 임플란트 선단 밑으로 흐르는 발광성 전류와 그룹 C의 임플란트 영역 가장자리를 따라서 흐르는 비발광성 전류를 모두 누설전류로 간주하고 수평방향 전류라고 부르기로 한다. 따라서 임플란트가 깊게 된 소자일수록 임플란트 선단 밑으로 흐르는

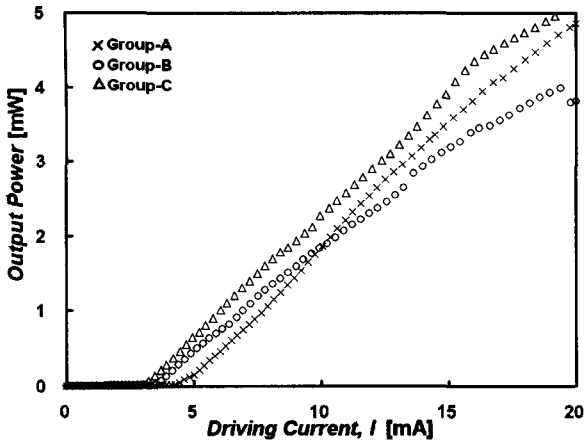


그림 3. 임플란트 VCSEL의 순방향 L-I 특성
Fig. 3. Forward L-I characteristics of the implanted VCSEL.

수평방향 전류의 양이 적어지게 되어 문턱전류가 줄어 든다. 그림 3의 L-I 특성에서 볼 수 있듯이 측정된 문턱 전류 값이 그룹 A, B, C에서 각각 4.35, 3.57, 3.1 mA로 나타나는데, 이는 임플란트가 깊게 된 소자일수록 전류집속이 활성층의 가운데 부분으로 잘 되어 문턱 전류가 줄어들기 때문이다. 임플란트 깊이가 깊어지면 서 문턱전류가 줄어드는 또 하나의 이유는 lateral straggle이 증가하면서 레이저 활성영역의 넓이가 줄어들 는 데에 있다. 이 부분에 대해서는 표 1과 관련하여 다시 기술하기로 한다. 이와 같이 VCSEL의 초기특성 은 임플란트 깊이의 변화에 따라 크게 달라진다.

문턱전류 이하에서 레이저 다이오드의 전류-전압 특 성은 보통의 p-n 다이오드와 같으므로 그림 4에 삽입 된 그림과 같은 등가회로로 나타낼 수 있다. 등가회로 의 전류성분들은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_{r1} &= I_{01} \left(\exp \frac{V_{j1}}{n_1 V_T} - 1 \right) \\
 I_{r2} &= I_{02} \left(\exp \frac{V_{j2}}{n_2 V_T} - 1 \right) \\
 I_{nr} &= I_{nr0} \left(\exp \frac{V_{j2}}{n_{nr} V_T} - 1 \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)에서 I_{r1} 은 활성층의 가운데 부분으로 흘러서 레이저의 발진에 기여하는 발광성 재결합 전류이며, I_{r2} 는 임플란트 선단 밑으로 흐르는 발광성 전류 즉, 수평방향의 전류이며, I_{nr} 는 임플란트 가장자리로 흐르는 비발광성 생성-재결합 전류이다. 여기서 n_1 , n_2 , n_{nr} 은 이상계수, I_0 는 포화전류, V_j 는 등가회로 다이

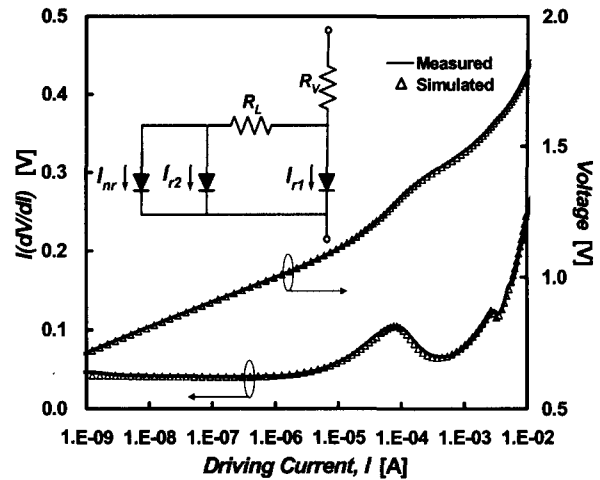


그림 4. 그룹 C 소자의 V-logI와 I(dV/dI)-logI 특성 측정 결과와 시뮬레이션 결과 비교. 안에 있는 그림은 시뮬레이션에 사용한 등가회로이다.
Fig. 4. Comparison of measured and simulated V-logI and I(dV/dI)-logI characteristics of group C devices. The equivalent circuit used in the simulation is also shown in the inset.

오드의 접합전압, V_T 는 thermal voltage, R_V 는 직렬 저항, R_L 은 수평방향 전류가 흐르는 임플란트 선단 밑 부분의 수평저항이다. 다이오드에 흐르는 전류의 이상계수와 포화전류, 저항 값을 구하기 위해 그림 4에 삽입된 등가회로를 사용하였고, 그룹 C 소자의 측정결과와 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다. 오차범 위 5% 이내에서 측정값과 simulation 값이 일치하였기 때문에 시뮬레이션으로 얻은 변수 값들은 신뢰할 수 있 다는 판단을 내렸다. 그룹 A, B 소자들 역시 같은 등가 회로 모델을 사용하여 전류성분을 분석하였고, 그 결과 를 표 1에 정리하였다. R_{n0} 과 I_{n0} 은 비선형 저항의 포화저항과 포화전류 값이다. 다이오드에 흐르는 전류 의 증가에 따라 저항 R_V 와 R_L 은 선형저항과 비선형 저항의 합으로 아래와 같이 주어지는 것으로 가정하였 다.

$$R = R_{constant} + R_{nonlinear} = R_{constant} + \frac{R_{n0}}{1 + \frac{I}{I_{n0}}} \tag{2}$$

표 1을 보면 그룹 A, B, C 소자 모두 활성층의 가운 데 부분으로 흐르는 전류성분 I_{r1} 의 이상계수 n_{r1} 값 이 1.12로 같은 것을 볼 수 있지만, 포화전류 I_{01} 값은

표 1. 전류성분 분석에 사용된 변수 값
Table 1. Parameters used in the current component analysis.

		Group-A	Group-B	Group-C	
I_r	Diode	I_{01} (A)	$3.2e-25$	$2.6e-26$	$2.2e-25$
		n_1	1.12	1.12	1.12
	Constant resistance	$R_{vertical}$ (Ω)	18	22	22
		Nonlinear resistance	R_{n0} (Ω)	80	33
I_{n0} (A)	0.0043		0.0052	0.004	
I_r	Diode	I_{02} (A)	$1.2e-21$	$1.8e-21$	$5.4e-18$
		n_2	1.2	1.24	1.5
	Constant resistance	$R_{lateral}$ (Ω)	120	140	750
		Nonlinear resistance	R_{n0} (Ω)	250	300
I_{n0} (A)	0.00065		0.00065	0.000058	
I_n	Diode	I_{nr0} (A)	$2.5e-16$	$5e-16$	$3.3e-16$
		n_{nr}	1.84	1.9	1.88

임플란트가 깊게된 소자일수록 작아지는데, 그 이유는 lateral straggle에 의해 레이저 활성영역이 좁아지는 현상이 나타나기 때문이다. 임플란트 선단 밑으로 흐르는 수평방향 전류성분 I_2 의 이상계수 n_2 값은 각각 1.2, 1.24, 1.5로 임플란트 깊이가 깊어짐에 따라 증가하는데, 그 이유는 임플란트가 깊게 될수록 임플란트 영역 밑의 양자우물 층에 결정결함이 만들어져 비발광성 재결합 전류가 증가하기 때문이다. 임플란트 선단 밑의 수평방향 저항 $R_{lateral}$ 값도 임플란트 깊이가 깊어짐에 따라 증가하는데, 그 이유는 임플란트가 깊게 될수록 임플란트 선단 밑으로 전류가 흐를 수 있는 유효 단면적이 줄어드는 효과가 나타나기 때문이다. 표 1의 변수 값들을 사용하여 발진문턱에서 계산한 수평성분 저항 R_L 값은 그룹 A, B, C에서 각각 242, 296, 1061 Ω 이며, R_L 을 통하여 흐르는 수평방향 전류는 각각 0.68, 0.6, 0.24 mA이다. 이 값들로부터 임플란트가 얇게 된 그룹 A, B의 경우 임플란트 선단 밑의 저항이 상대적으로 작아 수평전류가 그룹 C보다 더 많이 흐르는 것을 알 수 있다. 이 수평전류의 증가는 누설전류의 증가를 의미한다. 즉 임플란트가 얇게 될수록 수평방향 누설전류가 증가하여 문턱전류는 증가한다.

2. 임플란트 깊이에 따른 신뢰성의 변화 및 최적 깊이 앞 절에서 보았듯이 임플란트 깊이가 깊어지면 문턱

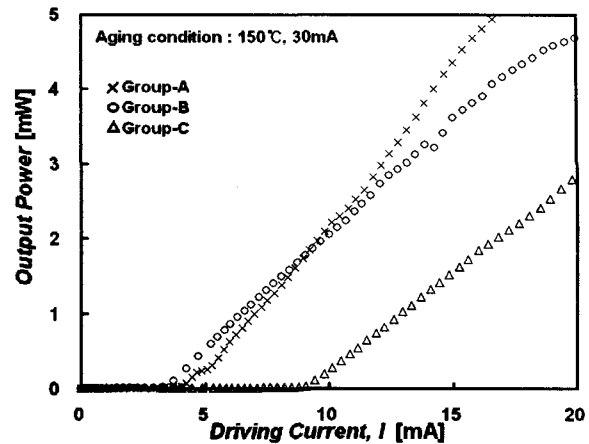


그림 5. 150 °C, 30 mA에서 250시간 aging 후 임플란트 VCSEL의 L-I 특성

Fig. 5. L-I characteristics of the implanted VCSELs after 250 hour aging at 150 °C, 30 mA.

전류가 감소하는 것 이외에 특별한 특성 변화는 보이지 않는다. 그러나 최적 임플란트 깊이를 정하려면 임플란트 깊이의 변화가 VCSEL의 신뢰도에 어떤 영향을 미치는지를 알아야한다. 이를 위하여 그룹 A, B, C의 소자들을 150 °C에서 30 mA의 전류로 동작시키면서 aging test를 하였다. 그림 3과 5를 비교해 보면 그룹 A, B 소자들의 경우 250 시간 후에도 특성의 차이가 없지만, 그룹 C 소자들은 문턱전류가 증가하고, 광 변환효율이 떨어지면서 성능저하가 일어나는 것을 알 수 있다. 일반적인 임플란트 VCSEL의 동작 전류가 10~12 mA인 것을 고려할 때, 250 시간 이상 aging 한 VCSEL은 사용할 수 없을 정도로 열화 되었다. 반면에 그룹 A, B 소자들은 1000 시간 aging 이후에도 특성의 변화가 없었다. 소자의 열화를 가속화시키는 인자를 나타내는 Arrhenius 모델은 다음과 같다^[4].

$$A.F. = \frac{TTF_2}{TTF_1} = \left(\frac{I_{F1}}{I_{F2}} \right)^2 e^{\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad (3)$$

이 식에서 TTF(time to failure)는 소자의 성능저하 시간, I_F 는 소자에 흘려준 전류, T 는 온도, E_a 는 활성화 에너지, k_B 는 boltzmann 상수이다. $E_a = 0.7eV$ 로 가정하고 식 (3)을 사용하면 그룹 A, B의 수명은 1.8×10^7 시간 이상, 그룹 C는 4.5×10^6 시간임을 알 수 있다. 최근 제작된 VCSEL은 10^7 시간 이상의 수명을 갖기 때문에^[11] 그룹 C소자에서 경우 빠른 성능저하가 일어나는 것을 알 수 있다. 그룹 A, B의 소자들보다 그룹 C의 소자들에서 빠른 성능저하가 나타나는

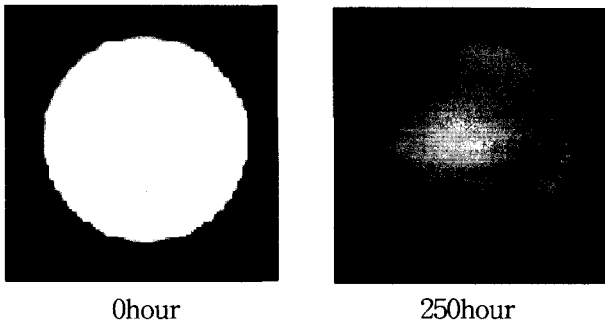


그림 6. 0.3 mA의 전류를 흘렸을 때 그룹 C 소자의 EL 현미경사진
 Fig. 6. Electroluminescence microphotographs at the forward current of 0.3 mA in group C device.

표 2. 그룹 C 소자의 250 시간 aging 후 전류성분 분석에 사용된 변수 값
 Table 2. Parameters used in the current component analysis of group C device after 250 hour aging.

			0 hour	250 hour
I _{r1}	Diode	I ₀₁ (A)	2.2e-25	7.2e-21
		n ₁	1.12	1.38
	Constant resistance	R _{vertical} (Ω)	22	21
		Nonlinear resistance	R _{n0} (Ω)	36
	I _{n0} (A)		0.004	0.0028
I _{r2}	Diode	I ₀₂ (A)	5.4e-18	1.6e-17
		n ₂	1.5	1.55
	Constant resistance	R _{lateral} (Ω)	750	750
		Nonlinear resistance	R _{n0} (Ω)	1600
	I _{n0} (A)		0.000058	0.00065
I _{nr}	Diode	I _{nr0} (A)	3.3e-16	2.1e-16
		n _{nr}	1.88	1.85

원인은 임플란트 영역이 활성층의 가운데 부분까지 영향을 미쳐 활성층에 결정결함을 생성시키고, 또 전류가 활성영역에 집중되어 열화현상을 가속시키기 때문이다.^[2] 0.3 mA의 순방향 전류를 흘렸을 때, 그림 6의 EL 현미경 사진에서 250시간 aging 후에 활성층의 가운데 부분보다 가장자리 부분이 더 어두워지는데, 이는 임플란트 영역과 가까운 활성층의 가장자리 부분에서부터 성능저하가 일어났다는 것을 증명한다. 그림 4에 삽입된 등가회로 모델을 사용하여 250시간 aging된 그룹 C 소자의 전류성분 분석 결과를 표 2에 나타내었다. aging전의 초기특성과 비교해보면 활성층의 가운데로 흐르는 전류성분 I_{r1}의 이상계수 n₁ 값이 1.12에서 1.38로 커지고 이로 인하여 포화전류 값도 증가한 것을

볼 수 있으며, 수평전류의 이상계수 및 포화전류는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이로부터 그룹 C소자들의 빠른 성능저하의 원인은 활성층에 미친 임플란트 결정결함의 영향임을 확인할 수 있다. 따라서 임플란트에 의한 VCSEL의 빠른 성능저하를 피하기 위해서는 그룹 B 소자처럼 임플란트 선단이 1-λ cavity에서 p-DBR mirror 2주기 위에 있도록 해야 한다.

III. 전기적 미분특성을 이용한 임플란트 깊이 판정 방법

II장에서 언급했듯이 임플란트 깊이에 따라 VCSEL의 문턱전류, 전류-전압 특성과 신뢰도가 변한다. 특히 임플란트가 깊게 될수록 임플란트 선단 밑의 수평저항이 커지고, 이로 인하여 수평방향 전류가 감소하게 된다. 그러므로 임플란트 선단 밑으로 흐르는 수평방향 전류의 크기로부터 임플란트 선단의 상대적인 위치를 예측할 수 있다. 이 장에서는 전기적 미분특성을 이용하여 임플란트 선단의 위치를 쉽고 간단하게 알 수 있는 방법에 대하여 기술한다. 그림 7에 A, B, C 소자들의 V-logI 특성과 미분특성인 I(dV/dI)-logI 특성을 나타내었다. 그림 7의 V-logI 특성을 보면 전압에 따라 임플란트 선단 밑으로 흐르는 수평방향 전류와 활성층의 가운데 부분으로 흐르는 발광성 전류의 비중이 달라짐을 알 수 있다.

저 전압 영역에서는 수평방향 전류가 우세하다. 그런데, 임플란트가 가장 깊게된 그룹 C소자는 수평저항 R_L이 그룹 A, B 소자에 비해 크기 때문에 전압이 증가함에 따라 수평방향 전류가 약 1.2 V의 전압 근처에서 가장 먼저 포화되기 시작하고, 그 다음에 그룹 B, A의 순서로 수평방향 전류가 포화된다. 이 수평방향 전류가 포화되어 전체전류에서 수평전류의 비율이 감소하기 시작하는 지점에서 I(dV/dI)-logI 곡선의 극대점이 나타나는 것을 볼 수 있다.^[3] 또 I(dV/dI)-logI 곡선의 극대점이 나타난 이후에는 전체전류에서 수평전류가 차지하는 비율은 줄어들기 시작하고, 활성층의 가운데 부분으로 흘러 레이저의 발진에 기여하는 발광성 재결합 전류의 비율이 증가한다. 그림의 I(dV/dI) 특성에서 볼 수 있듯이 수평방향 전류의 양이 작을수록 극대값과 극소값의 차이가 큰 것을 볼 수 있다.

그러므로 I(dV/dI)-logI 곡선의 극대점으로부터 수평저항 때문에 수평방향 전류가 포화되기 시작하는 순방향 전류의 값을 쉽게 알 수 있다. 그림 7에서 이 값들

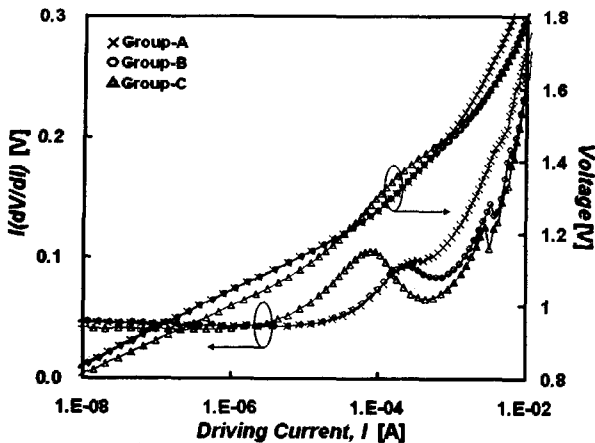


그림 7. 그룹 A, B, C 소자들의 측정된 $V\text{-log}I$ 와 $I(dV/dI)\text{-log}I$ 특성

Fig. 7. Measured $V\text{-log}I$ and $I(dV/dI)\text{-log}I$ characteristics of group A, B, and C devices.

은 그룹 A, B, C에서 각각 0.26, 0.25, 0.082 mA이다. 이 값들을 앞장의 표 1의 변수 값들을 사용하여 문턱에서 계산한 수평방향 전류 값 0.68, 0.6, 0.24 mA와 비교해 보면 약 1/3 정도 되는 것을 알 수 있다. 따라서 이 값들은 상대적인 임플랜트 깊이를 결정하는데 유용하게 사용할 수 있으며, $V\text{-log}I$ 와 $I(dV/dI)\text{-log}I$ 특성으로부터, $1-\lambda$ cavity로부터 임플랜트 선단의 상대적인 위치를 쉽게 알아낼 수 있다.

IV. 결 론

임플랜트 VCSEL의 문턱전류와 신뢰도를 종합적으로 고려한 최적의 임플랜트 깊이를 찾았으며, 임플랜트 VCSEL의 $I\text{-}V$ 특성으로부터 최적의 임플랜트 깊이를 결정할 수 있는 간단하고 쉬운 방법을 제안하였다. $I(dV/dI)$ 곡선의 극대점에서의 전류 값은 임플랜트 영역 밑으로 흐르는 수평전류의 양을 나타내는 척도이며, 이는 적절한 임플랜트 깊이를 결정하는 데에 사용될 수 있다. 적절한 임플랜트 깊이를 결정하기 위해서는 문턱전류와 수평방향 누설전류의 크기뿐만 아니라 신뢰도를 함께 고려해야 한다. $1-\lambda$ cavity에서 p-type DBR mirror 2주기 위에 임플랜트 선단이 위치하면, 문턱전류를 작게 하면서 높은 신뢰도를 유지할 수 있다. 이 때 $I(dV/dI)$ 곡선의 극대값 으로부터 얻은 수평전류의 양은 약 0.25 mA인데, 이 전류 값은 VCSEL 에피구조가 표준화되고 있음에 비추어 최적 임플랜트 깊이를 판정하는 좋은 기준이 될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. K. Guenter, J. A. Tatum, A. Clark, R. S. Penner, R. H. Johnson, R. A. Hawthorne, J. R. Biard, and Y. Liu, "Commercialization of Honeywell's VCSEL technology: further developments," Proc. SPIE, 2001, vol. 4286, pp 1-14
- [2] W. Jiang, C. Gaw, P. Kiely, B. Lawrence, M. Leiby, and P. R. Claisse, "Effect of proton implantation on the degradation of GaAs/AlGaAs vertical cavity surface emitting lasers," Electron. Lett., 1997, 33, (2), pp. 137-139
- [3] D. P. Wright, W. B. Joyce, and D. C. Craft, "Electrical derivative characteristics of InGaAsP buried heterostructure lasers," J. Appl. Phys., 1982, 53, (3), pp. 1364-1372
- [4] R. A. Hawthorne, 850nm VCSEL Products Optoelectronics Reliability Study, Honeywell Application Note, 1998.
- [5] 김상배, "레이저 다이오드의 비이상적인 전류-전압 미분 특성에 관한 연구," 전자공학회 논문지, 제 28권, A편, 제 10호, pp. 830-839, 1991.

저 자 소 개

안 세 환(학생회원)

2002년 아주대학교 전자공학과 학사.

2004년 아주대학교 전자공학과 석사.

현재 삼성전기 재직

김 상 배(정회원)

1981년 아주대학교 전자공학과 학사.

1983년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사.

1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사.

1987년 9월 ~ 1990년 8월 한국전자통신연구소
광전자연구실 선임연구원.

1990년 9월 ~ 현재 아주대학교 전자공학과 교수