

## 대면적 레이저 다이오드의 필라멘테이션과 $\alpha$ -factor

한일기<sup>†</sup> · 허두창 · 이정일

한국과학기술연구원 나노소자연구센터

Ⓣ 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1 번지

이주인

한국표준과학연구원

Ⓣ 305-600 대전시 유성구 도룡동 1 번지

(2002년 5월 23일 받음, 2002년 8월 1일 수정본 받음)

Linewidth enhancement factor ( $\alpha$ -factor) 값이 2와 4인 두 종류의 1.55  $\mu\text{m}$  다층양자우물(Multi-Quantum Well; MQW) 대면적 레이저 다이오드를 제작하였다. 제작된 레이저 다이오드의 far-field 측정 결과  $\alpha$ -factor 값이 4일 때 보다 2인 구조에서 반폭치(Full Width at Half Maximum; FWHM)와 필라멘테이션(filamentation)이 감소되었다. 주입전류의 증가에 따라 두 종류 모두 far-field의 FWHM의 증가 현상이 나타났고 이는 filament spacing이 감소하였기 때문으로 설명된다.

주제어: semiconductor laser diodes, linewidth enhancement factor ( $\alpha$ -factor), filamentation.

### I. 서 론

고출력 반도체 레이저 다이오드(High Power Laser Diodes; HPLD)는 사용되는 파장에 따라 광통신분야에서의 EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) 및 라만증폭기의 펌핑용 광원으로, 재료분야에서의 가공, 용접, PCB soldering 광원으로, 의료분야에서의 레이저 수술, 암치료, 미용 등의 광원으로, 그리고 고체레이저나 광섬유레이저의 펌핑용 광원으로 이용되는 등 응용분야가 대단히 넓다.<sup>[1]</sup> HPLD는 광의 특성에 따라 diffraction-limited 형(또는 단일모드형)과 non-diffraction-limited 형으로 구분된다. 전극의 측면 길이가 수십에서 수 백  $\mu\text{m}$ 에 이르는 대면적 레이저 다이오드는 non-diffraction-limited 형 HPLD의 대표적인 구조이다. 대면적 레이저 다이오드는 제작 공정이 간단하여 비교적 쉽게 고출력을 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에 빔의 특성이 여러 갈래로 갈라지는 '필라멘테이션'이 생긴다는 단점을 수반하고 있다. 일반적으로 이러한 필라멘테이션을 일으키는 원인을 비선형 메카니즘으로 설명한다.<sup>[2,3]</sup> Marciante 등<sup>[2]</sup>은 필라멘테이션을 일으키는 비선형 메카니즘으로 i) spatial hole burning에 의한 전하유도 굴절률 변화(carrier-induced index change)와 ii) 열유도 굴절률 변화에 의한 self-focusing이 있는데, 이 중 전하유도 굴절률 변화가 열유도 굴절률 변화보다 우세하여 전하유도 굴절률 변화가 대면적 레이저 다이오드에서 필라멘테이션을 일으키는 주요 원인이라는 이론적 계산을 발표하였다. Marciante 등은 또한 전하유도 굴절률 변화에 영향을 주는 요소는 linewidth enhancement factor( $\alpha$ -factor)인데, 이  $\alpha$ -factor가 작을수록 필라멘테이션이 적게 나타나고, 이  $\alpha$ -factor가 0.4일 경우에는

aperture의 크기가 250  $\mu\text{m}$ 까지 필라멘테이션이 일어나지 않는다고 이론적으로 계산하였지만 아직 이를 증명하는 구체적인 실험결과는 보고된 바 없다.

본 연구에서는  $\alpha$ -factor 값이 대면적 레이저 다이오드의 필라멘테이션에 주는 영향에 관한 실험적 결과를 보고한다. 이를 위하여  $\alpha$ -factor 값이 다른 2 종류의 1.55  $\mu\text{m}$  다층양자우물(Multi-Quantum Well; MQW) 레이저 다이오드 구조가 제작되었고,  $\alpha$ -factor 값은 각각 2와 4로 측정되었다. 제작된 대면적 레이저 다이오드의 far-field 측정 결과  $\alpha$ -factor 값이 2인 경우에 반폭치(Full Width at Half Maximum; FWHM)가 더 작게 측정되었고, 필라멘테이션 현상이 감소한 것을 관측하였다. 본 연구의 결과는 linewidth enhancement factor가 대면적 레이저 다이오드의 필라멘테이션에 영향을 준다는 이론적 결과를 실험을 통하여 직접적으로 확인하였다는 점에서 의미가 있다.

### II. 레이저 다이오드 제작

$\alpha$ -factor 값이 다르게 하기 위하여 2 종류(Q/Q 구조, T/Q 구조)의 1.55  $\mu\text{m}$  MQW 레이저 다이오드 구조가 사용되었다. Q/Q 구조는 우물층과 장벽층이 각각 4원소화합물인  $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.8}\text{P}_{0.2}$  (에너지갭 파장: 1.7  $\mu\text{m}$ )과  $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.57}\text{P}_{0.43}$  (에너지갭 파장: 1.3  $\mu\text{m}$ ) 이루어진 MQW 구조이고, T/Q 구조는 우물층이 삼원소화합물인  $\text{In}_{0.60}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ (compressive strain)이고 장벽층이 4원소화합물인  $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.51}\text{P}_{0.49}$  (에너지갭 파장: 1.25  $\mu\text{m}$ )로 이루어진 MQW 구조이다. Q/Q 구조와 T/Q 구조의 세부적인 내용은 그림 1에 나타내었다. 서로 다른  $\alpha$ -factor를 갖기 위한 위의 두 구조는 사실 Zaho 또는 Stohs 등에 의하여 발표된 바와 같이, MQW에서 우물층과 장벽층 사이의 bandgap

<sup>†</sup>E-mail: hikoel@kist.re.kr

Thickness	Layer	Doping
100 nm	Ga <sub>0.47</sub> In <sub>0.53</sub> As	P <sup>+</sup> > 1.5 × 10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup>
600 nm	InP	graded doping p=2 × 10 <sup>17</sup> → 1 × 10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>
10 nm	InGaAsP (1.3 μm-Q)	p=1 × 10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>
400 nm	InP	p=2 × 10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>
10 nm	InGaAsP (1.3 μm-Q)	p=1 × 10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>
50 nm	InGaAsP (1.3 μm-Q)	undoped
10 nm	InGaAsP (1.7 μm-Q)	undoped
10 nm	InGaAsP (1.3 μm-Q)	undoped
10 nm	InGaAsP (1.7 μm-Q)	undoped
10 nm	InGaAsP (1.3 μm-Q)	undoped
10 nm	InGaAsP (1.7 μm-Q)	undoped
10 nm	InGaAsP (1.3 μm-Q)	undoped
10 nm	InGaAsP (1.7 μm-Q)	undoped
50 nm	InGaAsP (1.3 μm-Q)	undoped
1000 nm	InP	n=5 × 10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>
Substrate	InP	n <sup>+</sup>

(a)

Thickness	Layer	Doping
200 nm	Ga <sub>0.47</sub> In <sub>0.53</sub> As	P <sup>+</sup> > 1.5 × 10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup>
1200 nm	InP	graded doping p=5 × 10 <sup>17</sup> → 1 × 10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>
20 nm	InP	p=2 × 10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>
700 nm	InGaAsP (1.1 μm-Q)	p=1 × 10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>
10 nm	InP	p=2 × 10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>
20 nm	InGaAsP (1.25 μm-Q)	undoped
3 nm	In <sub>0.6</sub> Ga <sub>0.4</sub> As	undoped
20 nm	InGaAsP (1.25 μm-Q)	undoped
3 nm	In <sub>0.6</sub> Ga <sub>0.4</sub> As	undoped
20 nm	InGaAsP (1.25 μm-Q)	undoped
3 nm	In <sub>0.6</sub> Ga <sub>0.4</sub> As	undoped
20 nm	InGaAsP (1.25 μm-Q)	undoped
3 nm	In <sub>0.6</sub> Ga <sub>0.4</sub> As	undoped
20 nm	InGaAsP (1.25 μm-Q)	undoped
700 nm	InGaAsP (1.1 μm-Q)	undoped
1000 nm	InP	n=5 × 10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>
Substrate	InPn <sup>+</sup>	

(b)

그림 1. Linewidth enhancement factor(α-factor)가 다른 Q/Q (a) 와 T/Q (b) 에피층 구조. 에피층에서 1.1 μm-, 1.25 μm-, 1.3 μm-Q 등은 각각 InGaAsP의 에너지갭에 해당하는 파장이 1.1 μm, 1.25 μm, 1.3 μm임을 의미한다.

offset이 클수록(즉 deep well), 우물층의 두께가 얇을수록 α-factor가 작아진다는 현상에 근거를 두고있다.<sup>[4,5]</sup>

대면적 레이저 다이오드는 p-ohmic 층 에칭, SiO<sub>2</sub> 절연막 성장 및 p-metal 증착을 위한 SiO<sub>2</sub> 에칭, p-metal 증착, n<sup>+</sup>-기판 lapping 및 폴리싱, n-metal 증착, 그리고 RTA에 의한 열처리 순으로 통상의 레이저 다이오드 공정을 이용하여 제작하였다. SiO<sub>2</sub> 절연막은 PECVD 법으로 성장하였고, 두께는 약 200 nm 내외였다. p-metal과 n-metal은 각각 Ti/Pt/Au와

AuGe/Ni/Au를 이용하였다. 대면적 레이저 다이오드의 aperture 크기와 길이는 각각 100 μm와 1 mm로 하였다.

### III. α-factor 측정

레이저 다이오드의 spectral linewidth에 영향을 주는 α-factor는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{\text{Re}(x_p)}{\text{Im}(x_p)} = -\frac{4\pi \left( \frac{\partial n}{\partial N} \right)}{\lambda \left( \frac{\partial g}{\partial N} \right)} \quad (1)$$

여기에서 x<sub>p</sub>는 MQW의 complex susceptibility, n과 N은 각각 MQW의 굴절률과 MQW에 주입된 캐리어를 의미하며, g는 MQW의 순수이득을 나타낸다. 식 (1)은 Zhao<sup>[4]</sup> 등에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = -\frac{2\pi \frac{d\lambda_1/dI - d\lambda_2/dI}{\Delta\lambda L}}{dg/dI} \quad (2)$$

여기에서 dλ<sub>i</sub>/dI는 레이저 다이오드의 문턱전류 직전에서 전류의 변화에 대한 파장의 변화를 나타내고, dλ<sub>2</sub>/dI는 문턱전류 직후에서의 파장의 변화를 나타낸다. Δλ(= λ<sup>2</sup>/2nL)는 Fabry-Perot 모드 간격이다. 따라서 식 (2)의 분자는 문턱전류 전·후에 전류의 변화에 대한 발진 파장 주위의 파장 변화를 측정함으로써 구하여 진다.

그림 2는 T/Q 구조로 제작된 ridge 형 레이저 다이오드의 문턱전류 전·후에서 전류의 변화에 대한 발진파장 주위의 파장변화를 나타낸 것이다. 발진파장은 1558.044 nm로 측정되었다. 그림에서 보듯이 발진파장을 중심으로 기울기가 바뀌는 것을 관찰할 수 있다. 발진파장 전에서의 파장의 변화에 영향을 주는 요소는 주입전류의 증가에 따른 굴절률의 변화, MQW의 온도 증가, 그리고 레이저 공진기의 thermal expansion 등으로 구분된다.<sup>[4]</sup> 이와 같이 여러 가지 요소는 각각 파장의 blue 또는 red shift에 영향을 줄 것이며 결국 그들의 합이 발진파장 전에서의 파장의 blue 또는 red shift를 가져올 것이다. 그림 2에서와 같이 발진파장 전에서의 주입전류의 증가에 따른 파장의 증가(즉 + 기울기)는 현재의 시료가 주입전류의 증가에 따라 red shift하고 있음을 설명한다. 한편 문턱전류를 지나서 전류에 대한 파장 변화는 carrier clamp에 의하여 MQW의 온도증가 등 온도에 의한 영향이 우세하게 될 것이다. 그림 2에서 문턱전류 위에서의 급격한 파장의 red shift는 이와 같은 온도효과가 우세하게 반영되었기 때문이다.

한편 레이저 다이오드의 이득 g는 Hakki-Paoli에 의하여 제안된 아래의 식 (3)과 같이 자발방출 스펙트럼에서 Fabry-Perot 공명의 변조깊이(modulation depth)로부터 결정된다.<sup>[6]</sup>

$$g = \frac{1}{L} \ln \frac{\sqrt{\gamma} - 1}{\sqrt{\gamma} + 1} + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \quad (3)$$

여기에서 L과 R은 각각 레이저 다이오드 공진기 길이와 반사율을 나타내고, γ은 광세기에 대한 자발방출 스펙트럼에서 피이크 광세기(peak valley)와 인접한 계곡 광세기(valley intensity)의 비로서 전류와 파장에 따라 변하게 된다. 따라서 식 (2)의

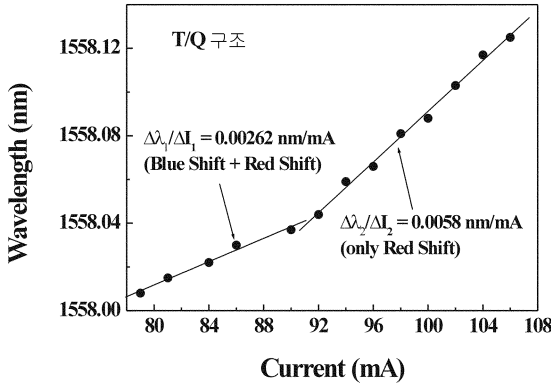


그림 2. T/Q 구조로 제작된 ridge 형 레이저 다이오드의 문턱전류 전·후에서 전류의 변화에 대한 발진파장(1558.044 nm) 주위의 파장 변화. 발진 전과 후에 파장변화 기울기가 다를 수 있다.

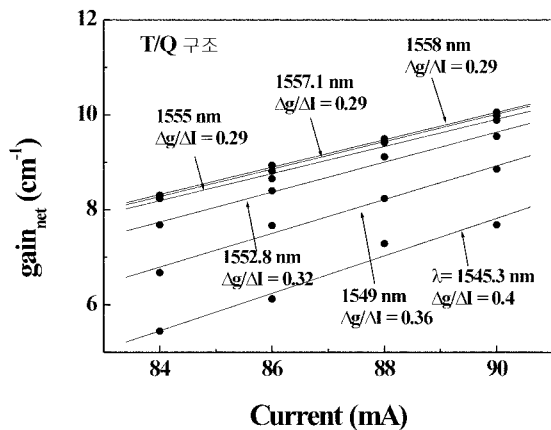


그림 3. T/Q 구조로 제작된 레이저 다이오드의 문턱전류 아래에서 전류의 변화에 대한 순수 이득의 변화. 주어진 전류에서 이득은 Hakki-Paoli 법에 의하여 자발방출 스펙트럼의 피크와 계곡의 광세기 비율에 의하여 구하여 졌다.

분모는 식 (3)으로부터 문턱전류 아래에서, 전류의 변화에 대한 이득의 변화를 측정함으로써 구하여진다.

그림 3은 T/Q 구조로 제작된 ridge 형 레이저의 문턱전류 아래에서 자발방출 스펙트럼에서 주어진 파장에서 전류의 변화에 대한 이득의 변화를 나타낸 것이다. 전류와 이득간에 거의 선형적 관계가 있음을 알 수 있고, 따라서  $dg/dI$ 는 그림 3의 기울기로부터 결정되고 이 값들은  $\alpha$ -factor를 측정하기 위한 식 (2)의 분모항이 된다.

그림 4는 그림 2와 그림 3의 과정을 수행하여 얻어진 파장에 따른  $\alpha$ -factor를 T/Q 구조와 Q/Q 구조에서 구한 것을 나타낸 것이다. 그림에서 T/Q 구조의 경우  $\alpha$ -factor가 약 2이고, Q/Q 구조의 경우 약 4로 측정됨을 알 수 있다. 이는 다른  $\alpha$ -factor 값을 갖게 하기 위하여 MQW 내에서 장벽층의 높이는  $\alpha$ -factor에 영향을 준다는 Zaho 등의 연구<sup>[4]</sup>와, MQW에서 우물층과 장벽층 사이의 bandgap offset이 클수록, 우물층의 두께가 얇을수록  $\alpha$ -factor가 작아진다는 Stohs 등의 연구<sup>[5]</sup>에 기초를 두고 고안한 T/Q, Q/Q 구조가 예측한대로 되었음을 설명한다. 일반적으로 InP를 기반으로 하는 1.55  $\mu$ m 대역에서

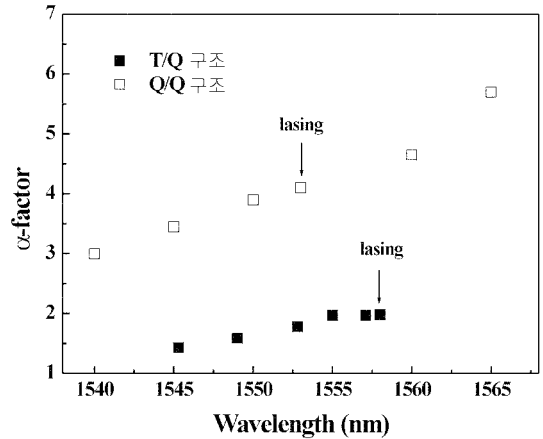


그림 4. Q/Q 구조와 T/Q 구조의 파장에 대한 linewidth enhancement factor( $\alpha$ -factor)의 변화. Q/Q 구조와 T/Q 구조의  $\alpha$ -factor는 문턱전류에서 각각  $\alpha \sim 4$ 와  $\alpha \sim 2$ 로 측정되었다.

의 레이저 다이오드 구조는 Q/Q 구조처럼 약 4의  $\alpha$ -factor 값을 갖는 반면, GaAs를 기반으로 하는 파장 대역 1  $\mu$ m 이하의 레이저 다이오드 구조는 약 2의  $\alpha$ -factor 값을 갖는다. T/Q 구조의  $\alpha$ -factor 값이 2라는 사실은 InP를 기반으로 하는 1.55  $\mu$ m 대역에서도 GaAs 기반의 구조처럼 낮은  $\alpha$ -factor 값을 가질 수 있음을 의미한다.

#### IV. $\alpha$ -factor와 far-field

그림 5의 (a)와 (b)는 각각 Q/Q 구조와 T/Q 구조를 갖는 대면적 레이저 다이오드의 far-field를 주입전류의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 pump parameter인  $r$  ( $\equiv I/I_{th}$ ,  $I$ : 주입전류,  $I_{th}$ : 문턱전류)은 문턱 전류에 대한 주입전류의 비를 나타낸 것이다. 그림 6은 그림 5에 나타낸 far-field의 FWHM이 증가하는 것을 pump parameter인  $r$ 의 변화에 대하여 정리한 것이다. 동일한 광출력에서  $\alpha \sim 2$ 인 경우에  $\alpha \sim 4$ 인 경우보다 far-field의 FWHM은 약 64% 정도 적게 관찰되지만, 두 구조 모두  $r$ 이 증가하면서 far-field의 각도가 넓어지는 것이 공통적으로 나타난다. Far-field의 FWHM 각도가 넓어지는 것은 필라멘테이션이 증가하기 때문이다. G. Agrawal 그룹의 대면적 레이저 다이오드에서의 계산에 의하면 빔 필라멘테이션과  $\alpha$ -factor 사이에 밀접한 연관성이 있음을 설명하고 있다.<sup>[2]</sup> 일반적으로  $\alpha$ -factor가 4인 레이저 다이오드에서 aperture 크기가 10  $\mu$ m 이상이 되면 빔의 필라멘테이션이 일어난다. 그러나 G. Agrawal 그룹은 만일  $\alpha$ -factor가 0.4 이하가 되면 aperture 크기가 250  $\mu$ m인 경우에도 안정된 빔 특성을 유지하고 있다고 설명한다. 따라서 동일한 aperture(100  $\mu$ m)를 가진 두 구조의 대면적 레이저 다이오드의 far-field에서 FWHM이 차이가 나는 것은  $\alpha$ -factor 값이 다르기 때문에 필라멘테이션이 일어나는 정도가 다르기 때문으로 설명할 수 있다.

필라멘테이션이 일어나는 정도를 정량적으로 설명한 연구는 Marciante 등에 의하여 보고된 바 있다.<sup>[7]</sup> Marciante 등은 pump parameter인  $r$ 의 증가에 대한 filament spacing의 변화를  $\alpha \sim 2$ 와  $\alpha \sim 4$ 인 경우에 비교한바 있다(참고논문 7에서 그림

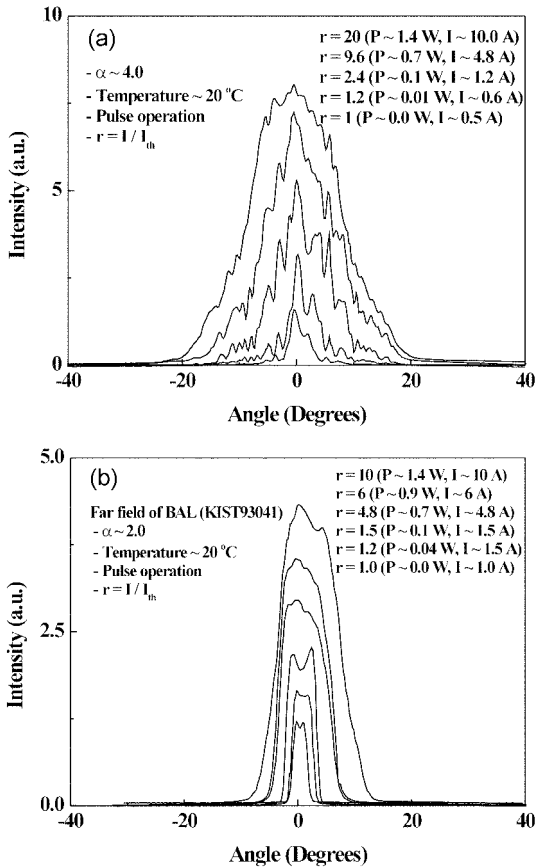


그림 5. Pump parameter  $r (=I/I_{th})$ ,  $I$ : 주입전류,  $I_{th}$ : 문턱전류)의 변화에 대한 대면적 레이저 다이오드의 far-field 변화: (a) Q/Q 구조, (b) T/Q 구조. 두 구조 모두  $r$ 이 증가함에 따라 필라멘테이션과 far-field의 FWHM이 증가하고, Q/Q 구조( $\alpha \sim 4$ )에서 증가폭이 더 커짐을 알 수 있다.

1). 여기에서 filament spacing은 대면적 레이저 다이오드의 근접장(near-field)에 나타난 피크와 계곡 모양(modulated near-field)에서 피크(계곡)와 피크(계곡) 사이의 거리를 의미한다. 참고논문 7에 있는 그림 1의 결과가 GaAs와 InGaAs 레이저 다이오드에서 얻어진 결과라 하더라도 두 가지 중요한 정보를 이야기하고 있다. 첫째, pump parameter인  $r$ 이 증가함에 따라 filament spacing이 작아진다는 것이다. 이는 본문의 그림 5와 6에서  $r$ 이 증가함에 따라 필라멘테이션이 증가한다는 현상을 고려할 때,  $r$ 이 증가함에 따라 근접장의 filament spacing이 작아지고, 따라서 필라멘테이션이 증가한다고 결론을 만들 수 있다. 같은 논리로 필라멘테이션이 증가할 때 far-field의 FWHM이 증가하는 것은 역시 filament spacing으로 고려되어야 한다. 즉,  $r$ 이 증가함에 따라 filament spacing이 점점 작아지고, 그와 함께 FWHM이 증가하기 때문에, filament spacing은 대면적 aperture 안에 존재하는 작은 sub-aperture로 고려해야 한다는 결론이 얻어진다. Filament spacing이  $r$ 의 증가에 따라 좁아지면(즉 sub-aperture의 크기가 좁아지면) 산란회절 이론에 의하여 회절 각도는 점점 넓어지게 되고 따라서 far-field의 FWHM은 넓어지게 된다. 이와 같은 결론은 대면적 레이저 다이오드가 주입전류의 증가에 따라 여러

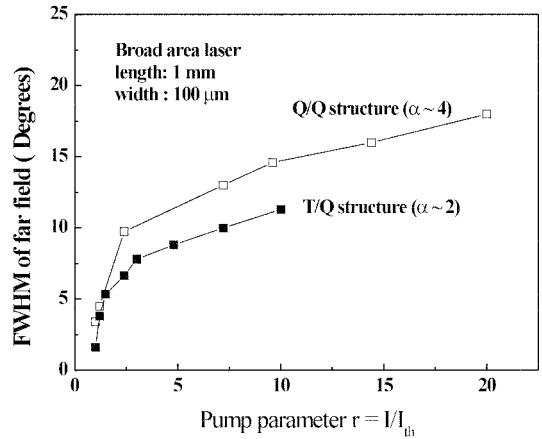


그림 6. Pump parameter의 변화에 대한 대면적 레이저 다이오드의 far-field의 FWHM 변화.

개의 sub-aperture로 나뉘지게 된다는 의미를 준다. 둘째, filament spacing은  $\alpha \sim 2$ 인 경우 보다  $\alpha \sim 4$ 인 경우에 더 좁아진다는 것이다. 이는  $\alpha$ -factor가 작을수록 필라멘테이션이 적게 일어난다는 것을 간접적으로 증명하는 또 하나의 결과가 되고 그림 6에 나타난  $\alpha$ -factor의 값에 대한 FWHM의 특성과 잘 일치한다.

## V. 결 론

Linewidth enhancement factor( $\alpha$ -factor) 값이 다른 두 종류의 에피구조로 1.55  $\mu\text{m}$  MQW 대면적 레이저 다이오드를 제작하였다. Hakki-Paoli 법에 의해 측정된  $\alpha$ -factor 값은 InGaAsP/InGaAsP로 구성된 MQW 구조(Q/Q 구조)의 경우 4였고, InGaAs/InGaAsP로 구성된 MQW 구조(T/Q 구조)의 경우에 2로 측정되었다. 대면적 레이저 다이오드의 far-field 측정 결과,  $\alpha$ -factor 값에 상관없이 전류의 증가에 따라 필라멘테이션과 far-field의 FWHM이 증가하는 현상이 있으나,  $\alpha$ -factor 값이 4인 구조보다 2인 구조에서, 필라멘테이션이 적게 나타나고 FWHM이 적게 되는 것을 관찰하였다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(NRL) 사업과 민군겸용(DUT) 사업에 의하여 지원되었습니다.

## 참고문헌

[1] W. P. Latham, W. T. Cooley, G. J. Vansuch, and T. C. Salvi, "High-Power Semiconductor Lasers: Applications and Progress," in *Advanced High-Power Lasers*, SPIE, Osaka, Japan, 1999, pp. 34-44.  
 [2] J. R. Marciante and G. P. Agrawal, "Nonlinear mechanisms of filamentation in broad-area semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, no. 4, pp. 590-596, 1996.

- [3] Z. Dai, R. Michalzik, P. Unger, and K. J. Ebeling, "Numerical simulation of broad-area high-power semiconductor laser amplifiers," *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol. 33, no. 12, pp. 2240-2254, 1997.
- [4] B. Zhao, T. R. Chen, S. Wu, Y. H. Zhuang, Y. Yamada, and A. Yariv, "Direct measurement of linewidth enhancement factors in quantum well lasers of different quantum well barrier heights," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 14, pp. 1591-1593, 1993.
- [5] J. Stohs, D. J. Gallant, D. J. Bossert, and S. R. J. Brueck, "Epitaxial structure dependence of the linewidth enhancement factor in GaAs and InGaAs quantum well lasers," *Proc. SPIE*, vol. 2994, pp. 542-551, 1997.
- [6] B. W. Hakki and T. L. Paoli, "Gain spectra in GaAs double heterostructure injection lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 3, pp. 1296-1306, 1975.
- [7] J. R. Marciano and G. P. Agrawal, "Spatio-temporal characteristics of filamentation in broad-area semiconductor lasers: experimental results," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 54-56, 1998.

### Filamentation and $\alpha$ -factor of broad area laser diodes

Il Ki Han<sup>†</sup>, Du Chang Her, and Jung Il Lee

*Nano Devices Research Center Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: hikoel@kist.re.kr*

Joo In Lee

*Nanosurface Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon 305-600, KOREA*

(Received May 23, 2002; Revised manuscript received August 1, 2002)

1.55  $\mu\text{m}$  multi-quantum well (MQW) broad area laser diodes with different linewidth enhancement factors ( $\alpha$ -factor) of 2 and 4 were fabricated. The far-fields of the laser diodes were measured. It was observed that the full width at half maximum (FWHM) of the far-fields and the filamentations were reduced in the laser diodes for which the value of the  $\alpha$ -factor was small. As injection current increased, the FWHM of the far-field also increased regardless of the  $\alpha$ -factor. This phenomenon was explained by reduction of filament spacing as injection current increased.

*Classification codes* : OE.050. LO.060.