

## 양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상이 다중 영역 Complex-Coupled DFB 레이저의 수율 특성에 미치는 영향

김태영 · 김부균<sup>†</sup>

승실대학교 정보통신전자공학부  
Ⓣ 156-743 서울시 동작구 상도동 511

(2007년 9월 4일 받음, 2007년 10월 15일 수정본 받음)

양 단면 반사율과 단면 회절격자의 위상, 위상 조정 영역의 위상이 두 개의 DFB 영역과, 가운데 위상 조정 영역을 가진 다중 영역 CC(complex-coupled) DFB 레이저의 SP(self-pulsation) 동작 특성에 미치는 영향을 수율 관점에서 살펴보았다. 결합세기와 CR(coupling ratio)이 작을수록 양 단면과 다른 DFB 영역에서 반사되는 필드가 모드의 특성에 미치는 영향이 증가하여 수율이 감소한다. 결합세기와 CR에 상관없이 양 단면 반사율이 증가 할수록 최대 수율과 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 감소함을 볼 수 있었다. 같은 결합세기에서는 CR이 0.2인 경우가 CR이 0.1인 경우보다 복소 결합 효과가 커 최대 수율과 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 큼을 볼 수 있었다. 결합세기가 3이고 CR이 0.2인 경우가 DFB 영역의 발진 모드가 외부의 영향을 적게 받고 SHB(spatial hole burning) 효과도 크지 않아 양 단면 반사율의 변화와 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 수율 특성이 가장 좋음을 볼 수 있었다.

주제어 : 다중 영역 DFB 레이저, 단면 반사율, 단면 회절격자 위상, 위상 조정 영역의 위상, Self-Pulsation, 수율

### I 서 론

두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역이 집적된 다중 영역 DFB 레이저는 독일의 HHI(Heinrich-Hertz-Institute)를 중심으로 완전 광 3R 재생기 구현과 초고속 광 신호 처리를 위한 핵심소자로 사용하기 위하여 활발히 연구되어 왔다. 또한 사용된 DFB 영역의 회절격자 구조는 주로 IC(index-coupled) 회절격자 구조이다.<sup>[1-3]</sup> DFB 영역이 IC 회절격자 구조를 가지는 다중 영역 IC DFB 레이저는 두 DFB 영역의 반사 스펙트럼의 금지 대역이 서로 중첩되어 있지 않는 경우 각각의 DFB 영역의 발진 모드의 특성은 SHB(spatial hole burning) 효과, 내부에서 반사되는 필드, 이득 분산 등에 의해 영향을 받는다.<sup>[4]</sup> 따라서 단파장 모드와 장파장 모드 사이에 모드 호핑이 쉽게 발생하여 SP(self-pulsation) 주파수의 급격한 변화가 발생하기가 쉽다. 다중 영역 IC DFB 레이저의 SP 동작은 양 단면 반사율이 증가할 때 양 단면과 다른 DFB 영역에서 반사되는 필드가 모드의 특성에 미치는 영향이 커져 양 단면 회절격자의 위상 변화에 따른 발진 모드의 호핑이 많이 발생하여 수율이 감소한다.<sup>[5]</sup>

반면에 두 CC(complex-coupled) DFB 영역의 회절격자 구조가 IP(in-phase) 회절격자를 가지는 경우 장파장 모드가 발진하여 두 IC DFB 영역을 가지는 다중영역 DFB 레이저에 비하여 안정된 SP 동작이 발생된다.<sup>[6]</sup> 또한 능동 영역의 이득이 최대가 되는 파장을 두 CC DFB 영역의 브래그 파장 중심에 위치시키는 경우가 발진 모드의 파장 중심에 위치시

키는 경우에 비하여 발생시킬 수 있는 SP 주파수가 더 큼을 알 수 있었고 변조지수 특성도 더 우수함을 볼 수 있었다. 두 개의 CC DFB 영역과 위상 조정 영역이 집적된 다중 영역 DFB 레이저는 100 GHz~10 THz 주파수 영역에 존재하는 테라헤르츠(THz) 파 대역의 신호를 발생시키는 여기 광원으로 사용 가능하리라 예상된다.<sup>[7]</sup>

다중 영역 CC DFB 레이저 제작 시에 양 단면을 무반사 코팅 한다고 하여도 잔류 반사율이 존재하게 된다. 이러한 잔류 반사율에 의해 랜덤한 양 단면의 회절격자의 위상이 다중 영역 CC DFB 레이저의 SP 동작 특성에 영향을 미치게 된다. 또한 실제 다중 영역 CC DFB 레이저가 제작된 후 위상 조정 영역에 주입되는 전류를 변화시켜 위상 조정 영역의 위상을 변화시킴으로써 다중 영역 CC DFB 레이저의 SP 동작 특성을 조정할 수 있기 때문에 본 논문에서는 단면 반사율과 단면 회절격자의 위상 및 위상 조정 영역의 위상이 다중 영역 CC DFB 레이저의 SP 동작 특성에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 사용한 전산 모의 방법에 대하여 간단히 살펴보고, 본 논문에서 사용한 다중 영역 CC DFB 레이저의 수율에 대하여 정의한다. 3장에서는 양 단면 반사율, 양 단면 회절격자의 위상과 위상 조정 영역의 위상이 다중 영역 CC DFB 레이저의 SP 동작 특성에 미치는 영향을 2장에서 정의한 수율 관점에서 살펴보았다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

<sup>†</sup> E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr

## II. 전산 모의 방법 및 수율의 정의

그림 1은 양 단면 반사율과 단면 격자 위상을 고려한 두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성된 다중 영역 CC DFB 레이저의 개념도를 나타낸다. 각각의 DFB 영역에 문턱 전류 이상의 전류가 주입되면 각각의 DFB 영역에서 발진 모드가 존재하고, 이러한 두 모드의 비팅에 의하여 SP 동작이 발생한다.<sup>[3]</sup>

두 개의 모드를 방출하는 다중 영역 CC DFB 레이저의 동작 특성을 살펴보기 위하여 시간 영역 모델을 사용하였다. 시간 영역 모델은 순방향으로 진행되는 필드와 역방향으로 진행되는 필드의 상호 결합 현상을 나타내는 시간 의존 결합 모드 방정식과, 광자와 상호 작용을 하는 캐리어의 밀도 변화를 나타내는 비율 방정식을 시간 영역에서 해석하는 모델이다.<sup>[8]</sup> 시간 영역과 공간 영역에서 결합 방정식과 비율 방정식의 수치 계산의 효율성과 정확성을 위해 연산자 분리 시 영역 모델을 사용하였다.<sup>[9]</sup>

다중 영역 CC DFB 레이저의 양 단면에 단면 반사율이 존재하는 경우 그림 1에서 보는 것 같이 순방향으로 진행되는 정규화된 필드,  $a(z,t)$ 와 역방향으로 진행되는 정규화된 필드,  $b(z,t)$ 는 다음과 같은 경계조건을 만족해야 한다.

$$a(0,t) = r_1 b(0,t) \tag{1}$$

$$b(L,t) = r_2 a(L,t) \tag{2}$$

여기서  $r_1$ 과  $r_2$ 는 양 단면의 격자 위상을 포함한 단면 반사 계수를 나타내며 다음과 같이 주어진다.

$$r_1 = r_{10} e^{-j\phi_1} \tag{3}$$

$$r_2 = r_{20} e^{-j\phi_2} \tag{4}$$

여기서 각각  $r_{10}$ 와  $r_{20}$ 는 그림 1에서 왼쪽 단면과 오른쪽 단면의 단면 반사 계수를 나타낸다.  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 는 각각 왼쪽 단면과 오른쪽 단면의 기준면으로부터의 격자 위상을 의미하며

이러한 격자 위상에 해당하는 길이는 그림 1에 나타난 것처럼 각각  $\frac{\phi_1}{2\pi} \Lambda_1$ 과  $\frac{\phi_2}{2\pi} \Lambda_2$ 이다.

다중 영역 CC DFB 레이저의 양 단면을 무반사 코팅하여도 잔류 반사율이 존재하게 된다. 현재 개발되어 있는 기술로는 DFB 레이저의 단면 격자 위상을 정확하게 조절하기가 매우 어렵기 때문에 단면에 잔류 반사율이 존재하는 경우 양 단면 회절격자의 위상은 랜덤하게 발생된다고 가정하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 단면 반사율과 단면 격자 위상 및 위상 조정 영역의 위상이 다중 영역 CC DFB 레이저의 동작 특성에 미치는 영향을 수율 관점에서 살펴보기 위하여 수율을 다음과 같이 정의 하였다.

$$\frac{\text{Criterion을 만족하는 위상 조합의 수}}{\text{전체 양 단면 회절격자의 위상 조합의 수}} \times 100 (\%) \tag{5}$$

양 단면 회절격자의 위상을 각각 16등분하여 전체 256가지의 위상 조합을 만들어 각각의 위상 조합에 대하여 양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상을 변화시키며 다중 영역 CC DFB 레이저의 동작 특성을 전산 모의하였다. 다중 영역 CC DFB 레이저의 수율을 계산하기 위하여 우리가 설정한 criterion은 다음과 같다.

1. 출력 파형의 SP 주파수가 두 DFB 영역에서 발진하는 모드의 파장 차이로 주어지는 주파수와 일치하여야 한다.
2. 두 DFB 영역의 발진 모드의 호핑이 없이 목표로 하는 주파수 대역에서 SP 동작을 하여야 한다.
3. SP 동작의 기본 주파수와 스푸리어스(spurious) 성분과의 크기 차이가 25 dB 이상이어야 한다.
4. 출력 파형의 변조 지수가 0.1 이상이어야 한다.

위의 4가지 조건을 모두 만족하는 경우에 다중 영역 CC DFB 레이저의 특성이 criterion을 만족한다고 판단하였다. 따라서 수율은 식 (5)와 같이 동작 특성 중 criterion을 만족하는 위상 조합의 수를 전체 양 단면 회절격자의 위상 조합의

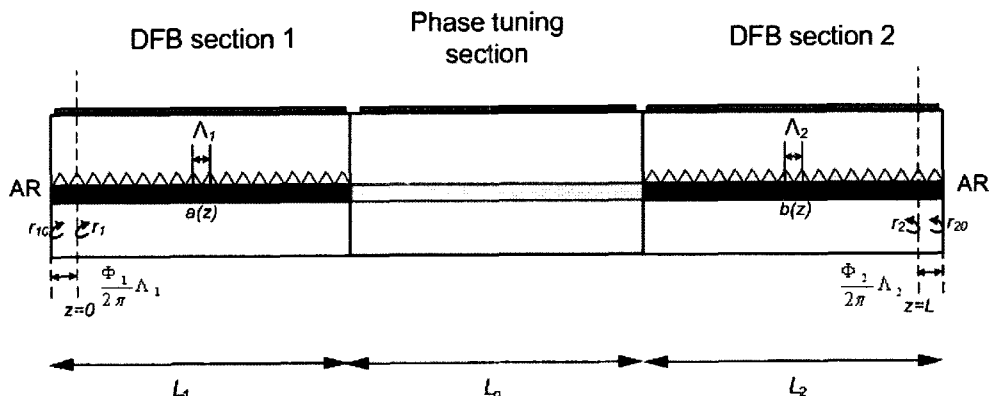


그림 1. 양 단면 반사율과 단면 격자 위상을 고려한 두 개의 DFB 영역과 위상 조정 영역으로 구성되는 다중 영역 DFB 레이저의 개념도.

수로 나눈 값으로 정의하였다.

### III. 양 단면 반사율과 단면 회절격자의 위상 및 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 다중 영역 CC DFB 레이저의 동작 특성

그림 2는  $\Delta\lambda_B < \Delta$ 인 경우 문턱 전류 이상에서 IP 회절격자를 가지는 두 CC DFB 영역의 반사 스펙트럼을 나타낸다. DFB 영역 2의 회절격자 주기를 DFB 영역 1의 회절격자 주기보다 크도록 설정하면 DFB 영역 2의 브래그 파장이 DFB 영역 1의 브래그 파장 보다 커서 각각의 DFB 영역의 반사 스펙트럼은 그림 2와 같이 나타나게 된다. 여기서  $\Delta$ 는 DFB 영역의 금지 대역폭이고  $\Delta\lambda_B$ 는 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이로  $\Delta\lambda_B = \lambda_{B2} - \lambda_{B1}$ 이다. IP 회절격자를 가지는 두 CC DFB 영역의 발진 모드는 각각 장파장 모드인 +1 모드와 +2 모드가 발진한다. 따라서 IC DFB 구조를 사용한 경우와는 다르게  $\Delta\lambda_B$ 에 관계없이 각각의 DFB 영역의 발진 모드는 +1 모드와 +2 모드가 발진한다. 각각의 CC DFB 영역에서는 IC DFB 구조를 사용하는 경우에 비해 안정된 모드가 발진하고 이에 따라 안정된 두 개의 모드의 비팅에 의한 SP 동작이 발생하리라 예상된다. 또한 단파장 모드와 장파장 모

드 사이에 발생하는 호핑으로 인한 발진 모드의 파장 변화도 IC DFB 구조에 비하여 적게 발생하리라 예상된다.

다중 영역 CC DFB 레이저의 각 영역의 길이는 300  $\mu\text{m}$ 로 동일하게 설정하였다. 두 DFB 영역의 브래그 파장 차이,  $\Delta\lambda_B$ 는 발진하는 두 장파장 모드의 비팅에 의한 SP 주파수가 목표로 하는 90 GHz 대역 근처에서 동작을 하는 구간의 중심 값으로 결정하였다. 이 경우  $\Delta\lambda_B < \Delta$ 이므로 DFB 영역 1의 발진 모드가 DFB 영역 2의 금지대역에 놓여 DFB 영역 1에서 발진하는 +1 모드는 DFB 영역 2로 진행이 작게 발생하여, 오른쪽 단면에서 출력 파워에 대한 변조 지수가 작게 된다. 반면에 DFB 영역 2에서 발진하는 +2 모드는 DFB 영역 1의 금지대역 바깥에 존재하여 DFB 영역 2에서 발진하는 +2 모드는 DFB 영역 1로 진행이 많이 발생하여, 왼쪽 단면에서 출력 파워에 대한 변조 지수가 크게 된다. 따라서 수율 계산을 위한 변조 지수의 criterion은 왼쪽 단면의 출력 파워를 기준으로 하였다.

IP 회절격자를 갖는 DFB 영역 1의 발진 모드는 +1 모드가 DFB 영역 2의 금지대역에 놓여 많은 피드백을 받아 안정된 발진 모드가 될 것으로 예상된다. 그러나 이 경우  $\Delta\lambda_B < \Delta$ 이므로 IP 회절격자를 갖는 DFB 영역 2의 발진 모드는 +2 모드보다 DFB 영역 1의 금지 대역에 놓인 -2 모드가 많은 피드백을 받아 결합세기와 CR이 작은 경우 양 단면 회절격자의 위상과 위상 조정 영역의 위상 변화에 장파장 모드를 유지하지 못하고 단파장 모드가 발진하거나 두 모드간의 경쟁으로 인하여 발진하지 못할 수 있을 것으로 예상된다.

능동 영역의 이득이 최대가 되는 파장을 두 DFB 영역의 브래그 파장 중심에 위치시켰다. 전산 모의에 사용한 다중 영역 CC DFB 레이저의 단면 반사율은 양 단면이 동일하고 0.1%, 0.5%, 1%, 2%와 5%로 정하였다. 또한 각 CC DFB 영역의 결합세기는 같고 결합세기가 각각 2, 3과 4일 때 각각의 결합세기에 대하여 coupling ratio(CR),  $\kappa_o/\kappa_i$ 는 0.1과 0.2에 대하여 전산 모의를 수행하였다. 전산 모의를 위하여 사용한 CC DFB 영역의 주입전류는 여러 가지 결합세기와 CR의 경우에 대하여 양 단면이 완전 무반사 코팅되어 있는 단일 CC DFB 영역에서 계산된 문턱전류 값보다 30 mA 큰 전류이다. 전산 모의에 사용된 각각의 DFB 영역의 주입 전류와 90 GHz 대역에서 SP 동작을 하는  $\Delta\lambda_B$ 는 표 1과 같고 나머지 구조 및 물질 파라미터 값은 표 2와 같다.

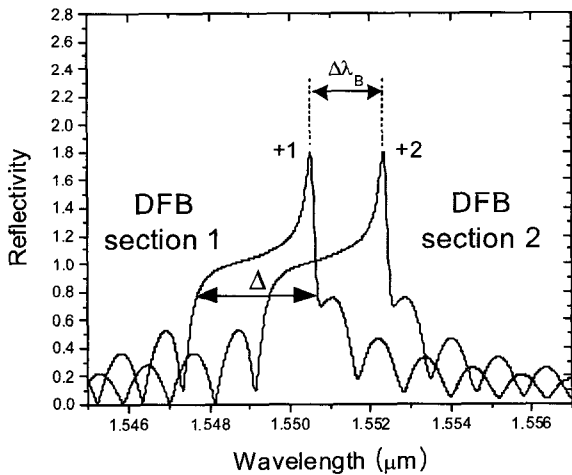


그림 2.  $\Delta\lambda_B < \Delta$ 인 경우 문턱 전류 이상에서 IP 회절격자를 가지는 두 CC DFB 영역의 반사 스펙트럼.

표 1. 여러 가지 결합세기와 CR을 갖는 다중 영역 CC DFB 구조의 전산 모의에 사용된 주입전류와 90 GHz 대역에서 SP 동작을 하는  $\Delta\lambda_B$ .

AR-AR	κL =2				κL =3				κL =4			
	CR=0.1		CR=0.2		CR=0.1		CR=0.2		CR=0.1		CR=0.2	
	주입전류	$\Delta\lambda_B$	주입전류	$\Delta\lambda_B$	주입전류	$\Delta\lambda_B$	주입전류	$\Delta\lambda_B$	주입전류	$\Delta\lambda_B$	주입전류	$\Delta\lambda_B$
AR (0.1%)	77 mA	0.88 nm	79 mA	1.02 nm	64 mA	1.12 nm	66 mA	1 nm	59 mA	1.06 nm	61 mA	1 nm
AR (0.5%)												
AR (1%)												
AR (2%)												
AR (5%)												

표 2. 계산에 사용된 파라미터.

파라미터	값	단위	의미
$d$	0.2	$\mu\text{m}$	활성층 영역의 두께
$w$	2	$\mu\text{m}$	활성층 영역의 폭
$n_e$	3.32		유효 굴절율
$n_g$	3.7		군 굴절율
$A$	1	$10^8 \text{ s}^{-1}$	선형 재결합 계수
$B$	1	$10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	자발 재결합 계수
$C$	0.75	$10^{-40} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$	오제(Auger) 캐리어 재결합 계수
$a_H$	4		선폭 증가 계수
$N_0$	1.5	$10^{24} \text{ m}^{-3}$	투명 캐리어 밀도
$\Gamma$	0.3		도파로 구속 계수
$\alpha_0$	$20 \times 10^2$	$\text{m}^{-1}$	손실
$g_N$	2.5	$10^{-20} \text{ m}^{-2}$	미분 이득
$\epsilon$	4	$10^{-23} \text{ m}^3$	비선형 이득 억제 계수

양 단면이 완전 무반사 코팅 되어있는 경우 여러 가지 결합세기에 대하여 위상 조정 영역의 위상을 0에서  $2\pi$ 까지 0.1  $\pi$  간격으로 변화시키며 다중 영역 CC DFB 레이저의 동작 특성을 살펴보았다. 그림 3은 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 SP 주파수와 발진파장을 나타낸다. 그림 3(a)는 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 SP 주파수를 보인다. SP 동작이 220 GHz 대역, 140 GHz 대역, 90 GHz 대역과 40 GHz 대역에서 발생하는 것을 볼 수 있다.

그림 3(b)는  $|kL|=2$ 이고 CR이 0.1과 0.2인 경우에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 발진 파장을 나타낸다. CR이 0.1인 경우 위상 조정 영역의 위상이  $0.2\pi$ 에서 DFB 영역 2의 발진 모드가 장파장 모드(+2)를 유지하지 못하고 단파장 모드(-2)가 발진하여 217 GHz로 SP 동작을 하는 것을 볼 수 있다. 위상 조정 영역의 위상이  $0.4\pi$ 에서  $1.4\pi$ 인 구간에서는 SP 동작을 하지 못하였다. 그 이유는 그림 2에서

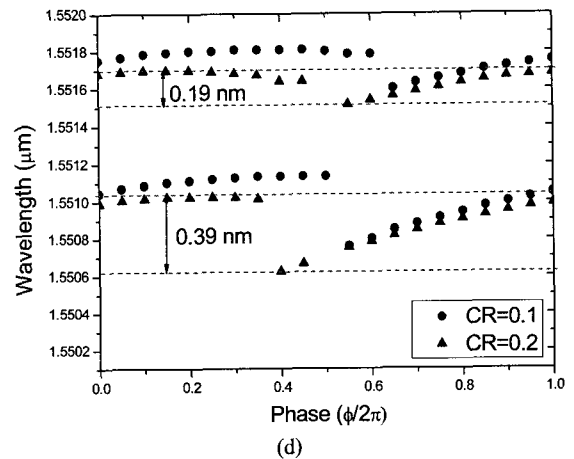
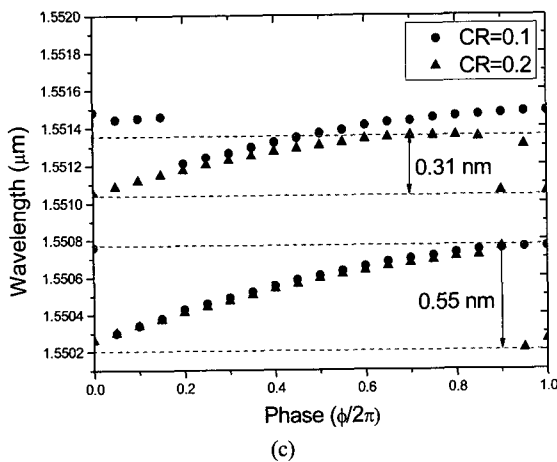
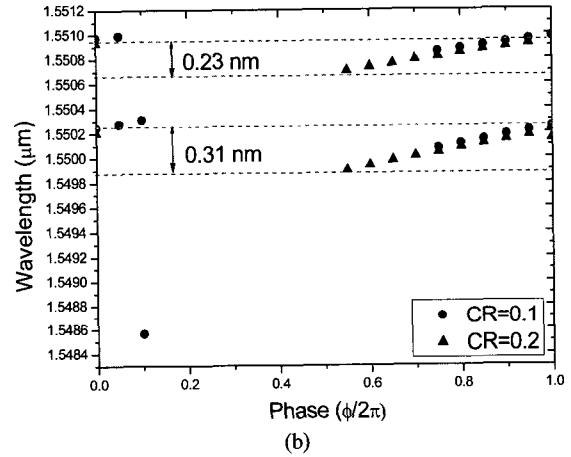
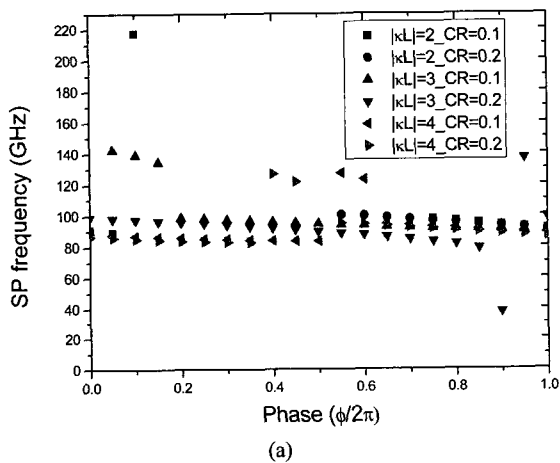


그림 3. 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 (a) 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 SP 주파수, (b)  $|kL|=2$ 이고 CR이 0.1과 0.2인 경우에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 발진 파장, (c)  $|kL|=3$ 이고 CR이 0.1과 0.2인 경우에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 발진 파장, (d)  $|kL|=4$ 이고 CR이 0.1과 0.2인 경우에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 발진 파장.

볼 수 있듯이 IP 회절격자를 갖는 DFB 영역 2의 발진 모드가 장파장 모드보다 DFB 영역 1의 금지 대역에 놓인 단파장 모드의 피드백이 커서 위상 조정 영역의 위상 변화에 따라 장파장 모드와 단파장 모드간의 경쟁으로 인하여 발진하지 못하였기 때문이다. CR이 0.2인 경우 DFB 영역 2의 발진 모드의 호핑이 없이 SP 동작을 하였으나 위상 조정 영역의 위상이 0.2π에서 π인 구간에서는 CR이 0.1인 경우와 비슷하게 DFB 영역 2의 발진 모드가 발진하지 못하여 criterion을 만족하지 못하였다.

그림 3(c)는  $|κL|=3$ 이고 CR이 0.1과 0.2인 경우에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 발진 파장을 나타낸다. 결합세기가 2인 경우와 다르게 위상 조정 영역의 모든 위상에 대하여 SP 동작을 하였다. CR이 0.1인 경우 위상 조정 영역의 위상이 0에서 0.3π인 구간에서 SP 주파수가 140 GHz 대역에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 위상 조정 영역의 위상 변화에 대하여 각각의 DFB 영역의 발진 파장의 크기가 변화하는데 두 DFB 영역의 발진 파장이 비슷한 크기로 변화하지 않고 한쪽 DFB 영역의 발진 파장이 다른 DFB 영역의 발진 파장에 비하여 크게 변화하기 때문이다. CR이 0.2인 경우 위상 조정 영역의 위상이 1.8π에서 SP 주파수가 40 GHz 대역에 발생하였고 1.9π에서 140 GHz 대역에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 경우도 CR이 0.1인 경우에 140 GHz 대역에서 SP 동작하는 것과 같은 이유라 생각된다.

그림 3(d)는  $|κL|=4$ 이고 CR이 0.1과 0.2인 경우에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 발진 파장을 나타낸다. CR이 0.1인 경우 위상 조정 영역의 위상이 0.8π에서 0.9π인 구간에서, CR이 0.2인 경우 위상 조정 영역의 위상이 1.1π에서 1.2π인 구간에서 130 GHz 대역에서 SP 동작을 하였다.  $|κL|=3$ 이고 CR이 0.1과 0.2인 경우 140 GHz 대역에서 SP 동작하는 것과 비슷한 이유라 생각된다. SP 주파수가 작아진 이유는 결합세기가 커질수록 DFB 영역의 발진 모드가 외부에서 반사되어 들어오는 필드의 영향을 덜 받아 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 발진 모드의 파장 변화가 작기 때문이다.

각각의 결합세기에 대하여 CR이 0.1과 0.2인 경우에 위상 조정 영역의 위상변화에 따른 각각의 DFB 영역의 발진 파장의 변화폭이 비슷하여 CR이 0.2인 경우 발진 파장의 변화폭을 그림 3(b), (c)와 (d)에 점선 사이로 표시하였다. 결합세기가 작은  $|κL|=2$ 이고 CR이 0.1과 0.2 경우에 위상 조정 영역의 위상 변화에 가장 넓은 발진 파장의 변화폭이 나타나야 하지만 위상 조정 영역의 전 위상 구간에서 SP 동작을 하지 못하였기 때문에 작게 나타났다. 모든 결합세기에 대하여 위

상 조정 영역의 위상 변화에 따른 DFB 영역 1의 발진 모드의 파장 변화폭이 DFB 영역 2의 발진 모드의 파장 변화폭보다 넓다. DFB 영역 1의 발진 모드의 파장이 DFB 영역 2의 금지대역에 놓여 DFB 영역 1의 발진 모드가 위상 조정 영역을 통해 대부분 반사되어 들어와서 DFB 영역 1의 발진 모드에 영향을 많이 주기 때문이라 생각된다.

여러 가지 결합세기와 CR에서 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 criterion을 만족하는 위상 조정 영역의 위상 범위를 표 3에 나타내었다. 결합세기가 2와 3인 경우 CR이 0.1일 때보다 0.2일 때 복소 결합 효과가 커져 DFB 영역 2의 발진 모드는 위상 조정 영역의 위상 변화에 대하여 장파장 모드와 단파장 모드간의 호핑이 적게 발생하여 criterion을 만족하는 위상 조정 영역의 위상 범위가 더 커짐을 볼 수 있다. 결합세기가 2인 경우보다 결합세기가 3과 4인 경우가 결합세기가 크기 때문에 같은 CR에서 더 넓은 위상 조정 영역의 위상 범위에서 criterion을 만족하였다.

그림 4는 양 단면 회절격자의 위상을 0으로 고정시킨 CR이 0.1인 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 양 단면 반사율에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 SP 주파수를 나타낸다. 그림 4(a)는  $|κL|=2$ 인 경우로 양 단면 반사율이 0.1%일 때 위상 조정 영역의 위상이 1.4π에서 1.8π인 구간에서 SP 동작이 90 GHz 대역에서 발생하였다. 나머지 양 단면 반사율에서 대해서는 SP 동작이 90 GHz 대역에서 발생하지 못하였다. DFB 영역의 결합세기가 작아 양 단면 반사율이 0.1%, 0.5%, 1%와 2%일 때 위상 조정 영역의 위상이 0에서 0.8π와 1.7π-2π 구간에서 DFB 영역 2의 발진 모드가 +2 모드에서 -2 모드로 호핑하여 SP 동작이 210 GHz 대역에서 발생한 것을 볼 수 있다. 양 단면 반사율이 5%인 경우 위상 조정 영역의 위상이 1.6π-1.7π인 구간에서만 SP 동작이 140 GHz 대역에서 발생하였다.

그림 4(b)는  $|κL|=3$ 인 경우로 양 단면 반사율이 0.1%, 0.5%와 1%인 경우 위상 조정 영역의 모든 위상에서 SP 동작을 하였으며 양 단면 반사율이 2%인 경우 위상 조정 영역의 위상이 1.6π에서 1.9π구간에서 criterion을 만족하지 못하였다. 양 단면 반사율이 5%인 경우에만 양 단면에서 반사되어 들어오는 필드의 영향을 많이 받아 위상 조정 영역의 위상이 1.7π에서 1.8π인 구간에서 DFB 영역 2의 +2 모드가 -2 모드로 호핑하여 SP 동작이 220 GHz 대역에서 발생한 것을 볼 수 있다. 그림 4(c)는  $|κL|=4$ 인 경우로 모든 양 단면 반사율에 대하여 전 위상에서 SP 동작을 하였다. 모든 양 단면 반사율에 대하여 위상 조정 영역의 위상이 0.8π에서 1.2π인 구간에서 SP 동작이 130 GHz 대역에서 발생한 것을 볼 수

표 3. 여러 가지 결합세기와 CR에서 양 단면이 완전 무반사 코팅된 다중 영역 CC DFB 레이저의 criterion을 만족하는 위상 조정 영역의 위상 범위.

AR-AR	$ κL =2$		$ κL =3$		$ κL =4$	
	CR = 0.1	CR = 0.2	CR = 0.1	CR = 0.2	CR = 0.1	CR = 0.2
0%	35%	45%	85%	90%	90%	85%

있다.

그림 5는 양 단면 회절격자의 위상을 0으로 고정시킨 CR이 0.2인 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 양 단면 반사율에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에

따른 SP 주파수를 나타낸다. 그림 5(a)는  $|\kappa L| = 2$ 인 경우로 모든 단면 반사율에 대하여 SP 동작이 90 GHz 대역에서 발생하는 위상 조정 영역의 위상 범위가 약 40% 정도로 비슷함을 볼 수 있다. CR이 0.1인 경우와 다르게 복소 결합 효과

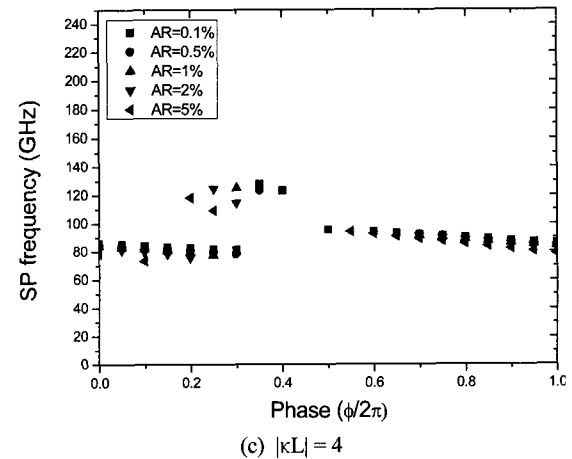
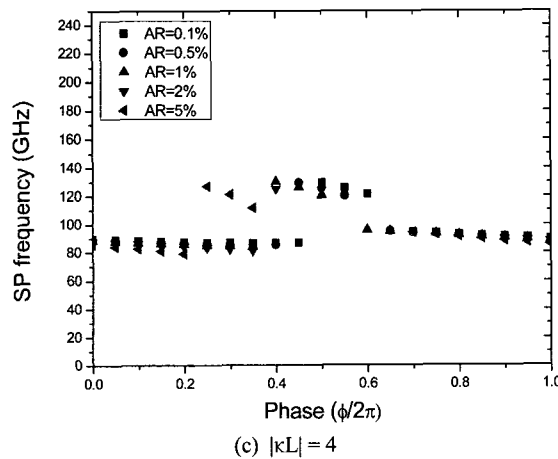
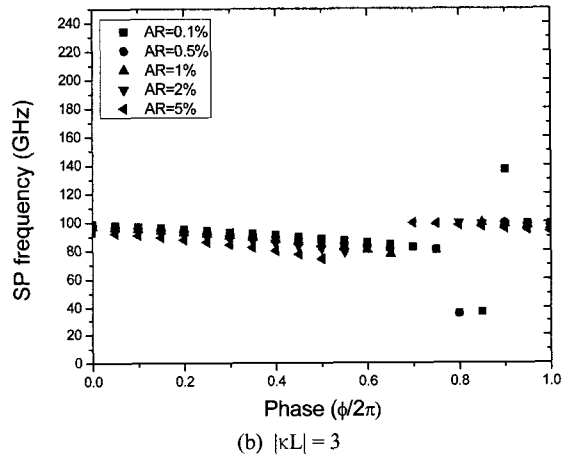
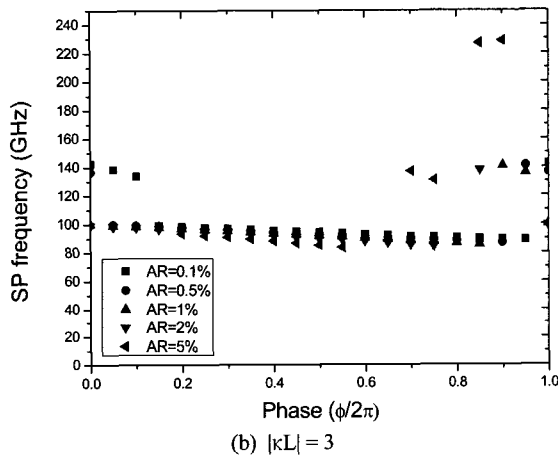
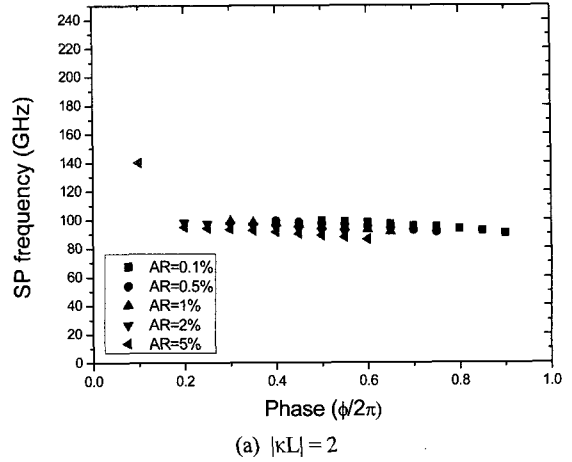
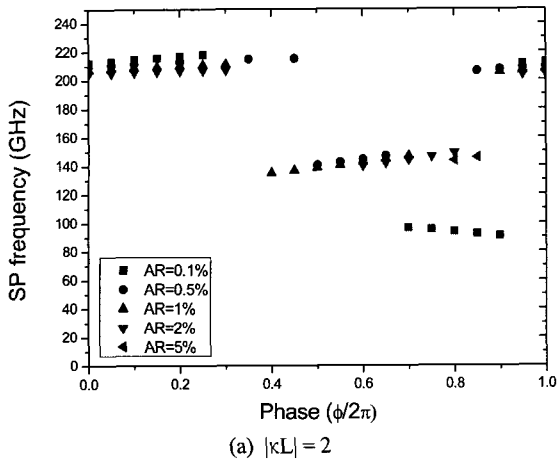


그림 4. 양 단면 회절격자의 위상을 0으로 고정시킨 CR이 0.1인 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 양 단면 반사율에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 SP 주파수.

그림 5. 양 단면 회절격자의 위상을 0으로 고정시킨 CR이 0.2인 다중 영역 CC DFB 레이저의 여러 가지 결합세기와 양 단면 반사율에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 SP 주파수.

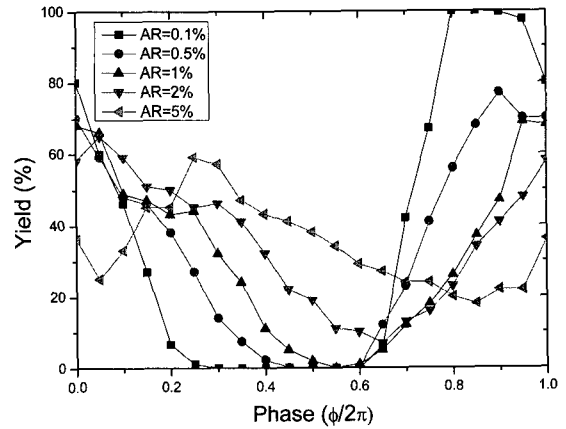
가 커져서 DFB 영역 2의 발진 모드의 호핑이 없이 SP 동작을 하는 것을 볼 수 있다. 양 단면 반사율이 5%인 경우에서만 위상 조정 영역의 위상이  $0.2\pi$ 에서 SP 동작이 140 GHz 대역에서 발생하였다.

그림 5(b)는  $|kL|=3$ 인 경우로 모든 양 단면 반사율에 대하여 criterion을 만족하는 위상 조정 영역의 위상 범위는 약 80% 정도였다. 양 단면 반사율이 0.1%인 경우에만 위상 조정 영역의 위상이  $1.6\pi$ 에서  $1.7\pi$ 인 구간에서 SP 동작이 30 GHz 대역에서 발생하였고  $1.8\pi$ 에서 SP 동작이 140 GHz 대역에서 발생하였다. CR이 0.1인 경우와 다르게 양 단면 반사율이 5%인 경우에도 DFB 영역 2의 발진 모드의 호핑이 없이 SP 동작을 하였으며 criterion을 만족하는 위상 조정 영역의 위상 범위가 더 넓음을 볼 수 있다. 그림 5(c)는  $|kL|=4$ 인 경우로 모든 양 단면 반사율에서 위상 조정 영역의 위상이  $0.4\pi$ 에서  $0.8\pi$ 인 구간에서 SP 동작이 120 GHz 대역에서 발생하였고  $0.8\pi$ 에서  $0.9\pi$ 인 구간에서 SP 동작이 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 결합세기가 커 DFB 영역 내부의 SHB 효과로 인하여 SP 동작의 기본 주파수 이외의 스퓨리어스 성분이 크게 발생하여 criterion을 만족하지 못하기 때문이다. 나머지 위상 조정 영역의 위상 구간에서는 90 GHz 대역에서 SP 동작을 하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 CR이 0.2인 경우 결합세기와 상관없이 DFB 영역 2의 발진 모드의 호핑이 없이 SP 동작을 하였다. 결합세기와 CR이 클수록 각각의 DFB 영역의 발진 모드가 양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 영향을 적게 받는 것으로 생각되어 진다.

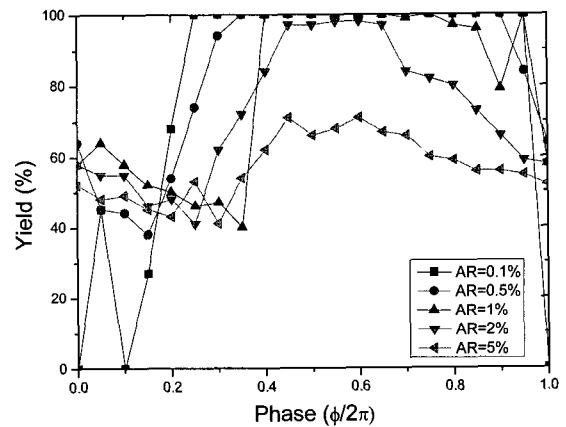
그림 6은 CR이 0.1인 경우 여러 가지 결합세기와 양 단면 반사율에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 다중 영역 CC DFB 레이저의 수율을 보여준다. 그림 6(a)는  $|kL|=2$ 인 경우로 양 단면 반사율이 0.1%, 0.5%, 1%, 2%와 5%로 증가할 경우 최대 수율은 100%, 77%, 69%, 65%와 59%로 크게 감소하였다. 또한 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위도 35%, 35%, 15%, 5%와 0%로 감소함을 볼 수 있었다. 양 단면 반사율이 증가할수록 수율이 0이 되는 위상 조정 영역의 위상 범위는 감소하였고 양 단면 반사율이 2%와 5%에서는 수율이 0이 되는 위상 조정 영역의 위상은 없었다. 그 이유는 그림 4(a)에서 특정 위상 조정 영역의 위상에 대하여 DFB 영역 2의 발진 모드가 장파장 모드에서 단파장으로 호핑하여 220 GHz 대역에서 SP 동작하여 경우, 양 단면 반사율이 증가할수록 양 단면에서 반사되어 들어오는 펄드가 증가하여 결합세기와 복소 결합 효과가 작은 DFB 영역의 발진 모드에 영향을 더 많이 주어 장파장 모드로 다시 호핑하여 90 GHz 대역에서 SP 동작하는 경우가 발생되기 때문이라 생각된다. 따라서 수율이 0이 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 양 단면 반사율이 증가할수록 작아지는 것으로 생각된다.

그림 6(b)는  $|kL|=3$ 인 경우로  $|kL|=2$ 인 경우에 비하여 최대 수율과 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 증가하였다. 양 단면 반사율이 0.1%, 0.5%, 1%, 2%와

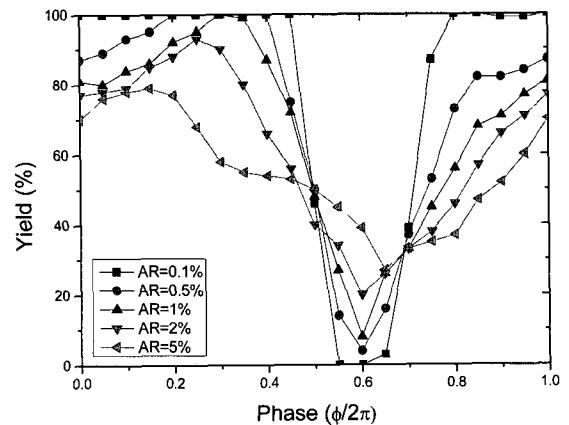
5%인 경우 최대 수율은 100%, 100%, 100%, 97%와 71%이고 양 단면 반사율이 커질수록 최대 수율이 100%가 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 작아짐을 볼 수 있었다. 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위는 각각 75%, 80%, 65%, 60%와 35%로 작아짐을 볼 수 있었다. 양 단면



(a)  $|kL|=2$



(b)  $|kL|=3$



(c)  $|kL|=4$

그림 6. CR이 0.1인 경우 여러 가지 결합세기와 양 단면 반사율에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 다중 영역 CC DFB 레이저의 수율.

반사율이 0.1%인 경우 위상 조정 영역의 위상이 0에서  $0.2\pi$  인 구간에서 수율이 작음을 볼 수 있다. 그 이유는 그림 4(b)에서 볼 수 있듯이 양 단면 반사율이 0.1%일 때 이 구간에서 SP 동작이 140 GHz 대역에서 발생하기 때문이라 생각된다.

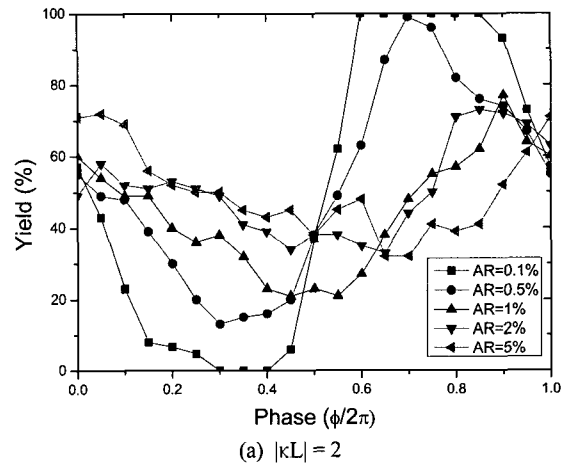
그림 6(c)는  $|kL|=4$ 인 경우로 양 단면 반사율이 0.1%, 0.5%, 1%, 2%와 5%인 경우 최대 수율은 100%, 100%, 100%, 93%와 71%이고 양 단면 반사율이 커질수록 100%의 수율을 나타내는 위상 조정 영역의 위상 범위가 작아짐을 볼 수 있었다. 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위는 각각 75%, 70%, 65%, 60%와 55%임을 볼 수 있었다. 모든 양 단면 반사율에서 위상 조정 영역의 위상이  $1.2\pi$  근처에서 수율이 급격히 작아지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 그림 4(c)에서 모든 양 단면 반사율에서 위상 조정 영역의 위상이  $1.0\pi$ 에서  $1.2\pi$ 인 구간에서 SP 동작이 120 GHz 대역에서 발생하기 때문이라 생각된다. 이 위상 영역 범위에서는 양 단면 반사율이 커질수록 반사되어 돌아오는 필드가 DFB 영역의 발진 모드에 영향을 더 많이 주어 90 GHz 대역에서 SP 동작하는 경우가 발생하기 때문에 수율이 증가됨을 볼 수 있다.

그림 7은 CR이 0.2인 경우 여러 가지 결합세기에 대하여 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 다중 영역 CC DFB 레이저의 수율을 보여준다. 그림 7(a)는  $|kL|=2$ 인 경우로 양 단면 반사율이 0.1%인 경우 위상 조정 영역의 위상 영역이  $1.2\pi$ 에서  $1.7\pi$ 인 구간에서 100%의 수율을 보였으며 수율이 60% 이상 되는 위상 영역 범위는 40%이다. 단면 반사율이 0.5%, 1%, 2%와 5%인 경우 최대 수율은 각각 99%, 77%, 73%와 71%이고 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위는 각각 35%, 20%, 25%와 20%임을 볼 수 있었다. CR이 0.1인 경우보다 CR이 0.2 경우 복소 결합 효과가 증가하여 DFB 영역 2의 발진 모드의 호핑이 적게 발생하기 때문에 양 단면 반사율에 따른 최대 수율과 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 증가된 것으로 생각된다.

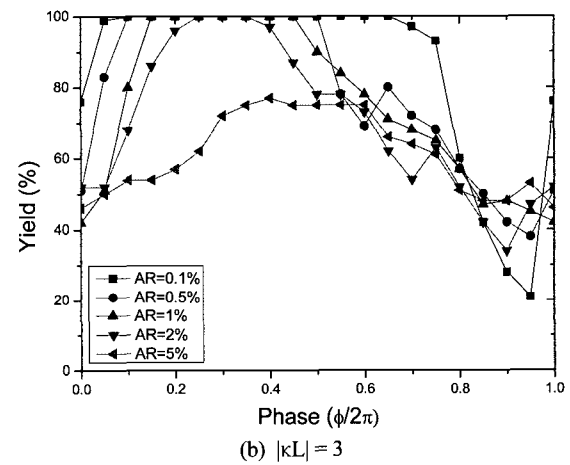
그림 7(b)는  $|kL|=3$ 인 경우로 가장 좋은 수율 특성을 보였다. 단면 반사율이 0.1%, 0.5%, 1%와 2%인 경우 최대 수율이 100%이며 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위는 각각 85%, 80%, 70%와 65%임을 볼 수 있다. 단면 반사율이 5%인 경우는 최대 수율이 77%이며 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위는 55%이다. CR이 0.1인 경우와 비교해 보면 위상 조정 영역의 위상 변화에 대하여 수율이 0이 되는 위상 영역은 발생하지 않았고 수율이 급격히 작아지는 위상 조정 영역의 위상도 발생하지 않았다. 양 단면 반사율이 0.1%인 경우 위상 조정 영역의 위상이  $1.6\pi$ 에서  $1.8\pi$ 인 구간에서 수율이 작아지는 것은 그림 5(b)에서 볼 수 있듯이 이 구간에서 SP 동작이 40 GHz와 120 GHz 대역에서 발생하기 때문이라 생각된다.

그림 7(c)는  $|kL|=4$ 인 경우로 단면 반사율이 0.1%, 0.5%와 1%인 경우 최대 수율은 100%이다. 단면 반사율이 커질수록 100%의 수율을 나타내는 위상 조정 영역의 위상 범위

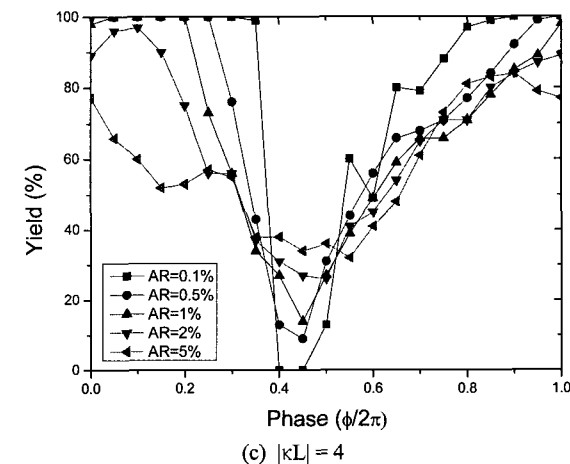
가 작아지고 수율이 60%이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위도 각각 80%, 70%와 60%로 작아짐을 볼 수 있었다. 단면 반사율이 2%와 5%인 경우는 최대 수율이 96%와 55%으로 작아졌고 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상



(a)  $|kL|=2$



(b)  $|kL|=3$



(c)  $|kL|=4$

그림 7. CR이 0.2인 경우 여러 가지 결합세기와 양 단면 반사율에 대하여 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 다중 영역 CC DFB 레이저의 수율.



표 4. 여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 각각의 단면 반사율에서 발생하는 최대 수율과 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위.

결합세기	단면 반사율	최대 수율(%)					수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위				
		0.1%	0.5%	1%	2%	5%	0.1%	0.5%	1%	2%	5%
κL =2	CR=0.1	100%	77%	69%	65%	59%	35%	35%	15%	5%	0%
	CR=0.2	100%	99%	77%	73%	71%	40%	35%	20%	25%	20%
κL =3	CR=0.1	100%	100%	100%	97%	71%	75%	80%	65%	60%	35%
	CR=0.2	100%	100%	100%	100%	77%	85%	80%	70%	65%	55%
κL =4	CR=0.1	100%	100%	100%	93%	79%	75%	70%	65%	55%	35%
	CR=0.2	100%	100%	100%	96%	84%	80%	70%	60%	55%	45%

범위도 55%와 45%로 작아졌다. 위상 조정 영역이 0.9π 근처에서 수율이 급격히 작아지는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 CR이 0.1 경우와 같이 그림 5(c)에서 위상 조정 영역의 위상이 0.9π 근처에서 SP 동작이 130 GHz 대역에서 발생하기 때문이라 생각된다.

여러 가지 결합세기와 CR에 대하여 각각의 양 단면 반사율에서 발생하는 최대 수율과 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위를 표 4에 나타내었다. 전체적으로 결합세기와 CR에 상관없이 양 단면 반사율이 증가 할수록 최대 수율과 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 감소함을 볼 수 있었다. 또한 결합세기와 CR이 커질수록 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 수율이 증가하였다. 결합세기가 3이고 CR이 0.2인 경우가 수율 특성이 가장 좋음을 볼 수 있었다. 결합세기가 2인 경우에는 결합세기가 작아 DFB 영역의 발진 모드가 양 단면 반사율의 영향과 위상 조정 영역의 위상 변화의 영향을 많이 받아 수율이 작게 발생하였다. 결합세기가 4인 경우에는 DFB 영역의 SHB 효과가 커져 스푸리어스 성분이 크게 발생하여 criterion을 만족하지 못하는 경우가 많아져 수율이 결합세기가 3이고 CR이 0.2인 경우보다 작았다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 다중 영역 CC DFB 레이저의 각 DFB 영역의 결합세기가 2, 3과 4이고 CR이 0.1과 0.2일 때 양 단면 반사율과 회절격자 위상 및 위상 조정 영역의 위상이 SP 동작 특성에 미치는 영향을 수율 관점에서 살펴보았다. 결합세기와 CR이 작을수록 양 단면 반사율이 증가할 때 양 단면과 다른 DFB 영역에서 반사되는 필드가 모드의 특성에 미치는 영향이 커져 양 단면 회절격자 위상 변화에 따른 발진 모드의 호핑이 발생하는 경우가 증가하여 수율이 감소하였다. 결합세기와 CR에 상관없이 단면 반사율이 증가 할수록 최대 수율과 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 감소함을 볼 수 있었다. 같은 결합세기에서는 CR이 0.2인 경우가 CR이 0.1인 경우보다 복소 결합 효과가 커져 최대 수율과 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 크음을 볼 수 있었다.

참고문헌 [5]의 양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상 변화에 따른 다중 영역 IC DFB 레이저의 수율과 본 논문의 다중 영역 CC DFB 레이저의 수율을 비교해보면 단면 반사율 증가에 따른 최대 수율이 다중 영역 IC DFB 레이저인 경우에는 급격히 감소하였지만 다중 영역 CC DFB 레이저인 경우에는 감소폭이 작았다. 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 범위도 다중 영역 CC DFB 레이저인 경우가 넓음을 알 수 있었다.

|κL|=3이고 CR이 0.2인 경우에는 DFB 영역의 발진 모드가 외부의 영향을 적게 받고 SHB 효과도 크지 않아 우리가 전산 모의에 사용한 경우 중에서는 양 단면 반사율 변화에 따른 최대 수율과 수율이 60% 이상 되는 위상 조정 영역의 위상 범위가 가장 크음을 볼 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원과(KRF-2006-311-D00712) 숭실대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- [1] S. Bauer, O. Brox, J. Kreissl, G. Sahin, and B. Sartorius, "Optical microwave source," *Electron. Lett.* vol. 38, pp. 334-335, 2002.
- [2] C. Bornholdt, B. Sartorius, S. Schelbase, M. Möhrle, and S. Bauer, "Self-pulsating DFB laser for all-optical clock recovery at 40 Gbit/s," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 4, pp. 327-328, 2000.
- [3] M. Möhrle, B. Sartorius, C. Bornholdt, S. Bauer, O. Brox, A. Sigmund, R. Steingrüber, M. Radziunas, and H.-J. Wünsche, "Detuned grating multisection-RW-DFB lasers for high-speed optical signal processing," *IEEE J. Select. Topics on Quantum Electron.*, vol. 7, no. 2, pp. 217-223, 2001.
- [4] H.-J. Wünsche, M. Radziunas, S. Bauer, O. Brox, and B. Sartorius, "Modeling of mode control and noise in self-pulsating PhaseCOMB lasers," *IEEE. J. Select. Topics*

- Quantum Electron.*, vol. 9, no. 3, pp. 857-864, 2003.
- [5] 김태영, 유종인, 김부균, “양 단면 반사율과 위상 조정 영역의 위상이 다중 영역 Index-Coupled DFB 레이저의 수율 특성에 미치는 영향”, *한국광학회지*, vol. 17, no. 6, pp. 548-555, 2006.
- [6] 김부균, 김태영, 김상택, 김선호, 박경현, “매우 넓은 영역의 Self-Pulsation 주파수와 높은 변조지수를 가지는 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저”, *한국광학회지*, vol. 17, no. 2, pp. 191-197, 2006.
- [7] 김태영, 김부균, “이득 분산이 다중 영역 복소 결합 DFB 레이저의 Self-Pulsation 특성에 미치는 효과”, *한국광학회지*, vol. 18, no. 1, pp. 56-65, 2007.
- [8] J. Carroll, J. Whiteaway, and D. Plumb, “Distributed feedback semiconductor lasers,” *London: SPIE Optical Engineering Press*, 1998.
- [9] B.-S. Kim, Y. Chung, and J.-S. Lee, “An efficient split-step time-domain dynamic modeling of DFB/DBR laser diodes,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, no. 7, pp. 787-794, 2000.

## Effect of the Reflectivity of Both Facets and the Phase of a Phase Tuning Section on the Yield of a Multisection Complex-Coupled DFB Laser

Tae-Young Kim and Boo-Gyoun Kim<sup>†</sup>

*School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: bgkim@e.ssu.ac.kr*

(Received September 4, 2007, Revised manuscript October 15, 2007)

The effect of the reflectivity of both facets and the phase of a phase tuning section on the self-pulsation (SP) characteristics of multisection complex-coupled (CC) DFB lasers is investigated in terms of yield. The lasers are composed of two CC DFB sections and a phase tuning section between them. As the coupling strength and the coupling ratio (CR) decrease, the effect of the reflected fields from both facets and the other DFB section on the mode characteristics of one DFB section increases, so that the yield decreases. As the facet reflectivity increases, the maximum yield and the range of the phase of a phase tuning section with yield more than 60% decrease independent of the coupling strength and CR. The yield characteristics of CR = 0.2 are better than those of CR = 0.1 with the same coupling strength due to the larger complex coupling effect. The case with  $|\kappa L| = 3$  and CR = 0.2 shows best yield characteristics among the cases considered in this work.