

Injection-Locking 된 반도체 레이저 광파의 위상 안정성

권진혁 · 김도훈
영남대학교 물리학과

Gregory Schuster and Ja H. Lee
NASA LaRC, Hampton, VA 23665, U.S.A.

(1990년 7월 5일 받음)

최대 출력 30mW의 AlGaAs 반도체 레이저를 이용하여 주입-잠금(injection-locking)을 실험하였다. 먼저 주인 레이저에서 나오는 광파와 노예 레이저에서 나오는 광파를 Twyman-Green 형 간섭계에서 상호 간섭시켜 간섭 무늬의 선명도(visibility)를 측정하였으며, 다음으로 Mach-Zehnder 형 간섭계에서 주인 레이저의 파장을 고정시키고 노예 레이저의 펌핑 전류를 미소 변화시킬 때 발생하는 위상 이동을 측정하여 주입-잠금된 노예 레이저의 위상 변화율을 측정하여 2.5rad/mA의 비례계수를 얻었다.

I. 서 론

최근 AlGaAs 형 반도체 레이저 결정성장 기술의 향상과 새로운 구조의 개발에 힘입어 상온에서 동작하는 높은 출력의 반도체 레이저가 매우 급격하게 성장하고 있다. 단일증폭대(single stripe) 반도체 레이저의 경우 출력면의 파괴 때문에 약 100mW를 넘을 수 없으나, laser diode array(LDA)의 형태를 사용함으로써 최근 연속 38W의 출력까지 향상되었다.⁽¹⁾ 대부분의 LDA는 스펙트럼 분포가 매우 넓고 공간 진폭분포가 불량하여 단순히 다른 고체 레이저의 펌핑용 정도에만 쓰일 수 있다. 그러나 상온에서의 연속 고출력 동작이 가능함에 따라 점차 출력빔의 공간과 스펙트럼 특성이 뛰어난 LDA를 개발하는데 많은 노력이 기울여지고 있으며 점차 회절한계(diffraction-limited)에 접근하고 있다.⁽²⁾

반도체 레이저의 응용면에 있어서, 좁은 선폭을 필요로 하는 분광학이나 coherent transmission 등의 분야와 그리고 높은 출력을 필요로 하는 고체 레이저 펌핑, 빔 결합(beam-combining), 재료가공, 무선표지(beacon) 등의 분야로 나눌 수 있다. 출력증가에 있어서 단일 레이저로는 한계가 있으므로 그 한계를 넘기 위해서는 빔 결합이 필수적이다.^(3,4) 단일 집적소자(chip)내에

서 약 10 μ m 간격으로 평행하게 발진 띠를 배치하여 evanescent wave에 의하여 이웃한 발진 띠 사이에 위상결합(phase coupling)되게 하거나, 발진 띠를 Y자 형태로 나란히 배치하여 모든 발진 띠가 coherent하게 함으로써 출력의 향상을 이룰 수 있다.⁽⁵⁾ 그러나 단일 집적소자로는 약 수십 Watt 정도가 그 한계로 보여진다. 단일 소자의 한계를 넘는 출력을 얻기 위해서는 주인 레이저에서 나오는 광파를 여러 개의 노예 레이저 속으로 주입-잠금 증폭(injection-locking amplification; ILA)이나 주행파 증폭(traveling-wave amplification; TWA)을 하여 모든 노예 레이저들이 상호 coherent되게 하여야 한다.^(6,7) 이 때 여러 광파 사이의 위상 정합이 가장 중요하다. 주입-잠금의 경우 그 대역폭은 좁으나(수 GHz) 잡음이 적고 증폭률이 크며 시스템 구성이 용이한 반면에, 주행파 증폭은 증폭 대역폭이 매우 넓으나(수 THz) 반도체 레이저 증폭기의 양면에 반사율 약 0.1% 이하의 무반사 박막 증착이 필요하고 출력 추출률(power extraction efficiency)이 다소 낮다.

본 연구에서는 주입-잠금을 이용한 빔 결합에 있어서 가장 중요한 요소인 가간섭성의 변화와 위상 안정성에 대하여 실험하였다. 반도체 레이저에 있어서 주입전류의 변화는 이득영역내에서의 전하밀도와 온도의 변화를 가져오고 따라서 그 영역의 굴절률의 변화가 일어나서 공진기의 길이가 변화된 효과를 유발한다.^(8,9) 따라서 혼자 동작하는 반도체 레이저의 경우 그 주파수가 변화하고,

본 연구는 부분적으로 "NASA Langley Research Center of Cooperative Agreement NCC1-113"의 지원과 "한국과학재단 레이저 장려연구센터"의 지원을 받았음.

주입-잠금에 의해서 강제적으로 주파수가 고정된 노예 레이저의 경우 그 위상이 변화하게 된다. 여러 개의 노예 레이저로 구성되는 반도체 레이저 배열시스템의 far-field pattern은 개개의 노예 레이저 사이의 위상 부정합(phase mismatch)의 영향을 가장 많이 받으므로, 주입전류의 변화에 따른 위상의 변화율에 대한 정보는 매우 중요하다.

II. 주입전류와 위상의 관계

여러 개의 동일한 레이저의 출력을 결합함에 있어서 파장분할(wavelength division multiplexing ; WDM)과 같이 비간섭적인(incoherent) 방법과 binary grating, ILA, 그리고 TWA 같은 간섭적인(coherent) 방법으로 나눌 수 있다.^(10,11) 광통신과 같이 단일회선에 많은 정보를 동시에 보내고자 하는 경우에는 WDM이 필요하나 양질의 고풍출력 빔을 얻고자 할 경우 간섭적 빔 결합이 필수적이다.

외부에서 주입된 빔의 강도가 이득포화(gain saturation)효과에 의해서 정상 동작 모드들을 억제치 이하로 떨어뜨려 버릴만큼 되면(quentching effect) 정상 모드들은 사라지고 단지 주입된 빔의 모드에서만 출력이 나타나게 된다.⁽¹²⁾ 이 때의 출력 빔의 위상과 주파수는 주입된 빔과 일치하게 되어 두 빔은 간섭적이 된다. 이와 같은 원리를 이용하여 그림 1에 나타난 것처럼 하나의 주인 레이저(master laser ; ML)의 출력 빔을 나누어 여러 개의 노예 레이저(slave laser ; SL) 속으로 주입 잠금하여 이 노예 레이저들을 모두 상호 간섭적이 되게 하여 하나의 레이저 빔처럼 되게 할 수 있다.

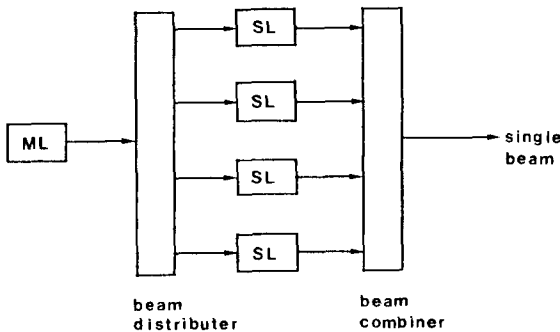


그림 1. 하나의 주인 레이저(master laser ; ML)와 여러 개의 노예 레이저(slave laser ; SL)를 이용한 빔 결합의 개념도.

그림 1에서 ML에서 나온 빔은 빔 분배기(빔 나누개나 나무형 광섬유)를 통하여 여러 개의 빔으로 나뉘어 각각 SL속으로 주입된다. 주입 잠금된 SL의 출력 빔은 beam combiner(binary grating, lens, beam splitter 등)에 의하여 하나의 빔으로 결합된다. 이 때 이웃한 빔 사이의 위상오차(phase mismatch)는 출력 결합효율과 결합된 빔의 광학적 특성에 직접적으로 영향을 미치므로 위상의 안정화는 매우 중요하다.

반도체 레이저에 있어서 전하밀도의 변화는 곧바로 이득매질의 굴절률변화와 온도변화를 발생시켜 결국 발진 주파수의 변화로 나타난다.⁽¹³⁾ 즉,

$$\Delta\nu = -\nu_0[A\delta N(I)/n + (\alpha_T + \beta_T)\delta T_1(I) + (\alpha_T + \beta_T)\delta T_2] + (\alpha_T + \beta_T)\delta T_2 \quad (1)$$

여기서 $\delta N(I)$ 는 전류에 의한 전하밀도의 변화, n 은 굴절률, ν 는 레이저 빔의 주파수, A 는 비례상수이며, $\delta T_1(I)$ 과 δT_2 는 각각 전류와 주위 온도변화에 의한 온도변화, α_T 와 β_T 는 각각 전류에 의한 온도변화 $T_1(I)$ 때문에 발생하는 굴절률과 공명기 길이의 변화를 나타내는 비례상수이다. 주위 온도는 안정되어 있으므로 δT_2 는 영이고 따라서 모든 변화의 가장 원인이 되는 것은 주입 전류의 변화에 따른 전하밀도와 온도의 변화이다. F. Mogensen 등의 이론에 의하면⁽¹⁴⁾ 주인 레이저와 노예 레이저 빔 사이의 잠금된 위상 ϕ 는

$$\phi = -\arcsin(\Delta\nu/\Delta\nu_L) - \arctan \alpha \quad (2)$$

과 같다. 여기서 $\Delta\nu$ 은 두 레이저 사이의 주파수 차이, $\Delta\nu_L$ 은 주입 잠금의 대역폭, α 는 선폭상승계수(lineewidth enhancement factor)로서 특정한 반도체 레이저에 대해서 3에서 10 사이의 값을 갖는 상수이다. $\Delta\nu$ 가 주입 잠금의 대역폭(약 3GHz)보다 작을 경우 주입 잠금은 풀어지지 않고 다만 위상의 상대적 변화로 나타난다.

식 (2)는 $\Delta\nu/\Delta\nu_L \ll 1$ 의 경우에

$$\phi = -\Delta\nu/\Delta\nu_L - \arctan \alpha \quad (3)$$

과 같이 된다. 실험에 의해서 전류변화에 따른 주파수변화 $\Delta\nu$ 는 전류변화 ΔI 에 비례하므로 다음과 같이 들 수 있다.

$$\Delta\nu = \gamma \Delta I \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하면 전류변화에 대한 위상의 변화량은

$$\Delta\phi = \gamma \Delta I / \Delta\nu_L \quad (5)$$

이 된다. 여기서 γ 는 비례상수이며, 위상변화는 상대적으로 부호는 생략하였다. 식 (5)는 위상변화량이 전류에 비례함을 보여주고 있다. 주입전류와 위상변화의 관계를 측정하고 이를 이용하여 이웃한 노예 레이저들 사이의 위상 부정합을 조절함으로써 위상 정합을 최적의 상태로 유지하는데 응용할 수 있다.

III. 실험장치

1. 주파수 안정화

앞에서 본 것과 같이 반도체 레이저의 주파수 안정화는 온도 및 전류의 안정화에 의존한다. 주파수 안정화에 있어서 출력 빔의 주파수변화를 탐지하여 전류에 제환(Electrical Feedback)시켜서 안정화시키는 능동적인 방법과⁽¹³⁾ 레이저의 온도와 전류의 변화를 최소화시켜서 주파수의 표류(drift)를 감소시키는 수동적인 주파수 안정화 방법 등이 있다. AlGaAs 계열의 레이저는 상온에서 온도 안정화의 조건만 갖추어지면 단일 종모드로 발진하므로 본 실험에서는 비교적 구성이 간단한 후자를 택하였다. 반도체 레이저는 thermoelectric cooler에 의하여 열이 제거되며 레이저 전체를 약 0.02°C 이하로 조절되는 온도 안정화된 상자 속에 넣어 둠으로 주파수 안정화를 얻었다. 또한, 0.02°C 이내의 온도범위내에서는 이로 인한 주파수의 표류가 약 300 MHz 정도로 예상되나 주입 잠금 대역폭을 약 3GHz로 취할 때 주입 잠금된 광파의 위상 안정성에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

2. 가간섭성 측정실험

먼저 그림 2의 장치를 이용하여 주인 레이저와 주입 잠금된 노예 레이저 빔의 간섭성을 측정하였다. 사용된 반도체 레이저는 모두 출력 30mW, 파장 830 nm의 Sharp Model LT015이다. 온도 조절된 상자 속에서 주파수가 안정화된 ML 빔은 평행 렌즈와 Faraday Isolator FR을 통과한 후 일부는 BS₂와 M₂에 의하여 0.5Å의 분해능을 가진 spectrometer 속으로 들어가고, BS₁에 의하여 50%씩 나뉘어 한쪽은 이동거울 M₁으로, 다른 쪽은 노예 레이저 SL로 각각 입사한다. SL의 출력 빔의 일부는 BS₁, BS₂를 거쳐 spectrometer로 입사하며 따라서 CCD₂ camera는 ML과 SL의 spectrum을 동시에 monitoring 할 수 있다. ML과 SL은 각각 thermoelectric cooler에 의하여 온도가 조절되며,

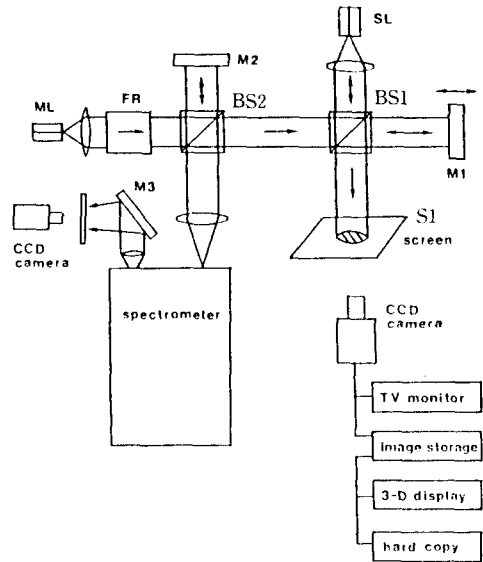


그림 2. 주인 레이저와 노예 레이저 사이의 가간섭성(coherence)을 측정하기 위한 Twyman-Green 형 간섭계. FR ; fararay isolator, ML ; master laser, SL ; slave laser, M₁ and M₂ ; mirrors.

수Å 이상의 파장변화는 TE cooler에 의한 온도변화로 가능하고 그 이하의 미세한 파장 조절은 전류를 조절함으로써 가능하다. 이와 같이 하여 ML의 주파수가 SL의 발진모드 중의 하나와 주입 잠금의 대역폭내에서 일치하게 되면 SL의 빔은 ML에 주입 잠금되어 상호 간섭을 할 수 있게 된다. SL와 BS₁, 그리고 이동거울 M₁은 Twymann-Green 형 간섭계를 형성하며 ML 빔과 SL 빔 사이의 간섭무늬가 스크린 S₁에 나타난다. 이 간섭무늬를 densitometric CCD camera를 이용하여 TV로 감시하고, image storage device 속에 간섭무늬를 저장하고 3차원 display와 intensity mesurement device로 간섭무늬의 선명도를 측정한다. 강도분포가 Gaussian이므로 간섭무늬의 강도분포는 대표적으로 그림 3과 같으며 모든 최소치와 최대치를 측정하여 평균하여 선명도를 구하였다.

3. 위상 안정성 측정실험

그림 4는 주입전류변화에 따른 SL 빔의 위상변화를 측정하기 위한 실험장치이다. M₁, M₂, BS₁, BS₂는 Mach-Zehnder 형의 간섭계를 형성한다. ML 빔의 위상은 고정되어 있으므로 SL의 주입전류를 약간씩 증가

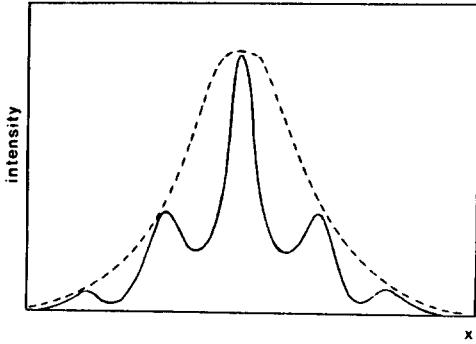


그림 3. 두 개의 가우시안형 빔의 간섭에 의해 형성된 간섭무늬의 강도분포. 가로축은 무늬를 가로 지르는 거리(X).

시키면 SL 빔의 위상이 변하여 간섭무늬가 이동하게 된다. 원래의 위치에서부터의 이동거리를 Δx 라고 하면 위상변화는

$$\Delta\phi = \frac{\Delta x}{x} 2\pi \quad (6)$$

의 관계에서 구할 수 있다. 여기서 x 는 간섭무늬 사이의 거리이다. 간섭무늬의 이동거리 Δx 는 그림 4에 있는 image monitoring system의 hard copy (thermal printer) 장치를 사용하여 전류변화에 따른 간섭무늬 사진을 얻어서 측정하였다.

IV. 실험결과

1. 가간섭성 측정실험 결과

그림 5(a)는 주인 레이저와 노예 레이저의 스펙트럼을 보여준다. 가로 축은 파장이며, 위의 점은 주인 레이저에 해당하고 아래의 점은 노예 레이저의 스펙트럼이다. 위쪽 사진은 두 레이저가 상호 완전주입 잠금되어 같은 파장을 나타내며, 아래쪽 사진은 부분적으로 주입 잠금된 노예 레이저가 약 3.5 \AA 떨어진 두 개의 종모드로 발진하고 있음을 보여준다. 그림 5(b)는 각 주입 잠금상태에 해당하는 간섭무늬로써 위쪽 사진은 두 레이저가 상호 완전주입 잠금된 상태에서 높은 선명도의 간섭무늬를 형성함을 보여주며 부분적으로 주입 잠금된 상태에서는 아래쪽 사진에 나타나는 것처럼 선명도가 떨어져 있다.

이동거울 M_1 을 레일 위에서 이동시켜 SL_1 - BS_1 과 M_1 - BS_1 사이의 광로차를 최대 약 1m까지 증가시켰다. 그림 6는 이 때의 선명도의 변화를 보여준다. 광로차 1m

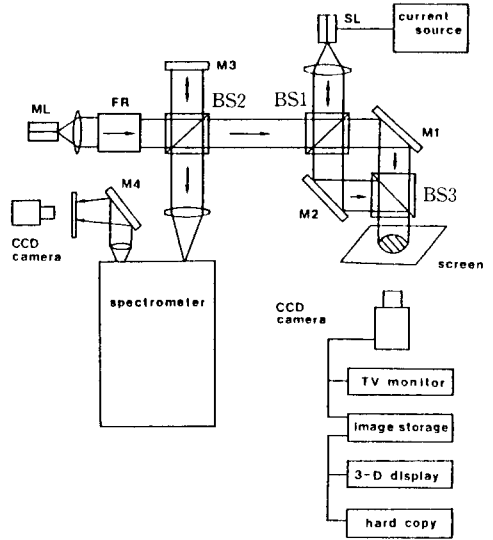


그림 4. 주입전류변화에 따른 노예 레이저의 위상변화를 측정하기 위하여 구성된 주인 레이저 (ML)와 노예 레이저(SL) 사이의 Mach-Zehnder 형 간섭계.

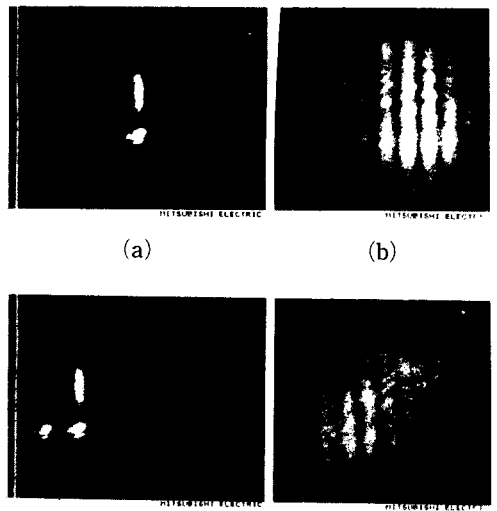


그림 5. (a) 완전히 주입 잠금된 상태를 보여주는 주인 레이저와 노예 레이저의 동시 스펙트럼(위)과 부분적으로 주입 잠금된 상태를 보여주는 스펙트럼(아래). 가로축은 파장이며 사진에서 위의 점은 주인 레이저, 아래의 것은 노예 레이저의 스펙트럼이다. (b) 각 주입 잠금 상태에 해당하는 간섭무늬. 위의 것이 훨씬 선명하다.

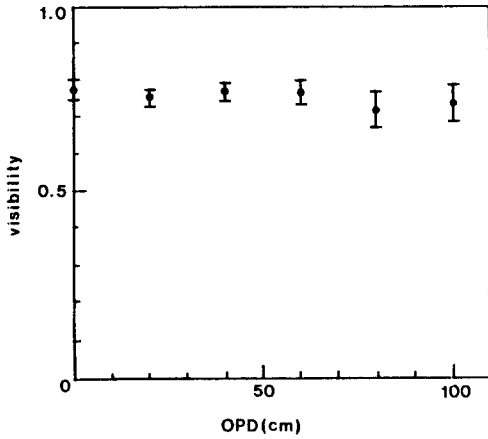


그림 6. 그림 2에서 광로차(OPD)의 변화에 따른 주인 레이저와 노예 레이저 빔 사이의 선명도(visibility)의 변화 곡선.

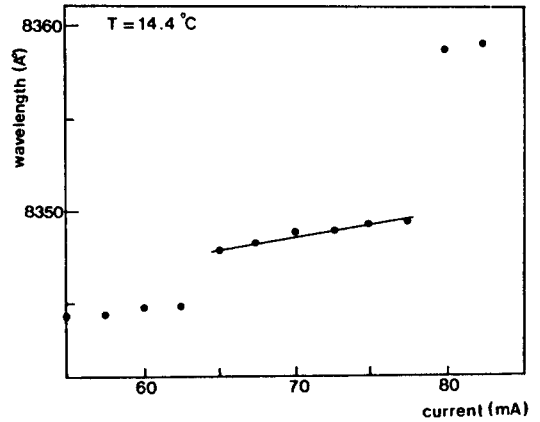


그림 8. 주입전류변화에 대한 발진파장의 변화. 비례계수가 0.1 \AA/mA 이다.

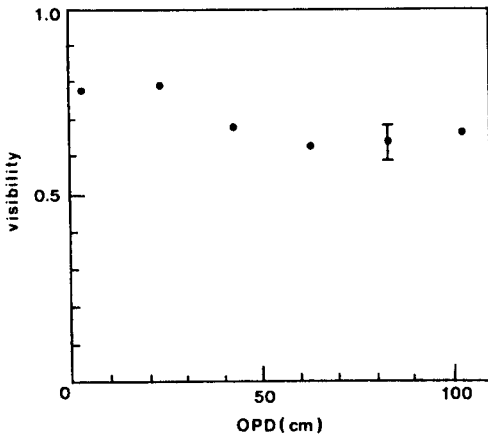


그림 7. 그림 2에서 노예 레이저 대신 평면 거울로 대체하여 주인 레이저 자신의 간섭무늬의 선명도변화 곡선.

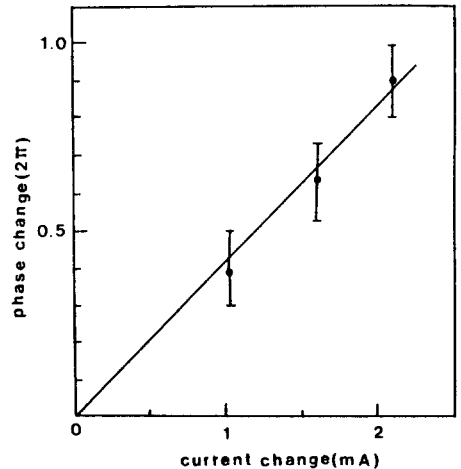


그림 9. 그림 4에서 측정된 주입전류의 변화에 따른 노예 레이저 빔의 위상의 변화 곡선. 비례계수; 2.5 rad/mA .

는 약 300 MHz의 주파수 반치폭(full width at half maximum; FWHM)에 해당하는데 이 영역안에서 선명도의 변화는 거의 없다. 30 MHz의 분해능을 가진 scanning Fabry-Perot spectrum analyzer로 분석했을 때 ML과 SL은 모두 약 30 MHz의 주파수 폭을 가지고 있었다. 이 값은 약 10m의 간섭거리(coherence length)에 해당한다. 비교하기 위해서 같은 시스템에서 SL 대신 다른 거울로 바꾸어 ML 빔 자체의 광로차에 대한 선명도변화를 측정된 것이 그림 7이다. 그림 6과 7을 함께 비교해 볼 때 SL 빔의 특성이 ML 빔과 거의

같다는 것을 알 수 있다. 즉, 주입 잠금된 SL 빔의 가간섭성은 ML 빔과 거의 같으며 빔 결함에 있어서 문제가 되지 않음을 알 수 있다.

2. 위상 안정성 측정실험 결과

그림 8은 전류변화에 대한 발진파장의 변화를 측정된 것이다. 이 때의 온도는 약 14.4°C 에 고정되었다. 여기에서 볼 수 있는 것처럼 전류가 증가함에 따라 파장이 서서히 증가하다가 모드 도약이 일어남을 알 수 있다. 모드 도약이 일어나기 전에 전류증가에 대한 파장 증가 비

율은 약 0.15 A/mA 이며 주파수로 환산하면 약 6.5 GHz/mA 에 해당한다. 즉, 식 (4)의 비례상수 $\gamma=6.5$ GHz/mA 이다. 그림 9는 그림 4의 장치에서 측정된 주입전류변화에 따른 위상변화에 대한 그래프이다. 주인 레이저의 전류는 약 80 mA 에 고정되었으며 노예 레이저의 전류는 약 75 mA 근처에서 변화되었다. 위상변화는 주입전류에 비례하는 것을 알 수 있으며 기울기는 평균 2.5 rad/mA 이며 최대 3.0 rad/mA 에서 최소 2.0 rad/mA 사이에 존재한다. 식 (5)에서 주입 잠금의 대역폭 $\Delta\nu$ 을 약 3 GHz로 취하고 앞의 γ 값을 사용하면 이론적인 기울기는 약 2.2 rad/mA 인데 이 값은 오차의 범위내에 들어가므로 실험결과를 잘 설명하고 있다고 할 수 있다.

여러 개의 레이저 빔들을 상호 결합할 때, 상호 위상 부정합(phase mismatch)에 따라서 far-field pattern 에서 중앙부분의 Airy Disc 내의 power 가 변화하게 된다. 계산에 의하면 위상 부정합이 약 0.2λ (1.256 rad)일 경우 power 는 10% 감소한다.⁽¹⁶⁾ 이것을 기준으로 할 때 노예 레이저의 허용전류변화는 약 0.5 mA 임을 알 수 있다.

V. 결 론

주인 레이저와 노예 레이저 빔 사이의 가간섭성과 전류에 대한 위상변화율을 각각 Twyman-Green 간섭계와 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하여 측정하였다. 주입 잠금된 노예 레이저의 가간섭성은 주인 레이저와 거의 동일하였으며, 전류변화에 대한 위상변화율은 약 2.5 rad/mA 였다. 빔 결합에서 위상 부정합의 허용한도가 약 0.2λ (1.256 rad)이므로 반도체 레이저의 펄핑전류를 약 0.5 mA 이내에서 조절하면 위상 정합을 유지할 수 있다. 보통 전류공급 장치는 0.1 mA 이내에서 조절되므로 위상변화가 그리 심각한 문제가 되지 않고 반도체 레이저를 이용한 빔 결합이 충분히 가능함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] M. sakamoto, D. F. Welch, g. L. Harnagel, W. Streifer, H. Kung, and D. R. Scifres, Appl. Phys. Lett. "Ultra-High Power 38W CW Monolithic Laser Diode Array," Appl. Phys. Lett. 52, 27 (1988).
 [2] D. Botez, L. Mawst, P. Hayashida, Q. Peterson, and

J. t. Roth, "High-Power Diffraction-Limited-Beam Operation From Phase-Locked Diode Laser Arrays of Closely Spaced 'Leaky' Waveguides (Antiguides)," Appl. Phys. Lett. 53, 464 (1988).
 [3] J. H. Kwon, M. D. Williams, and J. H. Lee," A Survery of Beam Combining Technologies For Laser Space Power Transmission," NASA TM101529, Dec. 1988.
 [4] C. Roychoudbuty. "Läser Beam Combining Technology," Proceedings of SPIE, vol. 740, 66 (1987).
 [5] W. Streufer, D. F. Welch, P. S. Cross, and D. R. Scifres, "Y-Junction Semiconductor Laser Arrays: Part I-Theory," IEEE J.Quantum Electronics," QE-23, 744 (1987); "Y-Junction Semiconductor Laser Arrays: Part II-Experiments," IEEE J. Quantum Electron. QE-23, 752 (1987).
 [6] Y. Yamamoto, "Characteristics of AlGaAs Fabry-Perot Cavity Type Laser Amplifiers," IEEE J. Quantum Electron. QE-16, 1047 (1980).
 [7] J. R. Andrews, "Traveling-Wave Amplifier Made From A Laser Diode Array," Appl. Phys. Lett. 48, 1331 (1986).
 [8] J. G. Mendiza-Alvarez, F. D. Munes, and N. B. Patel, "Réfractive Index Dependence on Free Carriers for GaAs," J. Appl. Phys. 51, 4365 (1980).
 [9] C. H. Henry, R. A. Rogan, and K. A. Bertness, "Spectral Dependence of the Change in Refractive Index Due to Carrier Injection in GaAs Lasers," J. Appl. Phys. 52, 4457 (1981).
 [10] R. I. Smith, "Dichroically Combined Diode Laser Transmitter," Proceedings of SPIE, vol. 756, 25 (1987)
 [11] J. R. Leger, G. J. Swanson, and W. B. Beldkamp, "Cöherent Beam Addition of GaAlAs Lasers by Binary Phase Gratings," Appl. Phys. Lett. 48, 888(1986).
 [12] G. R. Hadley, "Injection-Locking of Diode Lasers," IEEE J. Quantum Electron. Vol. QE-22, 419 (1986).
 [13] M. Ohtsu and T. Tako. "Cöherence in Semiconductor Lasers," Progress In Optics XXV, E. Wolf Ed., Elsevier Science Publishers, 1988.
 [14] F. Mogensen, H. Olesen, and G. Jaconsen, "Locking Conditions and Stability Properties for a Semiconductor Laser with External Light Injection," IEEE J. Quantum electron. Vol. QE-21, 784 (1985)
 [15] J. H. Kwon and J. H. Lee, "Far Field Beam Pattern of One MW Combined Beam of Laser Diode Array Amplifiers For Space Power Transmission," Proceedings of the 24th IECEC, vol. 1, 521-526 Aug. 1989.

Phase Stability of Injection-Locked Beam of Semiconductor Lasers

Jin Hyuk Kwon and Do Hoon Kim
Department of Physics, Yeungnam University, Gyongsan 713-749

Gregory Schuster and Ja H. Lee
NASA LaRC, Hampton, VA23665, U.S.A.

(Received: July 5, 1990)

An experiment on the phase stability of injection-locked beam is done by using AlGaAs semiconductor lasers. The coherence of two beams from the master and slave lasers is measured by interference between the beams in the Twyman-Green interferometer. The phase change of the output beam of the slave laser as a function of the driving current is measured in the Mach-Zehnder interferometer consisted of the master and slave lasers and a value of 2.5rad/mA is obtained.