

반도체 레이저의 광 위상 동기 Optical Phase-Locking of Semiconductor Lasers

신 철 호
목포 해양전문 대학

최근 고분해능 분광, 코히어런트 광통신 등의 중요한 기본 기술인 레이저간의 위상 동기화에 관한 연구와 이의 시스템에의 응용이 활발히 전개되고 있다. 이 논문에서는 레이저에 의한 광 위상 동기 루우프의 기본 동작 원리, 구성법, 특징, 응용 범위 및 위상 오차를 종합 분석하고, 공축점 파브리 페로 공진기 결합 광귀환형 반도체 레이저에 의한 헤테로다인 및 호모다인 광 위상 동기 루우프의 최근 실험 결과를 소개한다.

1. 서 론

광 위상 동기 루우프(Optical Phase-Locked Loop, OPLL)[1]-[14]는 광 주파수 측정, 고분해능 분광 등의 고정도 광계측, 코히어런트 광통신 등의 광응용 시스템에의 응용상 중요할 뿐 아니라 헤테로다인 OPLL은 장래 광 주파수 소인 발진기(또는 광 신세사이저)의 실현에 필요한 중요 기본 기술이다. 특히, 반도체 레이저는 주파수 제어의 용이함, 소형, 저소비 전력, 저가격, 고효율, 장수명 등의 여러가지 장점이 있기 때문에 각종 고정도 광응용 시스템에의 도입이 검토되고 있고, 반도체 레이저에 의한 OPLL도 그 중요성이 강조되고 있다.

그러나, 프리 런닝 상태의 반도체 레이저는 위상 잡음이 넓은 주파수 대역에 걸쳐 대단히 크기 때문에 위상 동기가 어렵고, 실험 결과 [4][5] 에서 나타난 바와 같이 루우프의 지연 시간 때문에 루우프의 대역폭에 제한을 받아 코히어런트 광통신에서의 요구(위상오차분산 $< 0.04\text{rad}^2$)를 만족하는 것은 현실적으로 어렵다. 헤테로다인 OPLL의 경우는 더욱 힘들다[6]. 그렇기 때문에 OPLL의 기초 실험에 위상 잡음이 반도체 레이저에 비해 현저히 작은 기체 레이저[1][2][7][9], 반도체 레이저 여기 YAG 레이저[8][12] 등이 사용되었고, 반도체 레이저의 경우는 광대역 FM 잡음 억압 특성을 갖는 광귀환을 도입한 외부 공진기 레이저(External or extended cavity laser, 통상적으로 ECL 로 약함.)가 사용되고 있다[3][11][13][14].

이 논문은 다음과 같이 구성된다. 2.에서는 각 종 OPLL의 구성 방법 및 그들의 특징을 비교한다. 3.에서는 OPLL의 위상 동기 오차에 대하여 검토한다. 4.에서는 공축점 파브리 페로 공진기(Confocal Fabry-Perot cavity) 결합 광귀환형 반도체 레이저에 의한 헤테로다인(heterodyne) 및 호모다인(homodyne) OPLL의 최근 실험 결과를 소개한다.

2. 각 종 광 위상 동기 루우프의 구성과 특징

2.1 기본 OPLL의 구성과 동작

OPLL의 기본 구성 및 동작 원리는 마이크로파 PLL과 같으나, 주발진기(통신에서는 수신신호), VCO(Voltage Controlled Oscillator; 극부 발진기), 위상 검출기(보통 Double Balanced Mixer 또는 가산기)가 각각 주 레이저(master laser, 광통신에서는 수신 광 신호), 종 레이저(slave laser, 극부 발진 레이저), 광 검출기(PD, APD, photo multiplier 등)로 대체될 뿐이다. 그림 1은 OPLL의 블록도이다. 주 레이저와 종 레이저의 광파 신호가 광 검출기에서 간섭, 두 광파의 광전계가 승적되어 레이저의 광 강도에 의한 직류 출력과 함께 두 광파 간의 위상차에 비례하는 신호가 얻어진다. 이 오차 신호는 루우프 필터를 통과한 후 종 레이저의 주파수 조절부(예를 들면, 반도체 레이저의 경우 주입 전류원)에 가해진다. 이 일련의 과정을 통하여 두 광파 사이에는 위상 동기가 이루어진다. 실제의 OPLL에서는 위상차 검출시 반드시 발생하는 광 강도에 의한 직류 전류 제거책으로 dc 보상[5]을, 나아가서는 광강도잡음(IM noise) 제거 목적으로 3dB 광 결합기와 2개의 PD로 구성되는 밸런스 광 검출기[11][14][15]를 사용한다.

이 OPLL은 두 광파 사이에 주파수 차가 없기 때문에 호모다인 OPLL이라 한다. PSK(Phase Shift Keying) 방식 광통신 수신기의 경우, 송신 신호의 변조시 $\pm 90^\circ$ 에 미치지 못하는 변조를 하면 그 정도에 따라 송신 광 전력에 캐리어가 남게 된다. 이것을 파일럿 캐리어라 하며, 이를 위상동기에 이용하기 때문에 캐리어 OPLL 또는 파일럿 캐리어 OPLL이라고 한다. 또, 밸런스 광 검출기를 이용한다고 하여 밸런스 OPLL이라고도 한다.

2.2 코스타스 루우프(Costas loop) 과 판정 귀환형 OPLL

그림 2 는 코스타스 루우프라 불리는 PLL로서, 파일럿 캐리어가 없어도, 즉 송신 광의 전 전력을 데이터에 사용해도(PSK의 경우 $\pm 90^\circ$ 변조) 캐리어에 추종하는 광 신호의 생성이 가능하기 때문에 광통신의 경우 파일럿 캐리어 PLL보다 유용성이 더 높다. 이 PLL에서는 입력 광전계에 대하여 동상(in phase ; I)과 직교(quadrature; Q)

인 2 광 신호를 극부 레이저에서 발생시켜, 각각 입력 광 파와 승격하여 90°의 위상차를 갖는 2 베이스 밴드 신호를 생성시킨 후, 이 2 신호를 승격하면 위상 오차 신호를 얻는다. 그 이후의 동작은 파일럿 캐리어 PLL과 같다.

판정 구한형 (Decision-driven 또는 Decision-directed) OPLL의 경우, 코스타스 루우프와 유사한 특성을 갖지만 직교 관계의 2 베이스 밴드 신호를 생성 시킨 후의 과정이 다르다. I 신호를 이용해 데이터의 판정을 하고, Q 신호는 1 비트의 데이터 판정에 필요한 시간 만큼 지연 시킨 후 이들을 승격함으로써 위상 오차 신호를 얻는다. 데이터 판정에는 잘 개발되어 이미 실용화 되어있는 IM-DD(Intensity modulation-Direct detection) 방식 광통신 수신기를 곧바로 사용할 수 있다는 장점이 있다.

2.3 헤테로다인 OPLL

두 레이저 광파 사이에 일정한 주파수차를 두고 위상 동기 시키는 OPLL이다. 그런 이유로 Frequency translation loop, Frequency offset-locked loop, Indirect loop 등의 여러 명칭이 사용된다. 루우프의 구성은 4.1에서 설명 한다. 광통신에서는 2.2의 OPLL의 헤테로다인 방식도 사용될 수 있다.

2.4 각 종 OPLL의 비교 (표 1 참조)

3. 호모다인과 헤테로다인 OPLL에서의 위상 동기 오차

OPLL의 위상 동기 오차는 PD에서 광 검출 과정에서 발생하는 샷 노이즈(shot noise)와 레이저의 위상 잡음이 주 원인이 된다. 레이저의 발진 선행이 로렌치인, 즉, 레이저의 FM 잡음이 백색이고, 위상 오차의 검출 한계가 샷 노이즈라고 가정하고, 선행 해석을 하면 OPLL의 위상 오차 분산은 다음 식으로 주어진다[16].

$$\sigma_{\phi}^2 = \frac{eF_{SN}M^2(P_M+P_S)(4\zeta^2+1)\omega_N}{16\zeta RP_M P_S} + \frac{\pi}{2\zeta\omega_N} (\Delta\nu_M + \Delta\nu_S) \quad [\text{rad}^2] \quad (1)$$

이 식에서 사용한 기호는 다음과 같다. σ_{ϕ}^2 : 위상 오차 분산, e: 소전하의 크기, F_{SN} : OPLL의 종류에 따른 계수 (호모다인 1, 헤테로다인 2, 분주율 M인 헤테로다인 OPLL 2/M), M: 분주율, P_M : 주 레이저의 광전력, P_S : 종 레이저의 광전력, ζ : 루우프의 댐핑 계수 (보통 0.5-1 이 되도록 설계), ω_N : 루우프의 자연주파수, R: 광 검출기의 분광 효율[A/W] (보통 0.4-0.9), $\Delta\nu_M$: 주 레이저의 선폭(FWHM), $\Delta\nu_S$: 종 레이저의 선폭. 식 (1)의 우변 제 1항은 샷 노이즈, 제 2항은 레이저의 위상 잡음에 의한 위상 오차 성분을 나타낸다. OPLL의 위상 오차는 식 (1)에서 보이는 바와 같이 ω_N 을 증가시키면 (루우프의 대역폭을 증가시키면) 제 1항은 그에 비례하여 증가, 제 2항은 반비례하여 감소한다.

식 (1)에서 σ_{ϕ}^2 가 최소가 되는 최적 자연 주파수 $\omega_{N,opt}$ 를 구하면

$$\omega_{N,opt} = \frac{8\pi(\Delta\nu_M + \Delta\nu_S)RP_M P_S}{eF_{SN}M^2(P_M+P_S)(4\zeta^2+1)} \quad (2)$$

이 된다. 일반적으로 루우프의 지연시간 때문에 (2)식을 만족하는 ω_N 의 확보는 어렵다. 그래서, 대부분의 OPLL은 위상 오차 분산율 식 (1) 우변의 제 2항만 고려하여 설계하여도 별 문제가 없다. 그러나, 실제의 레이저의 FM 잡음은 저주파역에서는 1/f 특성을 갖고, 완화 진동 주파수 부근에 높은 피크를 보이기 때문에 식 (1)로 구한 값보다 약간 높은 위상 오차 분산치를 갖는다. 특히, 주파수 안정화 레이저를 이용하는 경우에 있어서, 선폭은 좁혀졌어도 안정화 대역폭이 좁으면 고주파역의 위상 잡음은 그대로 남아 있기 때문에, 식 (1)과 많은 차가 있으므로 주의 하여야 한다.

4. 호모다인과 헤테로다인 OPLL의 실험

4.1 헤테로다인 OPLL

공출점 파브리 페로 공진기 결합 반도체 레이저 (CFP-LD)를 이용한 헤테로다인 OPLL의 실험계[13]를 그림 3에 보인다. 반도체 레이저는 파장 0.83 μm 의 CSP형 시판 레이저 (Hitachi HL8314E)를 사용하였다. 주파수 변별 반사체로 사용한 CFP 공진기의 FSR(Free spectral range)과 피네스(finesse)는 각각 1.5GHz, 50이다. LD 출력의 일부는 이 공진기에서 공진되어 LD에 재입사 되면, LD의 발진 주파수는 이 공진기의 공진 주파수에 동기(locking)된다. 이 동기 현상은 주입 동기(injection locking)와 유사하여 재입사 광량에 비례하는 일정한 동기 범위를 갖는데, 보통 수 100 MHz - 1 GHz 정도이다[17]. 그래서, CFP 공진기의 공진 주파수를 변화시키면, 다시 말해서 공진기의 길이를 조정하면 LD의 발진 주파수를 조정할 수 있다. 그 길이 조정은 공진기의 한 쪽 거울에 부착된 PZT에의 인가 전압에 의하여 이루어지며, 튜닝 계수는 79MHz/V였다. 그리고, 광구한 제어된 LD의 주입 전류에 의한 직접 변조 효율은 프리 런닝 상태 (3GHz/ma)보다 훨씬 떨어져 30MHz/ma였다[17]. 광구한에 의한 FM 잡음의 억압 특성을 그림 4에 보인다. 그림 4의 (a)는 실험 결과이고, (b)는 실험 매터미터를 이용한 이론 계산의 결과이며, 프리 런닝 상태의 FM 잡음에 규격화 한 것이다. 이때 억압도는 귀한 광량에 비례하며, 3 dB 억압 밴드폭은 외부 CFP 공진기의 공진 선폭의 1/2이다. 2대의 CFP-LD를 제작하여 측정 한 비트 신호의 선폭은 20 kHz 이하였다[17].

헤테로다인 OPLL은 그림 3에 보인 바와 같이 2 레이저 간의 비트 신호를 고안정도의 마이크로파 기준 신호와 위상 동기 시켜, 그 비트 신호를 기준 신호의 위상 안정도까지 안정화 시킴으로써, 종 레이저를 주 레이저로부터 기준 신호 주파수 만큼 옮겨시켜 2 레이저의 위상 동기를 이루는 시스템이다. 이렇게 하여 주 레이저의 코히어런스가 종 레이저에 전달되기 때문에, 고안정 주 레이저가 있으면 이 OPLL에 의하여 종 레이저의 안정화도 가능하다. 위상 동기 상태에서 기준 신호의 주파수를 소인하면 종 레이저의 주파수를 정밀하게 소인할 수 있다.

헤테로다인 OPLL에 있어서, 광 검출기는 일 종의 frequency down converter 로서만 작용하고, 위상 비교에는 DBM [10] 또는 위상 주파수 비교기 (phase/frequency comparator, PFC) 등의 RF 위상 검출기가 사용된다. 반도체 레이저의 주파수 fluctuation 이 크다는 점을 고려하면, 풀인 레인지(pull-in range)가 큰 PFC 쪽이 유리하기 때문에, 고속의 볼티지 콤파레이터 (voltage comparator) 와 디지털 PFC-IC 로 구성된 위상 비교기를 제작·사용하였다. 1차 능동 루우프 필터를 통과한 위상 오차 신호는 둘로 나뉘어서, 한 쪽은 PZT 드라이버를 통하여 CFP 공진기의 길이 조정용, 다른 한 쪽은 bias-T 를 통하여 LD 에의 주입 전류를 직접 제어하는데 사용 했으며, 이들의 제어 대역은 약 2 kHz 을 중심으로 각각 저주파역과 고주파역이다. 이 두 제어 루우프 사이의 제어 이득의 밸런스를 취하기 위하여 RF 전력 감쇠기를 이용하였다. 두 LD 사이의 비이트 신호는 2 개의 APD로 검출하여, 한 쪽은 OPLL의 헤테로다인 검파기로, 다른 한 쪽은 OPLL의 평가에 사용되었다.

그림 5의 실험 결과는 위상 동기된 레이저 비트 신호의 스펙트럼의 형상을 나타낸다. 그림 5 (a) 에서 보는 바와 같이 약 1 MHz 의 대역내의 주파수 잡음이 완전히 억압되어 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 5 (b) 는 (a) 의 위상 동기된 비트 신호의 중심부를 확대해 본 것이며, 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 비트 신호의 선폭은 약 30 Hz 이다. 이 때 측정에 사용한 RF 스펙트럼 분석기의 최소 분해능이 30 Hz 인 점을 감안하면 실제의 선폭은 0 Hz 에 접근하고 있다는 것을 추정할 수 있다. 나아가서 이 OPLL 에서 사용한 RF 기준 신호의 스펙트럼 형상과 비교한 결과, 위상 동기된 비트 신호의 중심부에서는 신호의 선폭, 형상 및 S/N 비가 모두 일치하였다. 이는 2 레이저간의 위상 오차를 기준 RF 신호의 위상/주파수 안정도로 결정되는 한계까지 접근시킬 수 있다는 것을 확인시켜 준다. 그리고, 이 실험에서 안정된 광 기준이 있으면 MHz 대의 제어 대역폭으로 LD 자체의 선폭을 sub-Hz 대 까지 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 저자는 이에 히트를 얻어 LD의 초고코히어런스화의 방법으로 LD 를 광귀환법으로 주파수 안정화 시킨후, 고 피네스의 슈퍼 캐비티를 전기적 부귀환의 광 주파수 변별기로 사용하는 광 전기 2중 귀환법의 사용을 제안하고, 이의 확인 실험에서 LD로서는 기록적인 슈퍼 캐비티에 대한 상대 선폭 7 Hz 를 달성한바 있다 [18].

레이저 간의 주파수 트래킹 오차를 정밀하게 측정하기 위하여 저자 등이 개발한 열린 분산 실시간 측정 장치 (Allan variance real time processing system) [19]로 위상 동기된 비트 신호의 열린 분산을 측정하였다. 그림 6의 동그라미 데이터는 그 측정 결과이며, 이는 $\sigma_y(\tau) = 6.3 \times 10^{-17} \cdot \tau^{-1}$ 로 직선 근사시킬 수 있다. 여기에서 $\sigma_y(\tau)$ 는 적분 시간 τ 에서의 예편 분산의 평방근이다. 그림에는 이 근사 결과를 실선으로 나타냈다. 파선은 실험에 사용한 RF 기준 신호의 주파수 안정도이다. 파선과 실선을 비교하면, 레이저 비트 신호는 OPLL에 의하여 RF 기준 신호의 주파수 안정도까지 제어된다는 사실을 다시 한 번 확인할 수 있다. 측정된 결과에서 레이저 간의 최소 주파수 트래킹 오차는 적분 시간 70 초에서 0.4 mHz 였다.

4.2 호모다인 OPLL

호모다인 OPLL 의 실험 장치의 블록도를 그림 7에 보인다. 이 실험에서도 4.1의 CFP-LD 2 대를 주·종 레이저로 사용하였다. 광 위상 검출기로 LD 의 IM 잡음 제거 목적으로 2 개의 pin-PD로 구성된 베런스 검출기를 사용하였다. OPLL의 평가는 광 위상 검출기의 출력을 오실로스코프와 RF 스펙트럼 분석기로 측정하는 방법을 사용하였다.

그림 8은 오실로스코프로 측정된 광 위상 검출기의 출력이며, (a)는 비동기시 (b)는 동기시의 결과이다. 비동기시는 두 레이저 간에 주파수차가 존재하기 때문에, 그림 8(a) 에 보이는 바와 같이 주파수차에 해당하는 비이트 신호가 관측된다. 그러나, 동기 상태에서는 주파수차가 없어지고 위상 오차에 해당하는 진폭만 관측된다. 그림 (a)와 (b)의 비교에 의하여 rms 위상 오차가 4.5×10^{-2} rad 임을 알 수 있다. 측정에 사용한 오실로스코프의 대역폭이 150 MHz이기 때문에 측정된 위상 오차에는 푸리에 주파수 150 MHz 이상의 고주파역의 위상 오차는 적산되어 있지 않다.

그림 9 (a)와 (b)는 그림 8의 위상 동기 상태에서 광 위상 검출기의 출력을 RF 스펙트럼 분석기로 관측한 호모다인 위상 오차의 파워 스펙트럼 밀도의 측정 결과와 실험 파라미터를 사용한 계산 결과(곡선 B)이다. 계산 결과와 실험 결과가 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 호모다인 위상 오차의 파워 스펙트럼 밀도를 광대역에 걸쳐 살펴보기 위하여 넓은 스펙의 계산 결과를 그림 10 에 보인다. 이 결과로부터 150 MHz 이상의 위상 오차를 취하고 그림 8의 결과를 이용하여 추정된 무한 대역의 위상 오차 분산은 2.26×10^{-2} rad² 이었다. 그러므로, 위상 동기된 종 레이저의 파워는 전 파워의 약 98% 에 이른다. 다시말하면, 주 레이저의 시간 코히어런스가 종 레이저의 98% 파워에 전달되었으며, 이는 고 코히어런스의 주 레이저가 있을 때 종 레이저의 고 코히어런스화에도 OPLL이 유효한 수단이 될 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

광 위상동기 루우프 (OPLL)의 동작 원리를 개관하고, 각 종 OPLL의 구성법, 응용 범위 및 그들 간의 차이점, 위상 오차를 분석·정리하였다. 나아가서는 표준적인 헤테로다인과 호모다인 OPLL의 실험 결과를 보고하였다. OPLL의 실험에는 공진형 반사체를 외부 반사경으로 사용한 광귀환형 주파수 안정화 반도체 레이저 2 대를 사용하였고, 그의 FM 잡음 억압 특성도 간단히 소개하였다.

헤테로다인 OPLL의 주파수 트래킹 오차와 호모다인 OPLL의 위상 오차 분산은 각각 0.4 mHz (적분 시간 70 초), 2.26×10^{-2} rad²이었다. 이것은 서론 서두에서 열거한 각 종의 고정도 광응용 시스템에 충분한 성능이라 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] L.H.Enloe and J.L.Rodda, Proc.IEEE, 53, 165 (1965)
- [2] W.R.Leeb, H.K.Philipp, A.L.Scholtz and E.Bonek, Appl.Phys.Lett.,41,592(1982)
- [3] R.C.Steele, Electron.Lett., 19, 69(1983)
- [4] M.Kouroggi, C.H.Shin and M.Ohtsu, IEEE Photon. Technol. Lett., 3, 270(1991)
- [5] G.Wenke and S.Saito, Jpn J. Appl. Phys., 24, L908(1985)
- [6] K.Kuboki and M.Ohtsu, IEEE J. Quantum Electron., 23, 388(1987)
- [7] J.L.Hall, L.S.Ma and G.Kramer, IEEE J. Quantum Electron., 23, 427(1987)
- [8] T.J.Kane, A.C.Nilson and R.L.Byer, Opt.Lett., 12, 175(1987)
- [9] G.Fisher, J. Opt. Commun., 9, 27(1988)
- [10] J.Harrison and A.Mooradian, IEEE J. Quantum Electron., 25, 1152(1989)
- [11] J.M.Kahn, IEEE Photon. Technol. Lett., 1, 340(1989)
- [12] L.G.Kazovsky and D.A.Atlas, IEEE Photon. Technol. Lett., 1, 395(1989)
- [13] C.H.Shin and M.Ohtsu, IEEE Photon. Technol. Lett., 2, 297 (1990)
- [14] C.H.Shin and M.Ohtsu, IEEE/LEOS Summer Topical, Monterey, paper No. SCW3,(1990)
- [15] G.L.Abbas, V.W.S.Chan and T.K.Yee, Opt. Lett., 8, 419(1983)
- [16] C.H.Shin, Ph.D. thesis, Tokyo Institute of Technology, (1991)
- [17] C.H.Shin, M.Teshima, M. Ohtsu, T.Imai, J.Yoshida and K.Nishide, IEEE Photon. Technol. Lett., 2, 167(1990)
- [18] C.H.Shin and M.Ohtsu, Opt. Lett., 15, 1455(1990)
- [19] C.H.Shin and M.Ohtsu, Electron. Lett.,26, 1571 (1990)

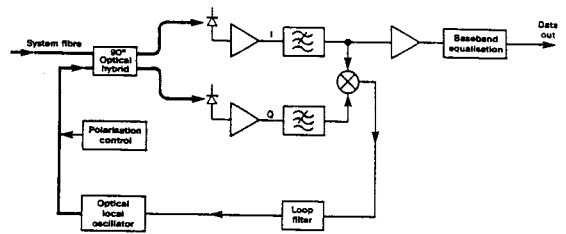


그림 2 광 코스타스 루우프

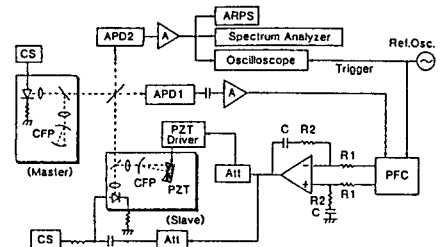


그림 3 헤테로다인 광 위상 동기 루우프의 실험계. CS: 전류원. Att: RF power attenuator.

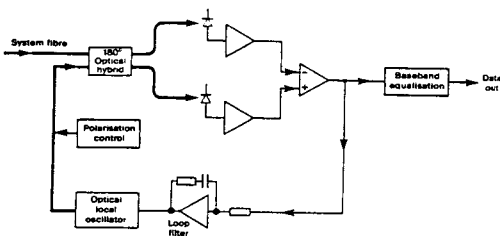
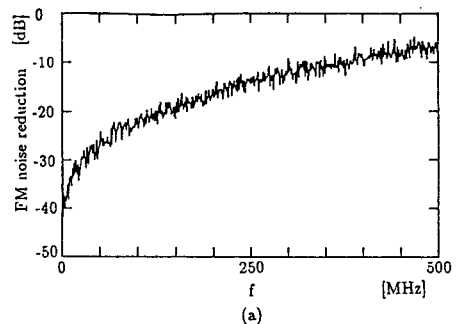
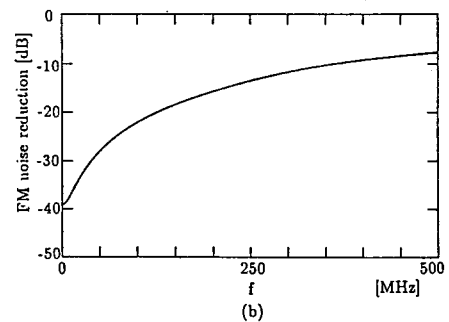


그림 1 표준형 호모다인 광 위상 동기 루우프



(a)



(b)

그림 4 공출점 파브리 페로 공진기 결합 반도체 레이저에 있어서의 광귀환에 의한 FM 잡음의 억압 특성. (a) 실험 결과. (b) 이론 계산 결과.

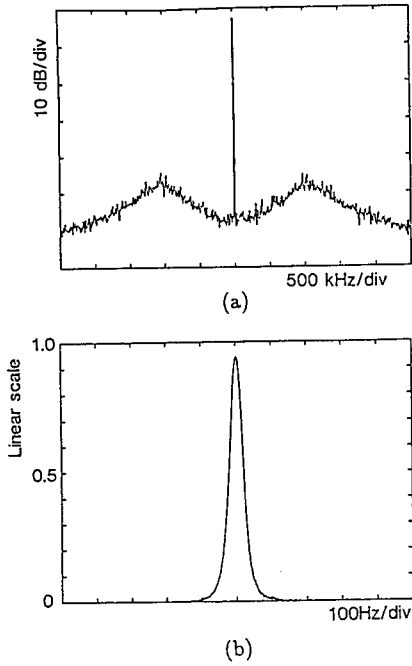


그림 5 위상 동기 상태에서의 헤테로다인 신호의 스펙트럼 형상. (a) 주파수 스펙 5 MHz, 분해능 1 kHz. (b) 스펙 1 kHz, 분해능 30Hz.

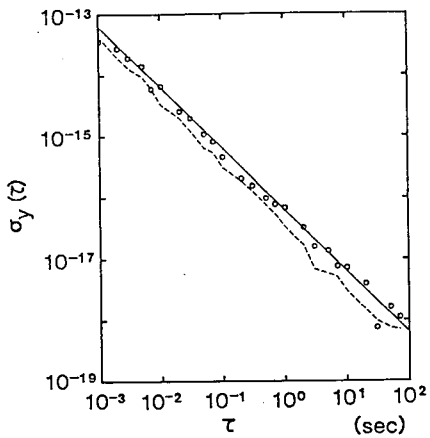


그림 6 위상 동기된 헤테로다인 신호의 주파수 안정도 측정 결과 (상세한 것은 본문 참조)

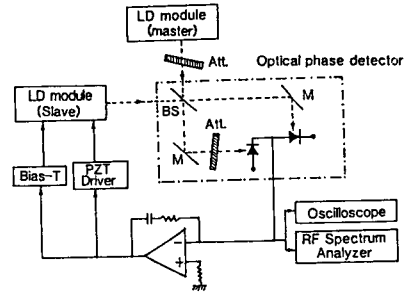
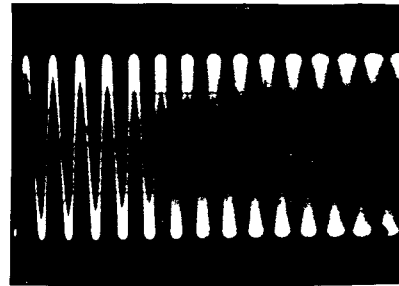
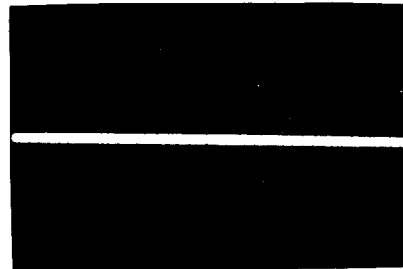


그림 7 호모다인 광 위상 동기 루우프의 실험계



(a)



(b)

그림 8 오실로스코프에 의한 호모다인 위상오차의 측정

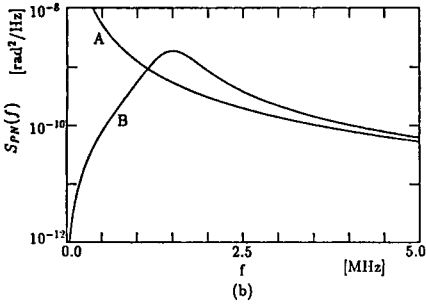
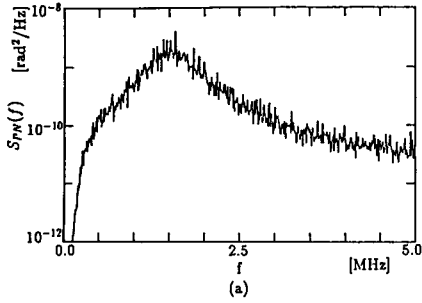


그림 9 호모다인 위상 오차의 파워 스펙트럼 밀도의 측정 결과(a)와 계산 결과(b). A: 2대의 CFP-LD, B: 위상 동기 시

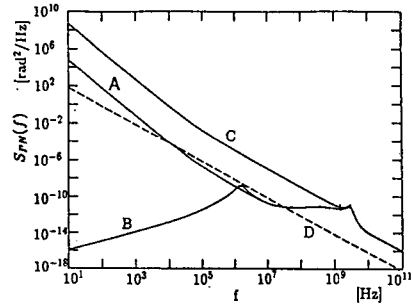


그림 10 호모다인 위상 오차의 파워 스펙트럼 밀도의 계산 결과. A, B: 그림 9와 동일, C: 2대의 프리 런닝 LD, D: 20 kHz의 로렌치안 선폭을 가진 헤테로다인 신호.

표 1 각종 광 위상 동기 루우프의 비교

	밸런스 OPLL	판정귀환 OPLL	헤테로다인 OPLL
위상오차신호	선형 처리	비선형처리	RF 위상검출기사용
불요dc광전류 제거	dc-coupled차동 증폭기 사용, 밸런스 중요(drift, noise)	ac-coupling 가능	ac-coupling 가능
pilot carrier	필요	불요	필요
장치	간단(180도 hybrid)	복잡 (90도 hybrid)	조금 복잡 (RF회로)
데이터 PLL 간의 crosstalk (통신)	있음 (선폭에 대한 요구가 엄격함)	원리적으로는 없음	있음
LD 잡음 (위상 오차 검출시)	광 강도 잡음 억제 가능	shot noise가 대부분	shot noise가 대부분
용도	*광통신 *중 레이저의 주파수 안정화 *각종 고정도 광계측 (예, 광 주파수 측정)	*광통신	*고분해능 분광 *광통신 *중레이저의 주파수 안정화 *광 주파수 소인 발진기 *각종 고정도 광계측 *coherent 광 펄스 발생

주) 코스타스 루우프의 경우는 이 표의 범위 내에서 판정 귀환형 OPLL과 같다.