

초고속 반도체 레이저와 광통신 응용



이 창 희

한국과학기술원 전기 및 전자공학과

요 약

본 기술해설에서는 초고속 반도체 레이저의 특성을 알아보고 광통신에의 응용을 검토하였다. 먼저 반도체 레이저의 동작 원리를 설명하였고, 초고속 반도체 레이저의 소신호 및 대신호 변조특성에 대해서 기술하였다. 또한, 반도체 레이저를 이용하여 극초단 펄스를 생성하는 방법으로 이득/Q 스위칭법, 외부변조기와 집적화된 반도체 레이저를 이용하는 방법, 모드 록킹법에 대해서 검토하고 펄스 압축법에 관해서도 기술하였다. 초고속 반도체 레이저의 응용으로는 초고속 광통신, 솔리톤 광통신, 전광 시분할 다중/역다중에 관해서 기술하였다.

1. 서 론

정보통신의 서비스가 음성 중심에서 영상 및 데이터 중심으로 전환되면서 국간전송망 및 가입자망의 전송속도는 급속하게 증가하고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 파장분할 및 시간분할 방식의 초고속 광통신 시스템에 대한 연구/개발이 계속되고 있으며, 최근에는 광통신 시스템을 효율적으로 연결하여 통신망의 성능을 향상시키기 위한 초고속 광통신망에 대한 연구도 여러 나라에서 수행되고 있다. 반도체 레이저는 이러한 초고속 광통신 시스템 및 광통신망 구현에 필요한 핵심 소자로서 본 기술해설에서는 초고속 반도체 레이저의 특성 및 이의 광통신에의 응용에 관해서 기술하고자 한다.

반도체 레이저에 관한 연구는 레이저가 처음 발명된 1960년대 초부터 시작되었으며, 관련 분야를 비롯한 연구분야가 지속적으로 확장되고 있다. 이와 같이 반도체 레이저에 대한 관심이 끊이지 않는 것은 반도체 레이저가 가지고 있는 고유의 높은 광전력으로의 변환효율(> 50%), 소형(< 1 mm³), 전류로서 구동할 수 있다는 장점 때문이다. 반도체 레이저는 또한 여러 가지 전자소자와 집적화가 가능하다. 이러한 장점들이 반도체 레이저

를 광통신용 광원으로 널리 활용되게 하였으며, 이는 광통신의 발전에도 크게 기여하고 있다. 반도체 레이저의 발전 과정은 광통신의 발전과 더불어 초기의 870 nm(GaAs)에서 1,310 nm(InP), 1,550 nm(InP)대로 변천되어, 현재는 광섬유의 전송손실이 최소인 1,550 nm 대의 반도체 레이저가 주종을 이루고 있다.

본 기술해설의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 반도체 레이저의 동작원리와 변조특성을 기술하였다. 반도체 레이저의 변조대역폭을 향상시키는 방법을 살펴보고, 대신호 변조특성으로는 여러 가지 비선형 현상에 대해서 기술하였다. 제 3장에서는 반도체 레이저를 이용하여 극초단 광펄스를 생성하는 방법으로 이득/손실 스위칭법, 외부변조기와 집적화된 반도체 레이저를 이용하는 방법, 여러 가지 모드 록킹법등에 관해서 기술하였다. 제 4장에는 초고속 반도체 레이저의 광통신, 솔리톤 광통신, 전광통신망 등에서의 응용에 대해서 설명하였으며, 마지막으로 제 5장에 결론을 실었다.

2. 반도체 레이저 동작원리

2.1 동작원리

반도체 레이저도 다른 레이저와 같이 빛을 증폭할 수 있는 매질과 증폭된 빛의 일부를 재환시키는 공진기로 구성되어 있다. 그림 1(a)에 통상의 반도체 레이저의 구조를 나타내었다. 반도체에서는 가전자대(conduction band)에 존재하는 전자와 valence band에 있는 정공이 직접 결합할 때 빛이 발생하며 가전자대에 전자의 수가 충분히 많으면 빛을 증폭할 수 있다. 이와 같이 반도체에서의 빛의 증폭은 특정한 레벨간의 전자의 천이에 의한 것이 아니고 그림 1(b)에 나타낸 바와 같이 band와 band간에 전자의 천이에 기인하므로 빛을 증폭할 수 있는 증폭대역폭(gain bandwidth)이 매우 넓은(1,550 nm 레이저의 경우 > 100 nm) 것이 특징이다. 또한 그림 1(c)에 보인 바와 같이 이득

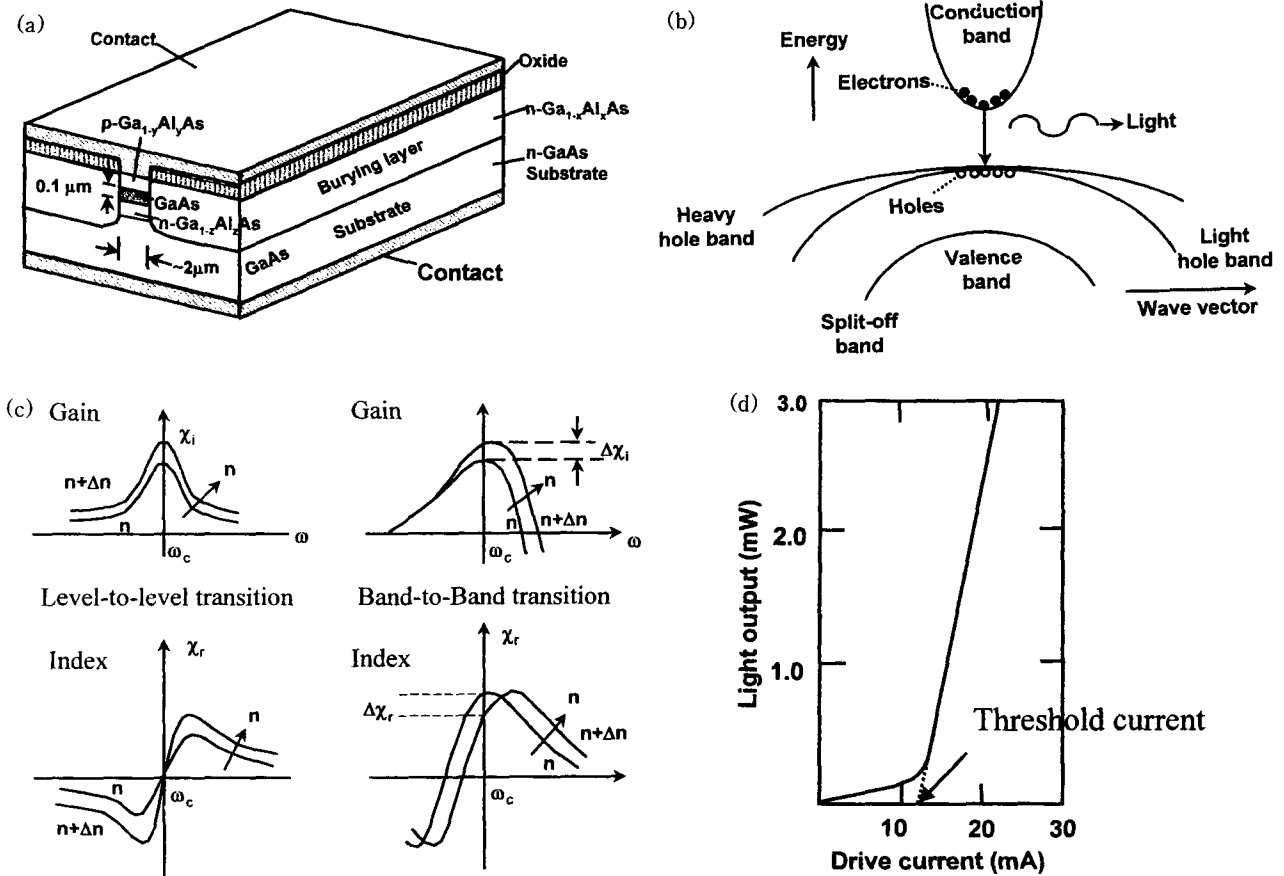


그림 1. (a) Buried heterostructure 반도체 레이저의 구조, (b) Direct-gap 반도체의 밴드 구조 및 빛을 방출하는 재결합 과정, (c) 왼쪽은 2-level 모델 원자의 광증폭 이득과 굴절율의 주파수 특성을 나타내고 오른쪽은 반도체 레이저의 이득과 굴절율의 주파수 특성을 나타낸 것으로, 이득이 최대인 점에서의 전자 수 n 의 변화가 굴절율에 미치는 영향이 다를 것을 보이고 있다. (d) 반도체 레이저의 주입전류 대 광출력 특성.

이 최대인 파장과 굴절율이 전자의 수에 따라 변하지 않는 파장이 일치하지 않기 때문에 이득의 변화가 곧 굴절율의 변화로 이어진다. 이득이 변화가 굴절율의 변화에 미치는 정도는 발진선 폭 증대인자(line width enhancement factor)로 정의되며, 이는 반도체 레이저의 스펙트럼 및 동특성을 결정하는 중요한 역할을 한다.

반도체 레이저 공진기는 그림 1(a)에 보인 바와 같이 빛을 도파시키기 위한 도파로와 도파로의 양쪽 끝의 cleaved facet에 의해서 구성된다. 횡 방향(transverse)은 이종접합(heterojunction)된 매질의 굴절율 차이에 의해서 광도파로가 형성되며, 옆방향(lateral)은 반도체 레이저의 구조에 따라 여러 가지 방법의 도파로가 사용되고 있다. 이러한 구조를 갖는 반도체 레이저의 도파로 모드들은 대부분의 경우는 단일모드이며, 발진 편광모드는 도파로의 특성에 의해서 TE(transverse electric)모드(편광의 방향이 옆방향)만 발진이 된다. 한편 반도체 레이저 공진기의 길이는 약 $300 \mu\text{m}$ 정도이므로 발진 중 모드간의 간격(cleaved facet에 의해서 결정되는 공진주파수)은 125 GHz 정도이다. 반도체 레

이저의 중심 발진파장은 이득이 가장 큰 공진기의 공진주파수로 결정되며, 공진주파수를 선택하기 위한 구조 변경이 없는 레이저는 일반적으로 다중 중모드로 발진한다. 반도체 레이저 공진기의 구조는 가간섭이 좋은 단일 중모드(single longitudinal mode) 레이저를 구현하기 위해서 여러 가지 변형이 보고되고 있다. 대표적인 것으로는 레이저 빛의 진행방향으로 회절격자를 형성하여 발진파장이 회절격자의 광학적 길이에 의해서 결정되게 하는 distributed feedback 레이저가 있다^[14].

반도체 레이저의 전류에 대한 광출력 특성은 그림 1(d)에 보인 바와 같이 주입전류가 어느 특정 값 이하이면 빛이 거의 나오지 않다가 이 값 이상이 되면 주입전류에 비례하여 광출력이 증가하게 된다. 이와 같이 광출력이 나오기 시작하는 주입전류를 발진임계전류(threshold current)라 한다. 이는 레이저가 발진하기 위해서 필요한 이득을 공급하는 전류로서 레이저의 이득이 공진기의 손실(매질의 손실과 cleaved facet에 의한 손실의 합)과 같아질 때의 주입 전류이다. 공급전류가 발진임계 전류를 넘어 서서 이득이 손실을 보상하고 나면 레이저의 이득은

더 이상 증가하지 않고 그 값으로 고정되므로 추가로 공급되는 전류는 레이저 출력으로 방출된다.

여기서는 초고속 반도체 레이저 특성을 결정하는 기본적인 성질만을 기술하였다. 반도체 레이저의 특성에 관한 보다 자세한 이론 및 구조는 참고문헌^[1-4]에 잘 기술되어 있다.

2.2 변조특성

반도체 레이저의 중요한 장점 중에 하나는 반도체 레이저를 전류로 구동할 수 있다는 것이다. 만약 우리가 전류를 빠르게 변조시키면 반도체 레이저의 출력도 이에 따라서 빠르게 변화할 것이다. 즉 전기신호를 광신호로 변화시킬 수 있다는 것이다. 따라서 반도체 레이저의 변조특성을 이해하는 것은 반도체 레이저를 광통신에 효율적으로 이용하기 위해서 매우 중요하다. 반도체 레이저의 변조특성은 레이저 공진기내에서의 광자와 전자의 상호작용을 기술하는 비율방정식에 의해서 기술된다^[1-5]. 소신호 변조특성은 그림 2에 보인 바와 같이 2차 저역필터(low pass filter)의 특성을 보이므로 감쇄정수와 공진주파수에 의해서 결정된다. 변조대역폭을 결정하는 소신호 공진주파수는 광자의 수명에 제공근에 반비례하고 반도체 레이저의 미분 이득 및 활성 영역의 광자 밀도의 제공근에 비례한다^[1-5]. 따라서 초고속 반도체 레이저를 구현하기 위해서는 반도체 레이

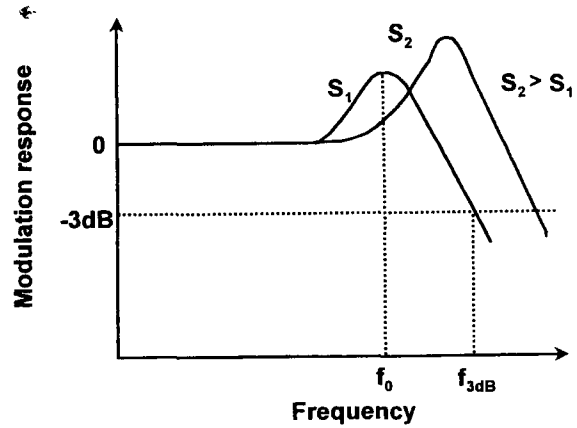


그림 2. 반도체 레이저의 소신호 변조특성으로 2차 저역필터 특성을 나타내고 활성영역의 광자밀도 S 가 증가하면 변조대역폭이 증가함을 보이고 있다.

저의 이득상수를 높이거나, 광자 수명을 줄이거나, 바이어스 전류를 높여서 광자 밀도를 높여야 한다. 이득상수를 높이기 위해서는 양자우물을 이용하거나 반도체 레이저를 저온에서 동작시켜야 한다. 양자우물을 이용하는 경우에는 양자우물의 벽(barrier layer)에서의 반송자의 이동이 변조대역폭을 제한하지 않도록 양자우물의 구조를 설정하여야 한다^[4]. 현재까지 보고된 초고속 반도체 레이저에 대한 연구결과를 표 1에 나타내었으며, 최고의 대역폭은 37 GHz이다.

표 1. 반도체 레이저 변조 대역폭에 대한 연구결과들

| Year | 3-dB(GHz) | First Author | Jornal | Vol | Page | λ | Laser Type | Country | Organization |
|------|-----------|--------------|--------|--------|------|-----------|------------|---------|--------------|
| 87 | 19 | Bowers | EL | 23 | 1263 | 1.3 | FP | USA | ATT |
| 88 | 20 | Pavlik | SPIE | 995 | 110 | 1.3 | FP | USA | Lasertron |
| 89 | 17 | Uomi | EL | 25 | 668 | 1.5 | DFB | Japan | Hitachi |
| 90 | 24 | Meland | EL | 26 | 1827 | 1.3 | FP | USA | GTE |
| 91 | 14 | Uomi | JQE | 27 | 1705 | 1.5 | MQW DFB | Japan | Hitachi |
| 92 | 17 | Hirayama | JLT | 10 | 1272 | 1.5 | MQW DFB | Japan | Toshiba |
| 92 | 18 | Nagarajan | JQE | 28 | 1990 | 1.0 | MQW FP | USA | UCSB |
| 92 | 29 | Murata | EL | 28 | 1456 | 1.5 | MQW FP | Japan | NEC |
| 93 | 17 | Lealman | EL | 29 | 1197 | 1.5 | MQW DFB | UK | BT Labs |
| 93 | 17 | Chen | PTL | 5 | 1 | 1.3 | DFB | .USA | Ortel |
| 93 | 18 | Wu | EL | 29 | 449 | 1.6 | MQW DFB | USA | UCB/Bellcore |
| 93 | 20 | Kazmierski | EL | 29 | 1290 | 1.5 | MQW DFB | France | CNET |
| 93 | 20 | Atlas | PTL | 5 | 123 | 1.3 | FP | USA | Lasertron |
| 93 | 22 | Wright | EL | 29 | 1848 | 1.5 | MQW DFB | UK | BNR |
| 93 | 22 | Lu | EL | 29 | 1369 | 1.5 | MQW DFB | Canada | BNR |
| 93 | 22.5 | Morton | EL | 29 | 1429 | 1.5 | MQW DFB | USA | ATT |
| 94 | 18 | Chen | EL | 30 | 1055 | 1.3 | DFB | USA | Ortel |
| 94 | 20 | Wang | EL | 30 | 1413 | 1.3 | MQW | USA | Lasertron |
| 94 | 25 | Morton | EL | 30 | 2044 | 1.5 | MQW DFB | USA | ATT |
| 95 | 21 | Steinhagen | EL | 31 | 274 | 1.5 | MQW DFB | Germany | THDIH |
| 95 | 37 | Weisser | LEOS | SCL1.1 | 91 | 1.1 | MQW | Germany | Fraunhofer |

표 2. 이득 스위칭과 모드록킹의 비교

| Method | Pulse width | Repetition rate | Coherence | Peak power | Jitter |
|------------------|--------------------|-----------------|-----------|------------|--------|
| Mode locking | $\sim 1/\Delta\nu$ | $> 1/\tau_s$ | Good | Low | Small |
| Gain/Q switching | $\sim 0.2\tau_r$ | $< 1/\tau_s$ | Poor* | High | Large |

$\Delta\nu$: gain bandwidth, τ_s : carrier lifetime, τ_r : relaxation oscillation period

*DFB 레이저인 경우는 coherence 특성이 개선됨

반도체 레이저의 대신호 변조특성은 소신호 변조특성과는 달리 비율방정식을 수치해석으로 풀어서 알아보는 방법이 주종을 이루고 있다. 반면에 비율방정식을 섭동방식을 이용하여 수식적으로 해석하여 반도체 레이저의 완화발진^[5], 주기 증배 및 혼돈현상의 기작을 설명하였고^[6], 최근에는 흡수 포화체를 포함한 반도체 레이저를 해석하여 자기발진 주파수 및 진폭을 해석한 결과가 보고되었다^[7].

3. 반도체 레이저를 이용한 극초단 펄스 생성

반도체 레이저를 이용하여 극초단 펄스를 생성하는 방법은 크게 2가지로 나누어진다. 첫번째는 반도체 레이저의 초고속 변조특성 및 비선형성을 이용하는 방법으로 반도체 레이저의 이득/손실을 대신호로 빠르게 변조하는 방법과 반도체 레이저를 여러 개의 종 모드로 발진 시켜서 발진 모드간의 위상을 록킹하는 모드 록킹법이 있다. 전자는 상대적으로 펄스폭은 넓으나 펄스의 최대출력이 높고, 후자는 보다 좁은 폭의 펄스를 생성할 수 있다. 표 2에 이득 스위칭과 모드 록킹에 의해 생성된 펄스의 특징을 종합 비교하였다.

3.1 이득/손실 스위칭

반도체 레이저의 이득/손실을 변조하여 짧은 광펄스를 생성하는 방법을 이득/손실 스위칭이라 하며 그 동작원리는 다음과 같이 설명할 수 있다. 반도체 레이저를 그림 3에 보인 바와 같이 폭이 좁은 구형과 전기펄스로 구동하는 경우를 생각해 보자. 전기펄스가 인가 되면 레이저의 활성층에 전자가 주입되어 활성층의 전자의 수가 증가한다. 전자의 수가 발진에 필요한 임계전자의 수를 초과하면 공진기 안의 빛의 세기는 매우 빠르게 증가한다. 빛의 세기가 증가하여 단위 시간당 유도방출에 의해서 재결합되는 전자의 수가 주입되는 전자의 수를 초과하게 되면 전자밀도가 감소하게 된다. 한편 전자 수가 발진임계 전자의 수보다 많은 동안에는 빛의 세기는 계속 증가하여 전자 수의 감소를 가속시키게 되고, 전자 수가 임계 값 이하로 떨어지며 빛의 세기도 급격하게 감소한다. 이러한 과정을 통하여 짧은 광펄스가 방출되게 된다. 만약 전기신호의 펄스폭이 넓으

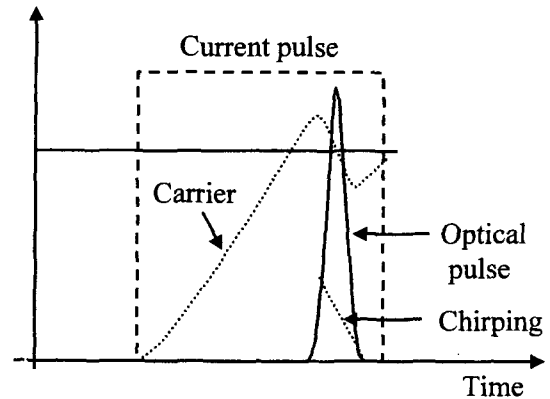


그림 3. 이득 스위칭에 의한 극초단 광펄스 생성과정.

면 다시 전자의 수가 증가하게 되어 두 번째 펄스가 나오게 되며 이러한 과정을 완화발진이라고 한다. 그러므로 단일펄스를 얻기 위해서는 전기펄스의 폭을 충분히 좁게 하여야 한다.

이러한 과정을 통해서 얻을 수 있는 펄스의 최소폭은 공진기의 왕복시간의 수 배이다. 반도체 레이저의 비율방정식을 분석하여 앞에서 설명한 이득 스위칭으로 얻을 수 있는 펄스의 최소폭이 전기펄스의 진폭에 의해서 결정되는 완화발진 주기의 0.2배 라는 것이 알려졌으며^[5], 펄스의 반복율은 완화발진 주파수보다 낮아야 한다. 그러므로 완화발진의 주기(1/공진주파수)가 100ps(공진주파수=10 GHz)되도록 전기펄스의 가하면 20ps 정도의 광펄스를 생성할 수 있다. 이 때 발진하는 종 모드는 일반적으로 다중모드이며 펄스가 생성되는 동안에 활성영역의 전자의 수가 급격하게 변화하므로 발진파장이 시간에 따라 변하는 처핑이 생기므로 펄스의 가간섭성은 매우 나쁘다. 그러나, DFB 레이저와 같이 변조시에도 단일모드로 동작하는 반도체 레이저를 사용하면 가간섭성이 좋은 단일모드 광펄스를 생성할 수 있다. 또한, 이득 스위칭시에 다중모드로 발진하는 반도체 레이저(Fabry-Perot 레이저)의 가간섭성을 높이기 위한 방법으로 펄스의 일부를 다시 레이저로 궤환 시키는 방법들이 연구되고 있다^[8].

반도체 레이저를 주기적인 대신호 정현파로 구동하는 경우도 반도체 레이저의 비선형 특성에 의해서 짧은 광펄스가 생성된다. 이 때 변조주파수는 바이어스 전류에 의해서 결정되는 완화발진주파수보다 약간 낮게 하는 것이 가장 좋으며 얻을 수 있는 최소 펄스폭은 이득 스위칭의 경우와 유사하다^[6]. 이 방

법은 정현파로 반도체 레이저를 구동하므로 구동회로와 반도체 레이저 간의 임피던스 정합이 상대적으로 용이하다.

지금까지의 설명은 이득 스위칭에 대한 것이나, 반도체 레이저 공진기 안에 고속으로 손실 변조가 매질을 삽입하고(예를 들면 반도체 포화 흡수체) 이를 고속으로 변조하면 유사한 원리에 의해서 짧은 광펄스를 생성할 수 있으며, 이는 YAG 레이저에서 사용하는 Q-switching과 같은 개념이다.

초단펄스는 반도체 레이저와 흡수형 외부변조기를 집적화하고 이를 짧은 광펄스로 변조하여 생성할 수 있다. 이 때는 반도체 레이저에는 직류 전류만 가하여 가간섭성이 아주 좋은 빛을 발생시키고 이 빛을 흡수형 변조기에 가한 짧은 전기 펄스로 변조하여 광펄스를 얻는다. 그러므로 펄스의 가간섭성이 좋고 펄스에 유기되는 치핑도 적어서(일반적으로 흡수형 변조기의 발진 선폭 증대상수는 반도체 레이저보다 적다) transform limited 펄스(펄스의 대역폭이 펄스의 fourier transform과 일치하는 펄스)에 가까운 펄스를 얻을 수 있다⁹⁾. 이러한 방법으로 얻을 수 있는 펄스폭은 이득/손실 스위칭으로 얻을 수 있는 펄스폭과 유사하다.

3.2 모드 록킹

모드 록킹은 그림 4에 보인 바와 같이 주기적인 펄스를 Fourier 변환하면 주파수 영역에서 주기적인 정현파의 합이 되는 원리를 이용하고 있다. 레이저가 다중모드로 발진하면 발진 모드간의 발진 주파수 차이는 공진기의 왕복시간의 역수이므로, 펄스간의 간격이 공진기의 왕복 시간이고, 펄스폭은 펄스간의 간격을 발진하는 모드 수로 나눈 값과 유사한 펄스열을 생성할 수 있다. 즉 공진기의 왕복시간이 1ns이고 1,000개의 모드가 발진한다면 약 1ps의 펄스열을 생성할 수 있다. 하지만

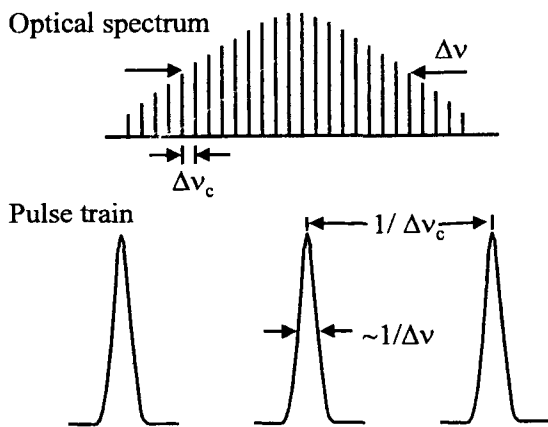


그림 4. 모드 록킹에 의한 극초단 광펄스 생성 원리를 나타낸 것으로 $\Delta\nu$ 는 이득 대역폭 $\Delta\nu_c$ 는 공진기 왕복시간의 역수이다.

대부분의 경우는 다중 모드로 발진하는 레이저의 발진 모드간의 위상이 무작위적으로 변화하므로 다중모드로 발진하는 레이저에서 항상 짧은 펄스열이 생성되는 것이 아니다. 따라서 짧은 펄스열을 생성하기 위해서는 발진하는 모드간의 위상이 일정한 관계를 갖도록 해주어야 하고, 이렇게 하는 것을 모드 록킹이라 한다. 이와 같이 모드 록킹된 펄스는 가간섭성이 좋은 정현파의 합으로 이루어져 있으므로 광펄스의 가간섭성이 좋으며, 매질의 전자수명보다 짧은 주기의 펄스열이 가능하나, 많은 모드로 발진하기 위해서는 레이저가 발진임계점 부근에서 동작하여야 하므로 펄스의 최대 출력이 낮다.

모드록킹에는 외부에서 공진기의 왕복시간의 역수에 해당하는 변조신호를 인가하는 레이저의 이득/손실을 변조하는 능동 모드록킹과 변조신호를 인가하지 않는 수동 모드록킹이 있다. 일반적으로 전자는 안정성이 좋고 지터가 적은 펄스열을 생성하나 펄스폭이 넓고(반도체 레이저의 경우 20ps 정도) 후자는 펄스열의 안정성은 떨어지나 펄스폭이 좁다(반도체 레이저의 경우 수 ps 정도). 그래서 이들의 장점만을 취합한 혼성형 모드록킹이 개발되었다.

반도체 레이저는 공진기의 길이가 300 μm 정도로 매우 짧으므로 모드 록킹을 위해서는 외부 공진기를 구성하는 것이 보통이다. 능동 모드록킹은 반도체 레이저의 장점인 직접변조 특성을 이용하여 레이저 이득을 외부공진기의 왕복시간의 역수에 해당하는 주파수로 변조하여 구현한다. 그림 5에 능동 모드록킹 실험장치의 구성도 및 출력 특성을 나타내었다. 이 때 펄스 주기는 공진기 왕복시간이다. 만약 변조신호 주파수를 공진기 왕복시간 역수의 배가 되도록 하면 펄스주기가 공진기 왕복시간보다 짧은 펄스열의 생성도 가능하다. 이러한 경우를 고조파

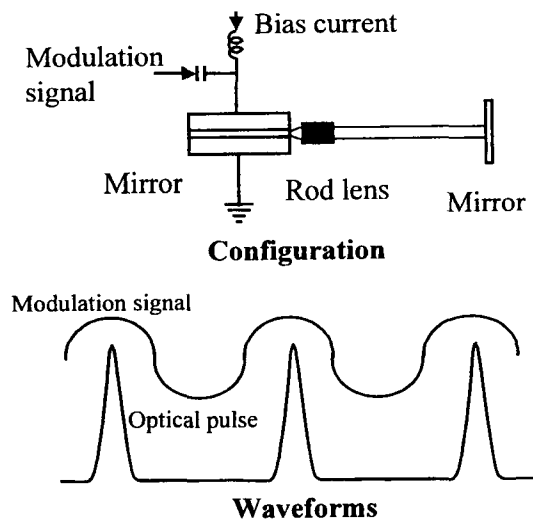


그림 5. 반도체 레이저 능동모드 록킹 장치의 구성도 및 변조전류와 출력 광펄스의 파형.

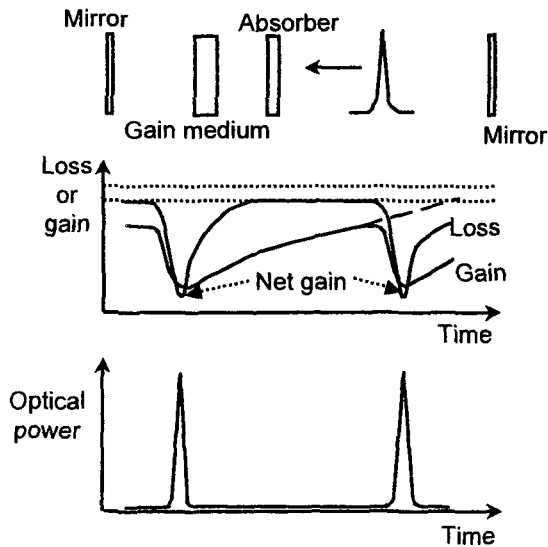


그림 6. 수동 모드록킹 장치의 구성도 및 이득, 흡수체의 흡수율, 광펄스 변화.

모드록킹이라 부른다. 외부공진기를 구성하여 반도체 레이저를 모드록킹 하는 경우에 반도체 레이저 facet의 반사율이 충분하 낮지 않으면 펄스는 단일 펄스가 아니라 공진기의 왕복주기 마다 펄스군이 방출된다. 단일 펄스열을 생성하기 위해서는 반도체 레이저 facet의 반사율이 10^{-4} 이하로 되어야 한다^[4,10].

수동 및 혼성형 모드록킹을 위해서는 입사광의 세기가 증가하면 흡수율이 감소하는 포화 흡수체가 필요하다. 수동 모드록킹 조건을 만족하는 포화 흡수체의 흡수완화시간은 이득의 이득완화시간보다 짧아야 하고, 흡수체의 흡수계수가 이득의 이득계수보다 커야 한다^[11]. 즉, 흡수 포화체가 이득보다 빨리 포화되고 빨리 회복되면 그림 6에 보인 바와 같이 이득을 갖는 좁은 시간영역이 형성되어 극초단 펄스를 생성할 수 있다. 이러한 조건을 만족하는 포화 흡수체를 구현하기 위해서 다 전극 구조 반도체 레이저, 반도체 레이저의 거울면을 양성자(proton)로 때리는 방법들이 제안되었다^[12]. 반도체 레이저 광증폭기와 다중 양자우물 포화흡수체를 이용한 혼성형 모드록킹으로 5ps의 광펄스를 생성하고 이를 압축하여 560fs의 대출력 광펄스를 생성한 결과가 보고되었다^[13]. 또, 포화 흡수체를 갖는 양자우물 반도체 레이저를 모드록킹하여 ps의 광펄스를 생성한 결과들이 보고되었다^[14-16].

외부공진기를 사용하지 않고 반도체 레이저를 모드 록킹하여 반복율이 100 GHz 이상인 광펄스를 얻으려는 시도도 행해지고 있다. 이 때는 능동 모드록킹이 어려우므로 주로 반도체 레이저 공진기내에 흡수 포화체를 직접화하여 수동 모드록킹을 하고 있으며, 흡수 포화체의 위치를 조정하여 펄스가 흡수 포화체에서 충돌되게 하여 펄스폭을 줄이는 colliding pulse

mode locking 방법도 이용되고 있다. 이러한 방법의 모드록킹에서는 반도체 레이저의 이득매질에서의 분산등의 영향에 의해서 발진에 기여하는 모드 수는 적으나, 펄스폭은 ps 정도이며, 펄스의 반복율은 375 GHz인 결과가 보고되었다^[17].

3.3 펄스 압축

반도체 레이저를 이용하여 극초단 펄스 생성시에 펄스가 방출되면서 그림 3에 보인 바와 같이 활성영역의 전자 수가 급격하게 감소된다. 전자수가 감소하면 그림 1(c)에 보인 바와 같이 활성영역의 굴절율이 증가하므로 출력펄스에는 음의 처핑(시간영역에서 펄스의 앞부분에서 뒷부분으로 가면서 발진 주파수가 감소하는 처핑)이 생긴다. 이와 같이 펄스에 처핑이 유기되면 펄스가 갖는 주파수 성분이 증가하므로 펄스의 스펙트럼 폭이 처핑이 없는 펄스보다 넓어지게 된다. 이는 다음에 설명하는 바와 같이 초고속 장거리 광통신에 직접변조 광송신기를 사용할 수 없는 원인이 된다. 이러한 펄스를 주파수가 높은 성분이 늦게 진행되는 매질을 통과시켜 펄스폭을 감소시킬 수 있는 가능성을 시사한다.

단일모드 광섬유를 진행하는 펄스의 중심파장이 광섬유의 영분산 파장보다 긴 경우(이상분산영역)는 높은 주파수 성분이 낮은 주파수 성분보다 빨리 진행하고, 그 반대의 경우(정상분산영역)는 낮은 주파수 성분이 빨리 진행한다. 따라서, 처핑이 된 펄스의 파장이 광섬유의 영분산 파장보다 짧은 경우는 광섬유를 이용하여 펄스를 압축시킬 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 이득 스위칭으로 얻은 20ps 펄스를 광섬유를 통과시켜(정상분산영역) 3.6ps로 압축하였으며^[18]. 흡수형 외부변조기에서 유기된 처핑이 있는 15ps 펄스를 chirped fiber grating로 구성된 분산 매질을 통과시켜 5ps로 압축하였다^[19]. 분산매질을 구현하는 방법은 이외에도 회절격자쌍을 이용하는 방법과 프리즘 쌍을 이용하는 방법이 있다^[4].

반도체 레이저에서 생성된 펄스를 압축할 수 있는 다른 방법으로는 광섬유의 비선형 현상을 이용하는 것이다. 펄스의 중심파장이 광섬유의 영분산 파장보다 긴 쪽에 있고 펄스의 출력이 충분히 크면 광섬유의 비선형 현상에 의해서 레이저의 경우와는 반대 방향인 양의 처핑(시간영역에서 펄스의 앞부분에서 뒷부분으로 가면서 발진 주파수가 감소하는 처핑)이 유기되기 때문에 광섬유의 색분산(낮은 주파수 성분이 늦게 진행)에 의해서 펄스가 압축된다. 이 때 펄스는 고차 솔리톤 펄스가 되므로 이러한 방법을 솔리톤 펄스 압축이라고도 한다^[20]. 이 방법을 이용하여 이득 스위칭으로 얻은 27ps 펄스를 185fs 펄스로 압축한 결과가 보고되었다^[21].

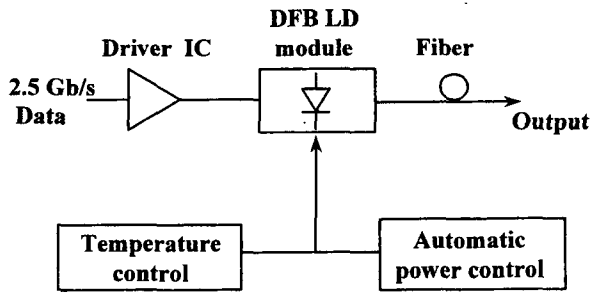


그림 7. 반도체 레이저 직접변조 방식의 광송신기의 구성도.

4. 초고속 반도체 레이저의 응용

4.1 초고속 광통신

a) 디지털 광통신

반도체 레이저의 초고속 변조특성을 응용하는 대표적인 분야로는 디지털 광통신을 들 수 있다. 현재 상용화 된 2.5Gb/s 광통신 시스템의 광송신기는 그림 7과 같이 DFB 레이저를 직접 변조하여 전기 신호를 광신호로 변환하고 있다. 이러한 시스템의 전송거리는 반도체 레이저 직접 변조에 유기되는 처핑에 의해서 제한된다. 따라서 반도체 레이저 직접변조 방식은 전송거리 80 km 미만의 광통신 시스템에서 사용되고 있으며, 전송거리가 80 km 이상인 장거리 광통신 시스템이나 10Gb/s 광통신 시스템에서는 처핑이 자주 적은 DFB 레이저를 이용하거나, 흡수형 외부변조기가 집적화된 DFB 레이저를 이용한다^[22].

10Gb/s 이상의 초고속 광통신에 반도체 레이저 직접변조 방식을 적용하려는 시도가 표 3에 보인 바와 같이 시도된 적이 있으나, 처핑에 의한 전송거리의 제한이 매우 심각하여 10 km 미만의 단거리 전송에만 적용이 가능하다. 그림 8은 직접변조 방식의 10Gb/s 광신호를 단일모드 광섬유에 전송한 결과로 전송거리가 10 km 정도라는 것을 알 수 있다. 전송거리가 10 km

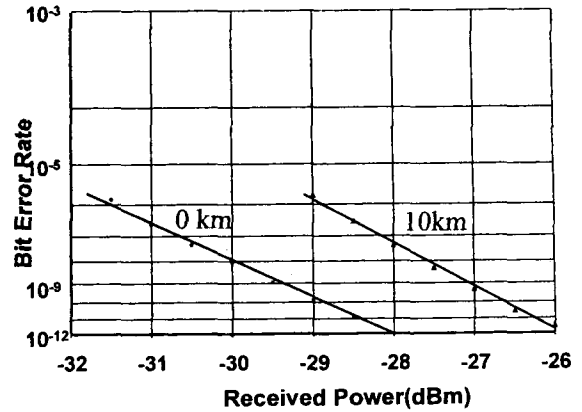


그림 8. 직접 변조된 10Gb/s 광신호의 단일모드 광섬유 전송 결과로 10 km 전송 후에 2.5dB 페널티가 생겼다. 광통신 시스템은 통상 페널티가 2dB 이하인 영역에서 동작하여야 한다.

이상이 되면 처핑에 의해 펄스폭이 증가하여 동일한 에너지를 얻는데 요구되는 수신신호의 세기가 대폭 증가한다. 만약 처핑이 없는 외부변조기를 사용하면 60 km까지 전송이 가능하다. 따라서 10Gb/s 이상의 초고속 신호를 60 km 이상 장거리 전송하기 위해서는 광섬유의 색분산을 보상하여야 한다^[23].

b) 솔리톤 광통신

제 3장에서 설명한 바와 같이 이득/손실 스위칭을 이용하거나, 모드록킹을 이용하여 생성한 극초단 광펄스의 응용분야 중의 하나로 솔리톤 광통신을 들 수 있다. 솔리톤은 광섬유의 색분산에 의한 펄스폭의 확산과 앞에서 설명한 바와 같은 비선형성에 의한 펄스폭의 압축(비선형성인 자기위상변조에 의해 처핑이 펄스가 압축되는 방향으로 유기됨)이 평행을 이루어 펄스폭이 변하지 않고 광섬유를 진행할 수 있는 고유의 펄스를 말한다^[20]. 솔리톤 펄스는 sech^2 형태이며, 펄스에 처핑이 없어야 하므로 DFB 레이저를 이득 스위칭 하거나 흡수형 외부변조기를 이용하여 펄스를 생성하고 이를 압축하여 처핑을 제거한 펄

표 3. 직접변조 방식의 초고속 광전송 실험결과

| 전송속도 | 전송거리 | Chirping | 광증폭기 | 기 관 | 비 고 |
|--------|--------|--|------------------------------|------------------------------|--|
| 10Gb/s | 140Km | 0.4nm at -20dB | a booster and a preamp. EDFA | Hitachi ECOC '91, H. Nakano | Sensitivity - 26.5dBm |
| 10Gb/s | 20Km | 0.52nm at -20dB | no EDFA | Toshiba ECOC '91 H. Yamakawa | Sensitivity - 17 dBm |
| 11Gb/s | 81Km | | no EDFA | Bellcore EL '89 J.L. Gimlett | Sensitivity - 19.8dBm |
| 10Gb/s | 50km | strained MQW DFB laser 0.35nm at -20dB | no amplifier | NTT EL '91 Y. Miyamoto | Sensitivity - 23dBm (APD) DSF, 1.3um |
| 16Gb/s | 64.5km | 35dB SMSR | SL preamp. | AT&T EL '89 A.H. Gnaouk | pin-FET receiver 1.3um with normal fiber |

스^[9], 혹은 모드 록킹된 펄스가 이용되고 있다^[20].

c) 아날로그 광통신

초고속 반도체 레이저의 아날로그 광통신은 마이크로파 광링크나 부반송파 다중화(subcarrier multiplexing) 방식을 이용한 광 CATV 분배에 많이 응용되고 있다. 이러한 용도로 사용하는 반도체 레이저는 아주 높은 선형특성이 요구되므로 이를 만족하기 위한 반도체 레이저의 구조에 대한 연구가 진행되고 있다^[2].

4.2 전광 시분할 다중/역다중

시간분할 다중 광통신에서 전자회로의 속도 제한에 의한 한계를 극복하기 위해서 짧은 광펄스를 사용하여 주어진 시간을 촘촘히 분할하는 전광다중방식이 있다. 이를 위한 극초단 광펄스 광원으로 소형이고 효율이 좋은 극초단 반도체 레이저가 많이 연구되고 있다^[24]. 전광 시분할 다중화된 광신호는 광섬유의 색분산에 영향을 매우 크게 받으므로 장거리 전송이 어렵다. 따라서 장거리 전송을 위해서는 전광 3R(Regeneration, Reshaping, Retiming) 광증계기를 구현하여야 한다^[25]. 전광 3R 증계기는 그림 8에 보인 바와 같이 입력 데이터의 정형(reshaping)시에 필요한 동기화 펄스를 생성하는 클럭 재생부, 입력파장을 재생된 클럭 파장으로 변환 하는 파장변환부, 그리고 파형 정형부로 구성된다. 이 실험에서는 클럭 재생에는 반도체 레이저 모드 록킹을 이용하였고, 파장변환에는 반도체 레이저 광증폭기를, 그리고 파형 정형에는 쌍안정 특성을 갖는 반도체 레이저를 이용하여 모든 소자를 반도체화 하였으며, 그림 8(b)에 보인 바와 같이 신호대 잡음비가 나쁜 5Gb/s 데이터를 3R 재생하여 신호 대 잡음비를 대폭 개선하였다. 전광통신에서 동기화를 위한 전광 클럭 재생기로는 앞에서 보인 모드 록킹 반도체 레이저를 이용하는 것 이외에도 자기발진 하는 반도체 레이저^[26]를 이용하여 구현하려는 연구도 활발히 진행되고 있다.

5. 결 론

지금까지 초고속 반도체 레이저의 동작원리와 광통신에의 응용을 알아 보았다. 반도체 레이저의 성능 향상과 광통신의 발전은 매우 밀접한 관계가 있었으며, 앞으로도 반도체 레이저의 발전은 광통신의 새로운 가능성을 열어 줄 것으로 기대된다. 또한, 반도체 레이저의 초고속화는 초고주파 발생 및 신호처리, 초고속 현상의 측정 등 전자소자의 속도한계를 벗어나야

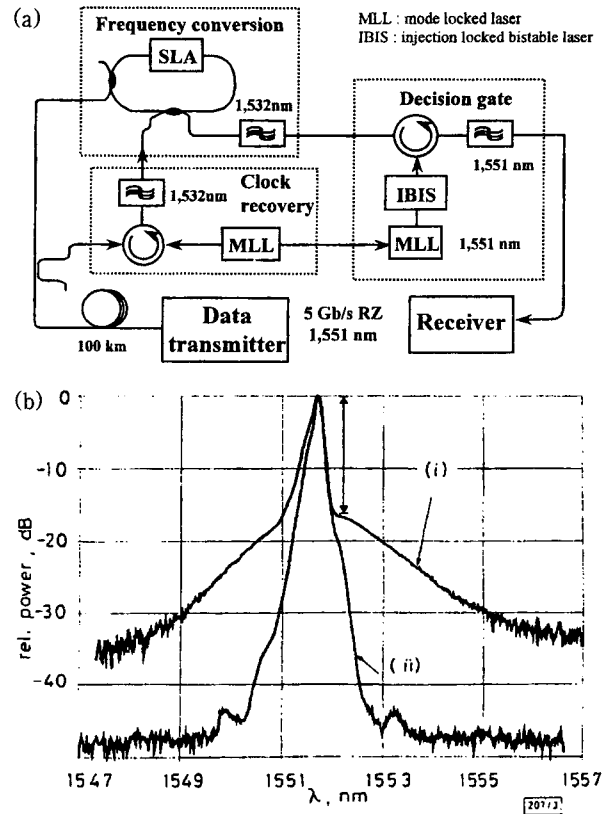


그림 9. (a) 반도체 소자만을 이용한 전광 3R 증계기의 구성도, (b) 전광 3R 증계기로 신호대 잡음비가 나쁜 입력 광신호 (i)의 신호대 잡음비를 개선한 결과(ii).

되는 분야에 반도체 레이저의 응용을 가속화 할 것이다^[4].

반도체 레이저의 변조 대역폭을 높이는 연구는 앞으로 계속 될 것이며, 30GHz 이상의 대역폭을 갖는 반도체 레이저에 대한 연구 결과가 보다 많아질 것이다. 반도체 레이저의 대역폭을 높이는 것과 병행하여 반도체 레이저의 처핑을 줄이는 연구는 반도체 레이저의 장거리 전송에의 응용을 위해서 매우 중요하다.

반도체 레이저를 이용한 극초단 펄스 생성에 대한 연구는 크게 펄스의 반복율을 높이는 연구, 펄스의 처핑을 줄이는 연구, 펄스폭을 줄이는 연구, 펄스의 출력력을 높이는 연구, 그리고 펄스 생성시에 유기되는 timing jitter를 줄이는 연구 등으로 나눌 수 있다. 펄스의 반복율은 375GHz^[17]를 구현하였으므로 충분히 빠르다고 할 수 있으나, 지금까지 펄스 압축 없이 반도체 레이저로부터 직접 얻은 펄스 폭은 약 600fs^[27]로 이론적인 한계치인 50fs에는 크게 미치지 못한다. 그러므로 펄스폭을 줄이는 것에 대한 도전은 의미 있는 일이라 하겠다.

반도체 레이저에서 생성된 펄스의 펄스폭을 줄이면서 처핑을 동시에 줄이기 위해서 제 3장에서 설명한 펄스 압축법 이외에도 새로운 펄스 압축법이 개발될 것으로 예측된다. 펄스의

출력을 높이기 위해서는 반도체 레이저 광증폭기나 erbium-doped fiber amplifier 등이 이용되고 있으며, 펄스의 timing jitter를 줄이는 연구도 필요하다. 또한 파장분할 다중화 광통신에의 응용을 위한 파장 가변 반도체 레이저와 파장가변 극초단 광펄스 생성에 대한 연구도 중요한 분야이다.

참고문헌

- H. Kressel and J. K. Bulter, *Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs*, New York: Academic Press, 1997.
- G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- K. Petermann, *Laser Diode Modulation and Noise*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- P. Vasil'ev, *Ultrafast Diode Lasers: Fundamentals and Applications*, Boston: Artech House, 1995.
- Chang-Hee Lee and Sang-Yung Shin, "Transformation of rate equations and approximate transient solutions for semiconductor lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, pp. 878-884, 1989.
- Tae-Hoon Yoon, Chang-Hee Lee, and Sang-Yung Shin, "Perturbation analysis of bistability and period doubling bifurcations in directly modulated laser diodes", *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, pp. 1993-2000, 1989.
- Chang-Hee Lee, Sang-Yung Shin, and Seung-Goo Kang, "Perturbation solution of self-pulsing in semiconductor lasers with a saturable absorber", *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, no. 6, pp. 1396-1404, 1994.
- D. Huhse, M. Shell, J. Kaessner, D. Bimberg, I. S. Tarasov, A. V. Gorbachov, and D. Z. Garbuzov, "Generation of electrically wavelength tunable(Dl= 40 nm) single mode laser pulses from 1.3mm Fabry-Perot laser by self-seeding in a fiber-optic configuration", *Electron. Lett.*, **30**, pp. 157-158, 1994.
- G. Aubin, E. Jeanney, T. Montalant, J. Moulu, F. Pirio, J.-B. Thomine, F. Devaux, and N. Souli, "Record 20-gigabit-per-second 200-km repeater span transoceanic soliton transmission using in-line remote pumping", *Photonics Tech. Lett.*, **8**, pp. 1267-1269, 1996.
- J. E. Bowers, P. A. Morton, A. Mar, and S. W. Carzine, "Actively mode-locked semiconductor lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, pp. 1426-1438, 1989.
- H. A. Haus, "Theory of mode locking with a slow saturable absorber", *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-11, pp. 736-746, 1975.
- 이창희, 정태형, "극초단 펄스의 새로운 생성법과 그 응용", *전자공학회지*, **17**, pp. 488-500, 1990.
- P. J. Delfyett, C.-H. Lee, L. T. Florez, N. G. Stoffel, T. J. Gmitter, and N. C. Andreadakis, G. A. Alphonse, and J. C. Connolly, "High peak power picosecond pulse generation from AlGaAs external cavity mode-locked semiconductor laser and traveling-wave amplifier", *Opt. Lett.*, **15**, pp. 1371-1373, 1990.
- S. Sanders and A. Yariv, "Passive mode locking of a two-section multiple quantum well laser at harmonics of cavity round-trip frequency", *Appl. Phys. Lett.*, **58**, pp. 681-683, 1991.
- M. C. Wu, Y. K. Chen, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan, M. A. Chin, and G. Raybon, "Tranfrom-limited 1.4 ps optical pulses from a monolithic colliding-pulse mode-locked quantum well laser", *Appl. Phys. Lett.*, **57**, pp. 759-761, 1990.
- S. Sanders, L. Eng, J. Paslaski, and A. Yariv, "108 GHz passive mode locking of a multiple quantum well semiconductor laser with an intracavity absorber", *Appl. Phys. Lett.*, **56**, pp. 310-312, 1990.
- J. F. Martins-Filho, E. A. Avrutin, C. N. Ironside, and J. S. Roberts, "Monolithic multiple colliding pulse mode-locked quantum-well lasers: experiment and theory", *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **1**, pp. 539-551, 1995.
- K. A. Ahmed, H. F. Liu, N. Onodera, P. Lee, R. S. Tucker and Y. Ogawa, "Nearly transform-limited pulse(3.6 ps) generation from gain-switched 1.55 μm distributed feedback laser by using fiber compression technique", *Electron. Lett.*, **29**, pp. 54-56, 1993.
- M. J. Guy, S. V. Chernikov, J. R. Taylor, D. G. Moodie, and R. Kashyap, "Generation of transform-limited optical pulses at 10 GHz using an electroabsorption modulator and a chirped fiber Bragg grating", *Electron. Lett.*, **29**, pp. 1713-1714, 1993.
- G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, New York: Academic Press, 1995.
- K. A. Ahmed, H. H. Y. Cheng, and H. F. Liu, "Generation of 185 fs pedestal-free pulses using 1.55 μm distributed feedback semiconductor laser", *Electron. Lett.*, **31**, pp. 195-196, 1995.
- K. Morito, R. Sahara, K. Sato, and Y. Kotaki, "Penalty-free 10 Gb/s NRZ transmission over 100 km of standard fiber at 1.55 μm with a blue-chirp modulator integrated DFB laser", *Photonics Tech. Lett.*, **8**, pp. 431-433, 1996.
- 이창희, "초고속 광통신을 위한 색분산 보상법", *전자통신연구소 주간기술동향*, 1995.7
- M. Saruwatari and T. Morioka, "All-optical signal processing for ultrahigh-speed optical transmission", *Digest of 1st Optoelectronics and Comm. Conf.*, July 16-19, Chiba, Japan, pp. 338-339, 1996.
- W. Pieper, K. Weich, R. Ludwig, E. Patzak, and H.G. Weber, "All-optical polarization and wavelength independent 3R signal regenerator", *Electron. Lett.*, **32**, pp. 1316-1318, 1996.
- U. Feiste, D. J. As, and A. Ehrhardt, "18GHz all-optical frequency locking and clock recovery using a self-pulsing two-section DFB-laser", *Photonics Tech. Lett.*, **6**, pp. 106-108, 1994.
- J. P. Van der Ziel, W. T. Tsang, R. A. Logan, R. M. Mikulyak, and W. M. Augustyniak, "Subpicosecond pulses from passively mode-locked GaAs buried optical guided semiconductor lasers", *Appl. Phys. Lett.*, **39**, pp. 525-527, 1981.