

## 요약

근래에 들어와 초단 광펄스 생성 기술이 발전되어 다양한 초고속 현상 및 물질 분석 연구에 활용되고 있으며, 통신 및 신호처리에 대한 응용 기술에 대해서도 연구되고 있다. 특히 대용량 광통신 기술로는 이미 기술적인 성숙도를 보인 파장분할다중 (WDM) 기술과 더불어 전기적 신호를 다중화하여 광신호로 변환하여 통신하는 전기적 시간분할다중 (ETDM) 기술이 있으며, 초단 광펄스를 이용하는 40 Gbps 급 이상의 고속 광시간분할다중 (OTDM) 광통신 기술도 연구되고 있다. 이 OTDM 기술에 있어서는 초단 광펄스 생성 기술과 고속 광신호 다중화 및 역다중화 기술, 광동기신호 재생 기술 등이 주요 핵심 기술을 이루고 있다. 본 글에서는 근래에 들어와 활발히 연구되고 있는 광통신용 펄스초

은 근본적으로 병렬 신호처리 개념을 이용하는 반면에 TDM 기술은 고속 직렬 신호처리 개념을 이용하고 있다. 그림 1에서 보여지는 바와 같이 WDM 기술은 여러 신호 채널에 대해 각기 다른 파장을 할당하여 신호들을 하나로 묶어 (다중화하여) 전송을 하거나 처리를 하는 기술이다. 한편 TDM 기술은 채널당 낮은 속도의 여러 채널 신호들을 시간축 상에서 차례로 나열하여 하나의 고속 채널로 만들어 전송을 하거나 처리를 하는 기술이다. 이 TDM 기술에서는 시간축 상에서 많은 신호를 담기 위해서는 신호 펄스의 폭이 짧아야 하며, 이를 위해 초단 광신호 생성 기술과 더불어 초단 광펄스 변조 기술들에 대한 연구가 이루어지고 있다.

WDM 기술을 이용한 대용량 WDM 광전송 기술은 이미 상당히 성숙되어 수십에서 수백 채널까지 다중화하여 전송하는 기술이 실험실에서 구현됨과 더불어 일부 실용화도 이

# 특집 ┃ 펄스 과학 ┃

## 초단 광펄스와 광통신 및 광 신호처리

김경현\*

급 초단 광펄스 생성 기술과 이를 이용한 40 Gbps급 이상의 고속 광시간분할다중 (OTDM) 광전송 및 광신호처리에 관련된 기술 현황을 살펴보고자 한다.

### 1. 서론

근래에 들어와 인터넷을 통한 데이터 통신 용량의 증가로 대용량 광통신 및 광신호처리 기술의 필요성이 급격히 증가하고 있으며, 이러한 대용량 광통신 기술로서 파장분할다중 (WDM: wavelength-division-multiplexing) 기술과 더불어 고속 시간분할다중 (TDM: time-division-multiplexing) 기술에 대한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. 빛이 가지는 고유의 물리적 특적인 파장과 시간적 특성을 이용하는 것이 WDM 및 TDM 기술인데, WDM 기술

루어지고 있다. WDM 광전송 기술로 이미 약 1 Tbps급 기술은 상용화 수준에 있으며, 10 Tbps급 용량을 전송하는 기술은 실험실 차원에서 구현된 바 있다.<sup>[1]</sup>

TDM 기술을 이용한 광전송 기술에서는 저속의 전기적 신호를 고속 신호로 다중화한 뒤 광신호로 변환하여 전송하는 전기적 시간분할다중 (ETDM: electrical TDM) 전송 기술과 초단 펄스 광신호를 고속 채널로 다중화하여 전송하는 광시간분할다중 (OTDM: optical TDM) 전송 기술이 있다. ETDM 광전송 기술로 10 Gbps급 기술은 이미 범용화가 이루어진 반면에 채널당 40 Gb/s급 기술은 현재 실용화를 목전에 두고 있다. OTDM 광전송 기술은 200 fs 광펄스를 이용하여 1.28 Tbps급 70 km 전송을 실험실 차원에서 구현한 바 있다.<sup>[2]</sup>

WDM 광전송 기술에서는 WDM 채널 광원으로 여러 파장대의 파장 안정화된 좁은 선폭의 레이저 광원이 필요하

\* 한국전자통신연구원 원천기술연구소 광통신소자연구부

고, 파장 다중 및 역다중 필터, 비선형 광학 효과 제어 기술, 이득 평탄화 광 증폭기 기술들이 필요하다. 반면에 ETDM 기술에서는 파장 안정화된 좁은 선폭의 레이저 광원과 더불어 고속 광변조기, 고속 광 검출기, 고속 전자 소자, 색분산 보상 기술, 편광분산 제어 기술 등이 필요하다. 고속 OTDM 광 전송 기술에서는 초단 광펄스 생성 기술, 고속 광신호 다중화 및 역다중화 기술, 광동기신호 재생 기술, 고차 색분산 보상 기술, 편광분산 제어 기술 등이 필요하다.

대용량 광전송 용량을 얻기 위해서는 위에 열거된 세가지 방식의 전송 기술이 이용될 수 있으나, 현재로서는 기존의 40 Gbps급 이하의 ETDM 채널들을 WDM 다중화한 방식이 가장 실용성이 있는 기술 대안으로 인식되고 있다. 그러나 근래에 들어와 초단 광펄스를 이용한 OTDM 광전송 기술에 대한 연구도 진행이 되고 있어, 본 글에서는 광통신용 펨토초 급 초단 광펄스 생성 기술과 이를 이용한 고속 광시

간분할다중 (OTDM) 광전송 및 광신호처리에 관련된 기술 현황을 살펴 보고자 한다.

제 2절에서는 초단 광펄스의 물리적 특성과 펨토초 펄스 생성 기술을 살펴보고, 제 3절에서는 광통신 및 광신호처리 에의 응용 기술에 대해서 검토하기로 한다.

## 2. 광통신용 초단 광펄스 생성 기술

### 2.1 초단 광펄스가 갖는 물리적 특성

광펄스의 시간적 특성과 주파수(파장) 특성은 푸리에 변환 (Fourier transform)에 의해 상호 연관되어 있으며, 펄스의 시간폭  $\tau$ 는 선폭  $\Delta\omega$ 과 다음과 같이 관계되어 있다.<sup>[3]</sup>

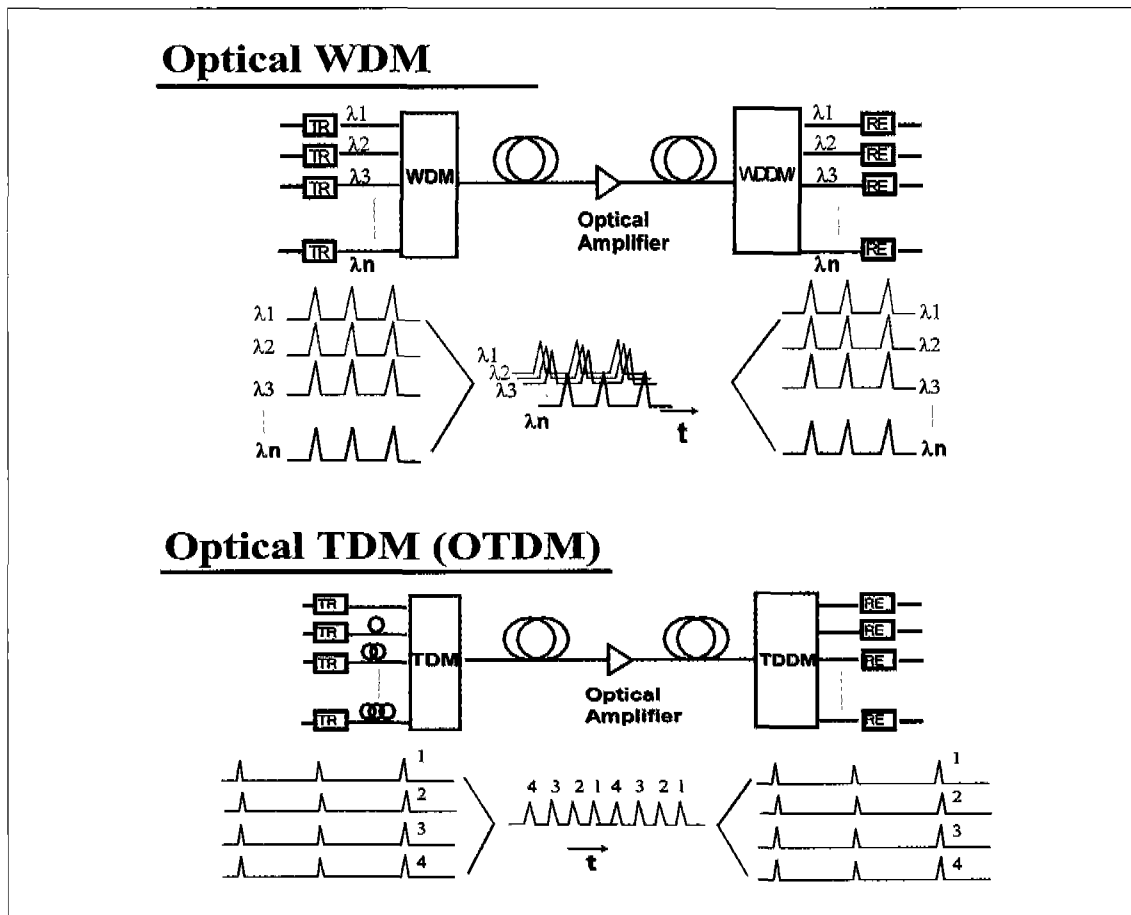


그림 1. WDM 광전송 구조와 OTDM 광전송 구조

## 초단 광펄스와 광통신 및 광 신호처리

$$\tau \cdot \Delta\omega = 2\pi\tau \cdot \Delta\nu \geq 2\pi M \quad (1)$$

여기에서  $M$  은 펄스 모양에 따른 1차 상수값을 나타내며, 표 1의 값으로 나타내어진다. 상기 식 (1)에서 등식이 성립하는 경우는 변환 제한된 (transform-limited) 펄스일 경우를 나타낸다.

일반적으로 OTDM 광통신에 쓰이는 모드록킹된 레이저의 광 펄스 형태는 주로 hyperbolic sech 펄스 형태를 하게되므로, 1.55  $\mu\text{m}$  파장의 광통신 파장대 광펄스의 주요 시간폭  $\tau$  에 대한 주파수 선평  $\Delta\nu$  ( $=\Delta\omega/2\pi$ ) 및 파장 선평  $\Delta\lambda$  ( $=\lambda^2 \cdot \Delta\nu/c$ ,  $c$ 는 빛의 속도)은 표 2와 같이 주어진다.

[표 2]에서 보여지는 바와 같이 펄스의 시간폭이 약 100 fs인 광펄스는 파장 선평이 25.2 nm 이상이 되므로, 이 펄스를 이용하여 광전송을 하게 되면 기존의 어븀 첨가 광섬유 증폭기의 C-밴드대 증폭대역인 30 nm 대역에서는 단지한 채널 이상의 전송이 불가능하다는 것을 알 수 있다. 아울러 이러한 초단 광펄스가 갖는 넓은 파장 선평으로 말미암아 광전송시 매질이 갖는 색분산 효과에 의해 광신호의 왜곡 현상이 심각하게 나타나 장거리 전송에 많은 제약이 따르게 된다.

### 2.2 광통신 및 광신호처리용 초단 광펄스 생성 광원

초단 광펄스 생성 기술로는 벌크 레이저를 이용하는 방법

과 더불어 여러 가지 방법이 있으나, 광통신 및 광신호처리 시스템에 사용될 광원으로는 간단하고 안정화된 광원으로 충분히 짧은 시간 폭과 강한 광 출력, 높은 반복률, 낮은 시간 요동 (timing jitter)을 가진 광펄스를 생성할 수 있어야 한다. 이러한 광원으로 크게 다이오드 레이저 펌프를 이용한 모드록킹된 고체 레이저와 모드록킹된 광섬유 레이저, 모드록킹 혹은 이득 스위치된 레이저 다이오드 등에 대한 연구가 이루어지고 있으나, 현재 광전송 기술에 가장 많이 쓰이는 기술로는 모드록킹된 광섬유 레이저 기술이며 향후 초단 광펄스 생성용 레이저 다이오드 기술의 대두가 기대되고 있다.

#### □ 모드록킹된 광섬유 레이저

광섬유 레이저를 모드록킹하는 방법에는 수동형 모드록킹과 능동형 모드록킹이 있으나, 광통신에 있어서 신호의 동기화를 위해서는 능동형 모드록킹된 펄스 광원이 필요하다. 그림 2에서는 근래에 초고속 OTDM 광전송 기술에 사용되고 있는 광섬유형 펄드초 발생 광원의 한 실시 예를 보여주고 있으며, 크게 능동형 모드록킹된 광섬유 레이저 부분과 펄스 수축 부분, 스펙트럼 필터링 부분으로 이루어져 있다.<sup>[4]</sup> 광섬유 레이저에서는 주로 어븀 첨가된 실리카 광섬유가 주요 이득 매질로 사용되고 있으며, 능동형 광 모드록커로 그림 2에서는 LiNbO<sub>3</sub> 광변조기가 사용되고 있다.

광섬유로 구성되는 긴 레이저 공진기로 말미암아 광섬유 레이저는 외부 진동이나 온도 변화에 민감하여 불안정한 특

표 1. 광 펄스 형태에 따른 시간폭( $\tau$ )과 선평( $\Delta\omega$ ) 관계 (3)

펄스 형태	광세기의 시간 분포	광펄스의 시간폭 ( $\tau$ )	광세기의 주파수(파장) 분포	광펄스의 선평 ( $\Delta\omega$ )	시간폭 및 선평 곱의 상수 (M)
Gaussian	$\exp[-2(t/\tau_g)^2]$	$1.177 \tau_g$	$\exp(-(\omega\tau_g)^2/2)$	$2.355 / \tau_g$	0.441
Hyperbolic sech	$\text{sech}^2(t/\tau_s)$	$1.763 \tau_s$	$\text{sech}^2(\pi\omega\tau_s/2)$	$1.122 / \tau_s$	0.315
Lorentzian	$(1 + (t/\tau_l)^2)^{-2}$	$1.287 \tau_l$	$\exp(-2 \omega \tau_l)$	$0.693 / \tau_l$	0.142
Asym. sech	$(\exp(t/\tau_a) + \exp(-3t/\tau_a))^{-2}$	$1.043 \tau_a$	$\text{sech}(\pi\omega\tau_a/2)$	$1.677 / \tau_a$	0.278
Rectangular	1 for $ t/\tau_r  \leq 1$ , 0 else	$\tau_r$	$\text{sinc}^2(\omega\tau_r)$	$2.78 / \tau_r$	0.443

표 2. Hyperbolic sech 펄스 형태에 따른 광펄스의 시간폭( $\tau$ )과 선평( $\Delta\nu$ ,  $\Delta\lambda$ ) 관계

시간폭 $\tau$	주파수 선평 $\Delta\nu$	파장 선평 $\Delta\lambda$ (@1.55 $\mu\text{m}$ )
10 fs	31.5 THz	252.1 nm
100 fs	3.15 THz	25.2 nm
1 ps	315 GHz	2.52 nm
10 ps	31.5 GHz	0.252 nm

성을 보이지만, 그림 2에서와 같이 고속 광검출기와 높은 Q 값의 필터로 된 동기 신호 재생회로와 광변조기 구동 신호의 위상 조절을 가능케 하는 전자식 피드백 구조로 안정된 모드록킹된 (즉 regeneratively mode-locked) 광 펄스를 얻을 수 있다. 편광에 의한 불안정성을 최소화하기 위해 편광 유지 어블 첨가 광섬유와 편광유지 분산 천이 광섬유 (PM DSF: polarization-maintaining dispersion-shifted fiber), 편광 무의존 광 아이소레이터, LiNbO<sub>3</sub> 광변조기, 선폭이 2.5 nm 인 광필터를 이용하였다. 10 GHz급 이상의 높은 광펄스 반복률을 얻기 위해서 광 변조기 구동 주파수는 레이저 공진기 모드의 정수배가 되도록 하고 상기에 기술된

동기 신호재생에 의한 전자식 피드백 구조로 레이저 발진을 안정화시킨다. 이 광섬유 레이저 구조에서 편광유지 분산 천이 광섬유가 없을 때에는 7.0 ps 펄스 폭을 가진 펄스가 얻어지고, 이 광섬유를 포함한 구조에서는 2.7 ps 펄스 폭을 가진 10 GHz급 모드록킹된 광펄스가 얻어진 것으로 보고되고 있다.

전반적으로 모드록킹된 광섬유 레이저 자체로만은 피코초 (ps: 10<sup>-12</sup>)급 이하의 광펄스를 얻기가 힘들기 때문에 대부분 펄스 수축 구도가 추가되어야만 펨토초 (fs: 10<sup>-15</sup>)급 광펄스 생성이 가능하다. 그림 2에서는 고휘력 어블첨가 광섬유 증폭기와 2차 및 3차 색분산값이 없는 분산 평형

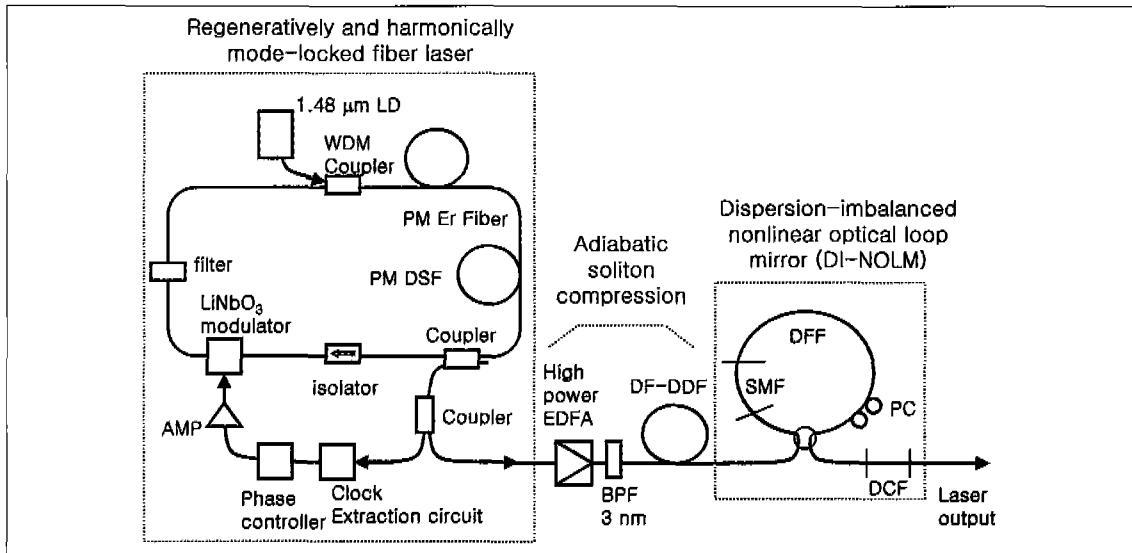


그림 2. OTDM 광전송을 위한 펨토초 발생용 광섬유 레이저 및 펄스 다듬기 (pulse shaping) 구조 (4). (DCF : dispersion compensation fiber)

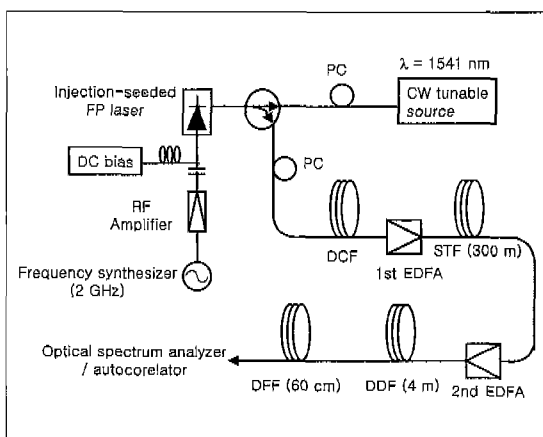


그림 3. 이득 스위처된 레이저 다이오드 펄스를 4단계 솔리톤 펄스 수축 과정으로 펨토초 펄스를 생성하는 구조 (7)

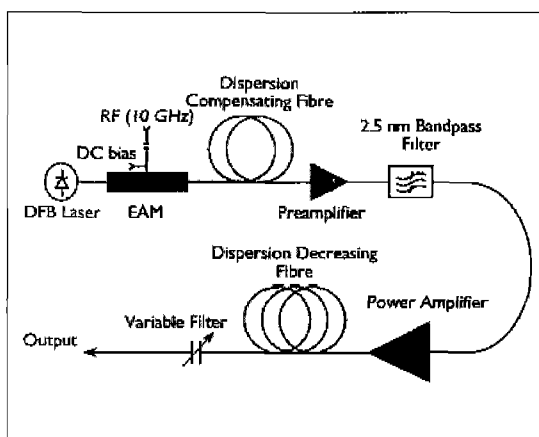


그림 4. 고속 반복된 레이저 다이오드 광신호를 솔리톤 펄스 수축 방법으로 펨토초 펄스를 생성하는 구조 (8)

## 초단 광펄스와 광통신 및 광 신호처리

화된 분산감소형 광섬유 (DF-DDF: dispersion flattened dispersion decreasing fiber)를 이용하여 솔리톤 펄스 수축을 실시하는 구도를 보여주고 있다. 이러한 어블침가 광섬유 레이저로부터의 초단 광 펄스 생성 과정에서는 어블 침 광섬유로부터 나오는 증폭된 자율 방출 잡음 신호로 말미암아 스펙트럼상의 높은 스파이크 (spike) 발생으로 자동 상관기 (autocorrelator)로 펄스폭 측정시 주된 펄스 폭 주위에 넓은 기생 신호 (pedestal signal)가 발생한다. 이를 제거하기 위해 광섬유 커플러로 연결된 높은 분산값을 갖는 일반 단일모드 광섬유 (SMF: single-mode fiber)와 낮은 분산값의 광섬유 (DFF: dispersion flattened fiber) 루프를 구성한 분산 비대칭 비선형 광 루프 거울 (DI-NOLM: dispersion-imbalanced nonlinear optical loop mirror)이 사용된다. 루프내 서로 반대로 돌아가는 광신호가 서로 다른 위상차를 겪게 되어 광섬유 커플러에서 만날 때 자체 스위치 기능을 가지게 되면서 스펙트럼상의 스파이크와 자동상관기 상의 넓은 기생 신호가 제거된다. 그림 2의 구도에서 최종 생성된 광펄스의 시간폭은 200 fs이며, 펄스의 피크 신호와 기생 잡음 신호간의 간격이 30 dB이상으로 얻어졌다.<sup>[2]</sup>

그 동안 모드록킹된 광섬유 레이저의 다양한 방법들이 시도되어 왔으나, 광전송 실험에 적용하기 위해서는 능동형 모드록킹과 안정화된 레이저 구도가 필요하다.<sup>[3]</sup> 그림 2에 제안된 구도가 현재까지 가장 잘 개발된 능동형 모드록킹 광섬유 레이저 구도를 보여주고 있다. 하지만 이 광섬유 레이저도 그림에 보여지는 바와 같이 펄스 생성물에 맞는 광섬유 레이저 공진기 길이의 미세 조정과 더불어 편광 조절기 (PC: polarization controller)의 조정 등 복잡한 펄스 다

듬기 과정이 수반되므로 범용화 하기에는 아직 다소 개선의 여지가 남아 있다.

### □ 광펄스 발생용 반도체 레이저

반도체 레이저에 의한 펨토초 (fs)급 초단 광펄스 생성 방법으로는 이득 스위치된 레이저 다이오드 펄스를 펄스 수축하는 방법과 고속 변조된 레이저 다이오드 광신호의 펄스 수축 방법, 모드록킹된 레이저 다이오드 구도를 이용하는 방법 등이 있다.<sup>[6-9]</sup> 일반적인 방법으로 레이저 다이오드를 이득 스위칭을 하거나 모드록킹을 하면 주로 피코초급 광펄스를 얻을 수 있으므로, 펄스 수축 과정이나 펄스 충돌형 모드록킹 (colliding-pulse modelocking) 구도를 이용하여야 한다.

그림 3은 이득 스위치된 레이저 다이오드 펄스를 4단계 솔리톤 펄스 수축 과정을 통하여 2 GHz급 반복률로 펄스 폭이 20 fs인 광펄스를 생성하는 구도를 보여주고 있다.<sup>[7]</sup> 펄스 수축 방법도 앞서 언급된 광섬유 레이저 펄스 수축과 마찬가지로 솔리톤 펄스 수축 방법과 더불어 분산 비평형 비선형 광섬유 루프 거울 (DI-NOLM)을 이용하는 방법 등이 시도되고 있다.<sup>[8]</sup>

그림 4는 전기흡수 (EA: electro-absorption)형 광 변조기로 10 GHz의 고속 변조된 레이저 다이오드 광신호를 솔리톤 펄스 수축 방법으로 펄스 시간폭이 190 fs이고 파장폭이 15 nm 인 펄스 열을 얻었다.<sup>[6]</sup>

레이저 다이오드의 직접 모드록킹으로 펨토초급 초단 광펄스를 생성하기 위해서는 그림 5에 보여지는 바와 같이 이득 영역과 포화흡수체 영역을 가진 InGaAsP/InP 단일 집적 펄스 충돌형 모드록킹된 (colliding-pulse modelocked) 레이저 다이오드 방법이 시도되고 있다.<sup>[9]</sup>

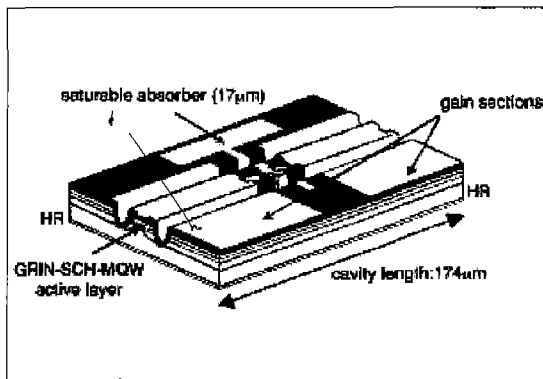


그림 5. 단일 집적 펄스 충돌형 모드록킹된 (colliding-pulse modelocked) 레이저 다이오드 구도 (9)

## 3. 펨토초 광펄스의 광통신 및 광 신호처리 에의 응용

### 3.1 광시간분할다중 (OTDM) 전송 기술에의 응용

펨토초급 초단 광펄스를 이용한 초고속 광전송을 구현하기 위해서는 기본적으로 초단 펄스 신호를 고속 다중화하는 기술과 역다중화 기술, 동기 신호 재생 기술, 분산

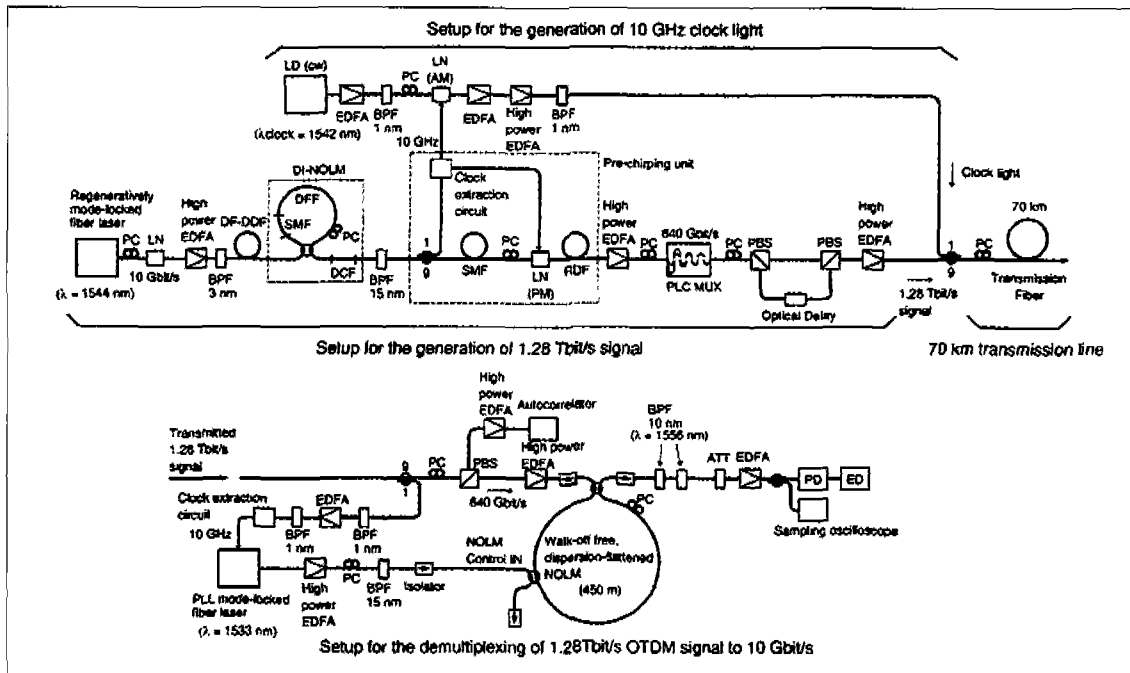


그림 6. 200 fs 광펄스의 1.28 Tbps급 OTDM용량의 70 km 광섬유 전송 구조 (2)

보상 기술 등이 해결되어야 한다. 그림 6은 200 fs 광펄스를 1.28 Tbps급 용량으로 70 km 광섬유를 전송하는 구조를 보여주고 있다. 그림 2는 펨토초 광펄스 생성 구조와 640 Gbps급 광시간분할다중화 (OTDM)와 2겹의 편광 분할다중화 구조, 70 km의 분산 보상형 광섬유 선로, 1.28 Tbps급 OTDM 신호의 10 Gbps급으로 역다중화하는 구조와 동기 신호 재생 구조를 보여주고 있다.<sup>[2]</sup>

### □ 고속 시간분할다중화 기술

펨토초 광펄스의 고속 시간분할다중화 기술로서는 미세한 시간 지연 조절을 위해서 평면 도파로형 광다중화 기술이 가장 많이 사용되고 있으며, 아래 그림 7(a)와 같은 각 채널간 신호들의 상대적인 시간 지연을 순차적으로 만들어 고속 다채널로 다중화하는 기술이 이용될 수가 있다. 그러나 아직 펨토초 광펄스를 각 채널별로 할당하고 고속 광 변조기를 이용하는 OTDM 기술이 성숙되지 않아서 현재까지의 실험실 고속 시간분할다중화 기술로는 단일 펨토초 광펄스 광원으로부터 오는 신호를 수백 Gbps급 이상으로 다중화하기 위해서 그림 7(b)~7(d)와 같은 구조들이 이용되고 있다.<sup>[10, 11]</sup>

### □ 고속 시간분할 역다중화 기술

초고속 광시간분할 역다중화 기술에는 고속 광 스위치가 필요하며 광섬유의 비선형 광학 효과를 이용한 완전광 광섬유 스위치와 반도체 광소자를 이용하는 방법들이 있다. 광섬유의 비선형 광학 효과는 수십 펨토초급의 빠른 반응 속도를 보이고 광섬유 저손실 특성으로 OTDM용 역다중화기 소자로 사용이 가능하다. 광섬유형 OTDM용 역다중화기의 주된 단점은 광섬유의 낮은 비선형값에 의해 긴 광섬유 길이와 높은 제어 광신호 출력을 요구하는 점이다. 그림 8은 광섬유의 비선형 광학 루프 거울 (NOLM)을 이용한 완전광 역다중화기 구조를 보여주고 있으며, 제어 광 펄스의 파장과 신호광 펄스의 파장을 다르게하여 양방향 편광하여 신호광과 제어광과의 색분산에 의한 신호들간의 상대적인 시간 천이 (walk-off)를 보상하여 고속 스위칭이 가능하도록 하는 완전광 스위치 구조의 한 예와 실험 결과를 보여주고 있다.<sup>[12]</sup>

한편으로는 상대적으로 높은 비선형 광학 계수를 가진 반도체 광증폭기 (SOA)를 비선형 광학 루프 가운데 설치한 NOLM을 만들어 낮은 제어 광 펄스 출력으로 수백 Gbps급 고속 시간분할역다중화도 구현한 바 있다.<sup>[13]</sup>

## 초단 광펄스와 광통신 및 광 신호처리

근래에 들어와 기존의 비선형 광학 루프 거울을 이용한 완전광 역다중화 구도가 가지는 부피가 크고 제작의 불편함과 상대적으로 높은 제어 광 출력이 요구되는 점을 보완하기 위해, 커플된 반도체 양자우물 구조들 (coupled quantum wells) 간의 내부 부밴드 흡수 (intersubband absorption)를 이용한 고속 광 스위치 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>[14]</sup>

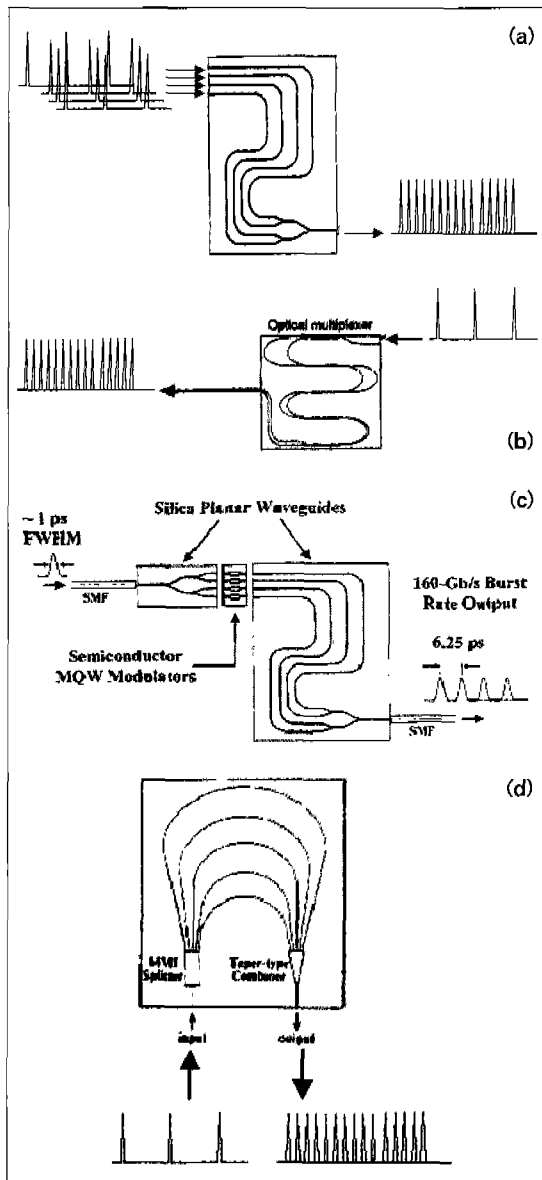


그림 7. 초단 광펄스의 시간분할다중화 구조들. (a) 다채널 초단펄스의 OTDM 다중화하는 경우, (b)~(d) 단일 채널 초단 펄스의 OTDM 다중화하는 경우들 (10, 11)

### □ 고속 광 동기 신호 재생 기술

OTDM 광통신에 필요한 고속 광 동기신호 재생 기술의 경우에는 2개의 균형된 광검출 기능을 이용한 광전 (optoelectronic) 위상 잠금 루프 (PLL; phase-locked loop)에 의한 고속 동기 신호 재생 기술과 반도체 광증폭기를 이용한 간섭계형 광 스위치에 의한 동기 신호 재생 기술 등이 있다.<sup>[15, 16]</sup>

그림 9(a)는 2개의 광검출기를 이용한 균형된 광검출 기능을 이용한 광전 위상 잠금 루프로 광변조기를 구동하여 고속 동기 신호를 재생하는 구조를 보여주고 있다. 그림 9(b)에 80 Gbps급 입력 신호에 대해 10 GHz로 동기 신호가 재생된 결과를 보여주고 있다.<sup>[15]</sup>

그림 10(a)는 반도체 광증폭기를 포함하는 비선형 광학 루프 거울에 의한 위상 잠금 루프 (PLL; phase-locked loop)를 빠른 광위상 비교계 (optical phase comparator)로 사용하여 고속 동기 신호를 재생하는 구조를 보여주고 있다. 그림 10(b)는 80 Gbps급 입력 신호에 대해 10 GHz로 동기 신호가 재생된 결과를 보여주고 있다.<sup>[16]</sup>

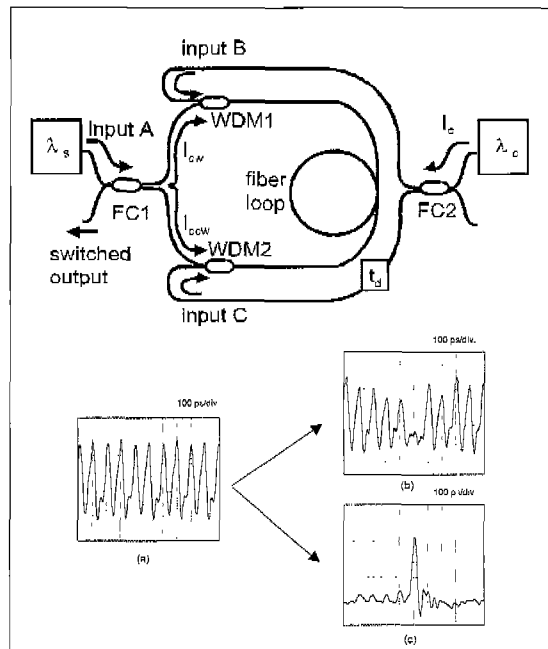


그림 8. 광섬유의 비선형 광학 루프 거울을 이용한 완전광 역다중화기 구조 및 실험 결과(12)

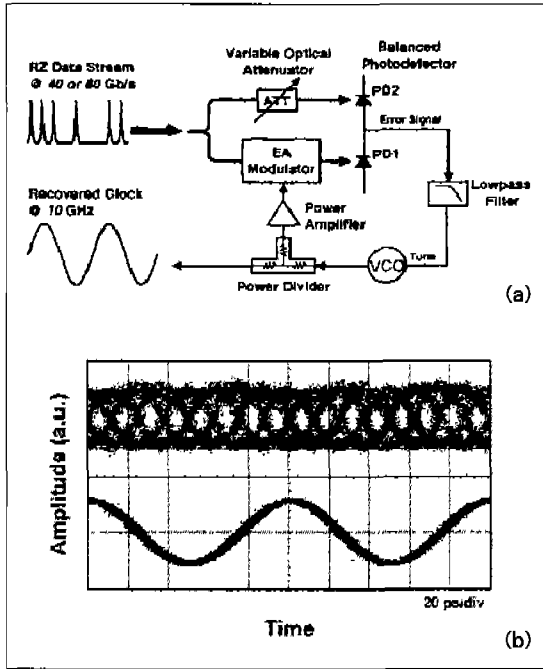


그림 9. (a) 2개의 균형된 광검출 기능을 이용한 광전 위상 잠금 루프로 동기 신호를 재생하는 구조와 (b) 80 Gbps급 입력 신호에 대해 10 GHz로 동기 신호가 재생된 결과(15)

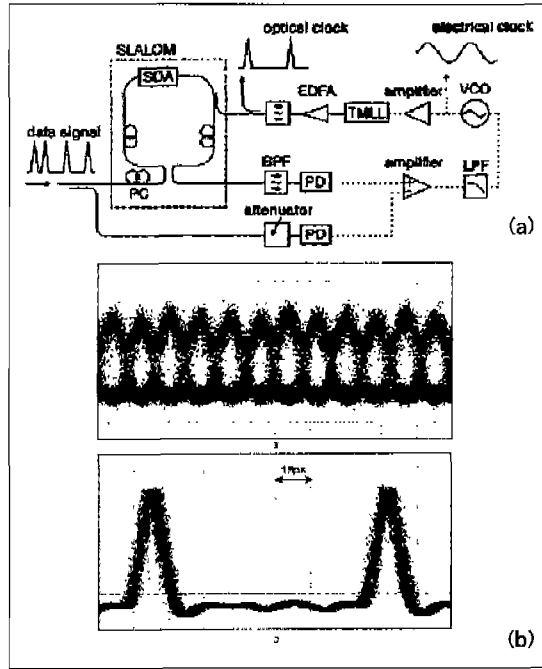


그림 10. (a) 반도체 레이저 광증폭기 루프 거울(SLALOM; semiconductor laser amplifier loop mirror)을 이용한 광 동기 신호 재생 구조와 (b) 80 Gbps급 입력 신호에 대해 10 GHz로 동기 신호가 재생된 결과(16)

### □ 초단 광펄스 전송에 따르는 분산 보상 기술

초단 광펄스를 전송하는데에는 일반적인 분산 보상과 분산 기술기 보상 기술은 2차 및 3차 색분산을 보상하기 위해 취해지나, 펨토초 펄스와 같이 선폭이 아주 넓은 광펄스의 전송에 대해서는 4차 색분산 효과를 최소화할 수 있도록 해야 한다. 그림 6에서와 같은 200 fs 펄스의 광섬유 전송에 대해서는 39.7-km 길이의 단일모드 광섬유(SMF: single-mode fiber)의 분산값과 분산기술기 값을 보상하기 위해 이들 값이 정 반대인 25.1-km 길이의 역분산 광섬유(RDF: reversed dispersion fiber)가 이용되어 왔으며, 4.6-km 길이의 분산천이 광섬유(DSF: dispersion-shifted fiber)는 나머지 전체 선로상의 분산 기술기 값을 보상하기 위해 삽입이 되었다. 사용된 광섬유들의 편광모드 분산값(PMD)은 제작시 최소화되도록 고려했으며, 4차 분산값과 더불어 잔여 2차 분산값을 보상하기 위해 광신호 전송로 바로 앞단에서 광신호들에 대해 사전 처핑 삽입 과정을 거친다.

### 3.2 기타 다른 분야에의 응용 기술

펨토초급 초단 광펄스를 이용하는 다른 응용 분야 기술로는 (1) 광 부호분할다중(Optical CDMA: optical code-division multiplexing) 광통신 기술<sup>[17]</sup>과 (2) 펨토초 펄스의 넓은 선폭을 스펙트럼 분할한(spectrum sliced) 광신호원으로 사용하여 WDM 광전송하는 기술<sup>[18]</sup>, (3) 시간-대-공간 변환(time-to-space transformation)에 의한 고속 광신호를 저속 공간 병렬 신호로 변환하는 신호 처리 기술<sup>[19]</sup>, (4) 시간-대-공간 변환을 이용한 완전 광 패킷 헤더 인식 기술<sup>[20]</sup>, (5) 테라헤르쯔(THz) 신호 발생 및 검출, 변조, 소자 분석 기술<sup>[21-23]</sup>, (6) 초고속 물성 분석 기술<sup>[24]</sup>, (7) 레이저 인가(laser writing) 기술<sup>[25]</sup>, (8) 양자 정보 처리를 위한 광 얽힘 상태(entanglement state) 및 양자 간섭(quantum interference)에의 응용 기술<sup>[26, 27]</sup> 등이 있다. 아직 많은 관련 기술들이 기초적인 수준에 있어 향후 이들 분야의 기술 개발에 대한 여지는 아직 많이 남아 있다고 본다.

그리고 펨토초급 초고속 광신호 발생 및 스위치, 변조기



## 초단 광펄스와 광통신 및 광 신호처리

등으로의 응용 가능성을 열어가는 다른 방법으로 반도체의 고속 소재 및 소자 특성을 얻기 위해 반도체 양자점 구조 소자와 캐스캐이드 레이저 구조 등에 대한 연구도 이루어지고 있다.<sup>[28-29]</sup>

### 4. 결론

본 글에서는 광통신 분야에서의 펨토초 광펄스 생성 및 전송, 처리 등에 관련된 기술들에 대해 검토를 해 보았다. 통신 기술과 정보 처리 기술이 항상 대용량화를 위해 발전하고 있는 과정에서 기존의 광신호 파장분할다중화(WDM) 방식을 이용한 병렬 신호처리 기술과 더불어 고속 시간분할다중화(TDM) 방식으로 펨토초 광펄스를 이용하는 고속 직렬 신호처리 기술에 대한 연구가 이루어지고 있다. 근본적으로 광통신에 이용되는 실리카 광섬유의 저손실 영역인 1.25~1.65  $\mu\text{m}$  파장대의 전 영역이 약 400 nm로서 이는 약 50 THz에 해당하게 된다. 이 파장영역을 전부 이용하는 기술은 기존의 채널당 낮은 TDM 비트레이트로 최대의 WDM 다중화하는 방식과 비교하여 초단 광펄스를 이용한 채널당 초고속 OTDM 다중화하는 방식이 갖는 한계성은 현재로서는 너무나 크다. 초단 광펄스를 이용한 OTDM 방식이 갖는 대표적인 물리적 한계성으로는 광섬유를 비롯한 전달 매질이 갖는 색분산 및 편광 분산이 있겠으며, 초고속 광펄스 생성과 더불어 제어, 스위치 등의 난해한 기술들이 완전히 해결되어야 한다.

앞서 언급된 펨토초 펄스 생성 기술이나 OTDM 다중 및 역다중 기술, 동기 신호 재생 기술들이 일부는 성숙된 점도 있지만, 아직 범용으로 실용화하기에는 충분히 개발이 되어 있지 못한 면이 있다. 좀더 실용적인 소자들을 구현하기 위해 기존의 광섬유 소자들을 대체하여 반도체 집적 소자 개발들이 진행되고 있으나, 현재로서는 기술적 성숙도가 미흡하다. 이러한 점에서 기존의 WDM 방식에 비하여 연구 개발의 가능성은 아직도 많이 남아 있으나, 기술 개발에 대한 노력에 비해 실용화를 통한 결과의 대가를 쉽게 얻기가 힘든 점이 있다.

지난날 광전송 기술의 발전은 채널 속도가 TDM 방식으로 155 Mbps에서 622 Mbps, 2.5 Gbps, 10 Gbps, 40 Gbps로 발전을 해 오는 과정에서 일본에서는 향후를 고

속 TDM 용량을 수용할 있는 색분산 값이 작은 분산천이 광섬유(DSF: dispersion-shifted fiber)를 이미 일본 국내의 상당한 지역에 포설한 바가 있다. 그러나 90년대에 들어와 채널 속도가 10 Gbp 이상으로 발전하면서 대두되는 기존의 실리카 광섬유가 가진 색분산 값에 의한 한계성을 극복하는 대안으로 TDM 방식을 대신하여 WDM 방식의 기술이 등장하였음에도 불구하고 이 DSF는 TDM 방식 보다 WDM 방식에는 비선형 광학 특성에 의해 불리한 점이 밝혀졌다. 이러한 이유와 더불어 높은 기술성이 요구되는 초고속 OTDM 방식 기술에 대해서는 기존 TDM 기술의 연장선상에서 현재 일본이 세계에서 가장 앞서 가고 있다.

향후 초고속 OTDM 방식의 광통신 기술보다는 WDM 방식에 의한 대용량 광통신 기술이 경제성이나 기술성에 유리할 것으로 판단되지만, 지속적으로 발전되고 있는 펨토초 광펄스 생성 및 전송, 신호처리 기술은 특수한 목적의 응용분야에서나 새로운 또 다른 응용 분야 기술로 꽃을 피울 때가 있으리라고 본다. 특히 최근에 많이 연구되고 있는 초단 광펄스 신호처리를 이용한 물질 분석, 시간-대-공간 변환, 광신호 코딩/디코딩, 양자정보처리 기술 등의 응용 분야에 대한 기술의 발전도 기대해 볼만하다.

### 참고 문헌

- [1] K. Fukuchi, et al., OFC' 2001, Anaheim, California, March, 2001, paper PD24.
- [2] M. Nakazawa, et al., Electronics Letters, 36(24), 2027-2029 (2000).
- [3] J.-C. Diels and W. Rudolph, "Ultrashort Laser Pulse Phenomena, Fundamentals, Techniques, and Applications on a Femtosecond Time Scale" Chapter 1 (Academic Press, Inc., San Diego, 1996).
- [4] M. Nakazawa, IEEE J. on Selected Topic in Quantum Electronics, 6(6) 1332-1343 (2000).
- [5] M.-Y. Jeon, et al., Electronics Letters, 34(2), 182-184, 1998.
- [6] Y. Matsui, et al., IEEE Photonics Technology Letters, 11(10), 1217-1219 (1999).
- [7] I. Y. Khrushchev, et al., Proc. ECOC' 98, Madrid, Spain, September 1998, pp. 211-212.
- [8] M. J. Guy, et al., IEEE Photonics Technology Letters, 9(7), 1017-1019 (1997).
- [9] S. Arahira, and Y. Ogawa, Electronics Letters, 37(16), 1026-1027 (2001).
- [10] T. G. Ulmer, et al., J. Lightwave Technology, 18(12), 1964-1977 (2000).
- [11] F. Zamkotsian, et al., IEEE Photonics Technology Letters, 7(5), 502-505 (1995).
- [12] H. K. Lee et al., IEEE Photonic Technology Letters, 7(12), 1441-1443

(1995).

[13] I. Glesk, *et al.*, *Electronics Letters*, 30(4), 339-341 (1994).

[14] T. Akiyama, *et al.*, *IEEE Photonic Technology Letters*, 14(4), 495-497 (2002).

[15] D.T. K. Tong, *et al.*, *IEEE Photonic Technology Letters*, 12(8), 1064-1066 (2000).

[16] T. Yamamoto, *et al.*, *Electronics Letters*, 37(8), 509-510 (2001).

[17] C.-C. Chang, *et al.*, *IEEE Photonic Technology Letters*, 10(1), 171-173 (1998).

[18] L. Bolvin, *et al.*, *IEEE Photonic Technology Letters*, 11(10), 1319-1321 (1999).

[19] Y. Fainman, *et al.*, *LEOS '99. 12th Annual Meeting*, Vol. 2, 562-563 (1999).

[20] M. C. Nuss, *IEEE Annual Meeting*, *LEOS '96*, Vol. 1, 338-339 (1996).

[21] T. Kondo, *et al.*, *CLEO/Pacific Rim' 99*, 449-450 (1999).

[22] N. E. Hecker, *et al.*, *Technical Digest, Summaries of Papers Presented at the Quantum Electronics and Laser Science Conference* p. 170, 1999.

[23] Q. Chen, *et al.*, *Technical Digest, Summaries of Papers Presented at the Quantum Electronics and Laser Science Conference, 1999*, Page(s): 169.

[24] B. Ullrich and R. Schroeder, *LEOS 2001. The 14th Annual Meeting of the IEEE*, Vol. 2, 2001 Page(s): 730-731.

[25] T. Cardinal, *et al.*, *CLEO '98. Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference on*, (1998) Page 37.

[26] M. Atature, *et al.*, *QELS 2001*, paper QTuB2 (2001).

[27] H. Nishioka, *et al.*, *CLEO 2001*, paper CThM4 (2001).

[28] P. Borri, *et al.*, *IEEE Photonic Technology Letters*, 12(6), 594-596 (2000).

[29] F. Capasso, *et al.*, *IEEE J. of Quantum Electronics*, 38(6) 511-532 (2002).

약 력



김경현

1989년 ~ 현재 한국전자통신연구원 원천기술연구소 광통신 소자연구부 부장  
 1986년 ~ 1989년 미국 NASA 상임주재연구원  
 1986년 ~ 1989년 Hampton Univ. 물리학과 연구조교수 (겸직)  
 1980년 ~ 1986년 미국 버팔로 소재 뉴욕주립대 물리학과 이학박사  
 E-mail : kyongh@etri.re.kr  
 관심분야 : 광자소자 및 광통신

