

고리형 반도체-광섬유 레이저에서 4광파 혼합에 의한 광대역 및 고속 파장 변환기

최경선* · 서동선

명지대학교 전자공학과 광자공학연구소

④ 449-728 경기도 용인시 남동 산 38-2

이유승 · 기호진 · 전영민 · 이 석

한국과학기술연구원 광기술연구센터

④ 136-791 서울특별시 성북구 하월곡동 39-1

김동환

노베라 옵틱스

④ 302-859 대전시 서구 탄방동 671

(2001년 7월 3일 받음, 2002년 1월 10일 수정본 받음)

고리형 반도체 광섬유 레이저에서 외부의 별도 펌프광 없이 4광파 혼합에 의해 파장을 가변할 수 있는 시스템을 구현하였다. -8 dBm의 10 GHz 초단펄스를 입력 신호 광원으로 인가하여, 반도체 광증폭기의 이득 대역폭내에서 허황 30 nm 및 상향 17 nm에 이르는 연속적인 파장변환을 성공시켰다. 구현된 변환기는 광대역 파장변환 뿐만 아니라, 고속 변환 및 낮은 포화 신호전력 특성을 보임을 입증하였다.

주제어 : fiber lasers/amplifiers, semiconductor devices.

I. 서 론

정보 전송량의 급격한 증가는 초고속 및 대용량 통신망 구현에 대한 필요성을 날로 증대시키고 있으며, 파장변환기는 이러한 거대 정보전송 및 분배 요구조건을 수용할 수 있는 차세대 광통신망 및 광집속망 구현을 위한 핵심소자로서 인식되고 있다. 즉, 파장 변환기는 특정 채널의 막힘 현상을 해소하거나 재사용에 의한 수십 THz에 이르는 광섬유의 전송 대역에 대한 효율적 활용 뿐만 아니라, 파장 변환을 통한 광섬유 분산보상에 의한 초고속 정보전송도 가능하게 하고, 특정 신호에 대한 파장별 Add-Drop 및 OXC(Optical Cross Connect) 등에 의한 대용량 광 분배 및 집속망 구현도 가능하게 하는 미래 광통신망의 핵심역할을 수행할 것으로 판단된다.

전광 파장 변환에는 XPM(Cross Phase Modulation), XGM(Cross Gain Modulation), FWM(Four Wave Mixing) 등이 이용되고 있다. 특히, 반도체 광증폭기(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)에서의 4광파 혼합(FWM)은 이득효과 특성을 이용한 파장변환기에 비해 데이터의 변조 형태나 속도에 무관한 전광(all optical)파장 변환기술로서 다음과 같은 이점이 있다. 즉, 변조 형태와 무관하게 100 Gbps 이상의 초고속 파장변환이 가능하며, 8 THz($\Delta\lambda = 64 \text{ nm}@1550 \text{ nm}$) 이상의 SOA 이득 스펙트럼 대역 전체에서 파장 변환이 가능하여 초 광대

역의 광통신망에 이용될 수 있으며, 낮은 세기의 입력에서도 파장 변환이 가능하고, 타 반도체 광소자와 집적화가 가능하다는 장점이 있다. 그러나, 약 -20 dB 이하의 낮은 변환 효율을 갖고, 편광 의존성이 존재하여 최대 효율을 얻기 위해 편광 조절이 필요한 단점이 있다. 따라서 파장 변환 효율을 극대화하기 위해서는 SOA-FWM 변수들에 대한 4광파 혼합 신호들에 대한 최적화가 요구된다.^[2,5] SOA의 4광파 혼합 특성을 이용한 파장변환에 관한 연구는 주로 SOA에 입력 신호광(probe)과 펌프의 펌프광(pump)을 인가하는 단일펌프과모드 형태로 연구되어 왔다.^[1]

최근에 광섬유 레이저에서 이득 매질을 EDF(Er-doped fiber)에서 SOA로 바꾼 고리형 반도체-광섬유 레이저(SFRL: Semiconductor Fiber Ring Laser)가 보다 넓은 파장가변특성을 갖는 것으로 보고됨에 따라 많은 연구의 관심이 되어왔다.^[2] 광대역 파장가변 모드잠김 SFRL^[2]에 이어서, Lu 등^[11]은 SFRL 공진기내에 대역통과 필터를 삽입하여 필터링된 SOA의 신호를 펌프광으로 이용하므로 외부 펌프 레이저가 필요 없는 전광 파장 변환기의 구조를 제시한바 있다. 이 구조에서 SOA는 레이저 내에서 EDF를 대신한 이득 매질로서 작용할 뿐만 아니라, 입력 신호에 의해 변조되는 비선형 소자의 역할을 동시에 하고 있어 기존의 방식들에 비해 그 구조가 간단해진다. 본 논문에서는 Lu가 제시한 SFRL 구조를 이용하여, 레이저 공진기 내에 삽입된 파장 가변 필터를 가변함으로써 SOA의 이득 스펙트럼 내에서 광대역 파장 변환이 가능하고

*E-mail: cool_time@hanmail.net

고속의 파장변이가 가능하다는 것을 보이고 SOA를 이용한 단 일통과 파장변환 방식과 SFRL에서의 파장변환 방식의 특성을 비교분석하고자 한다. 우선, 2장에서는 본 연구의 기본이 되는 반도체 레이저에서의 4광파혼합 이론에 대해 살펴보고, 3장에서는 실험결과 및 고찰을 논하고, 4장에서는 결론을 맺는다.

II. 4광파 혼합 이론

광섬유나 SOA와 같은 매질 내에서 일어나는 비선형 현상의 하나인 4광파 혼합은 입력신호에 대한 파장변환에 활용될 수 있어서 많은 주목을 받고 있는데, 위상정합 조건이 잘 만족되어야 그 효율을 높일 수 있다. 위상정합 조건은 그림 1과 같이 완전 비축퇴(completely nondegenerate)의 경우와 부분 축퇴(partially degenerate)의 두 가지의 경우로 나눌 수 있다. 그 외의 4광파 혼합 신호의 발생으로 완전 축퇴시켜서 얻는 방법은 펌프광과 입력광을 일치 시켜야 한다. 그러나, 본 논문에서 이용하고자 하는 4광파 혼합 방법은 입력광, 펌프광 및 4광파 혼합 신호광을 같은 방향으로 진행시켜야 하므로, 완전 축퇴된 경우에는 4광파 혼합 신호를 분리해 낼 수 없다. 그러므로, 본 연구에선 그림 1(b)의 부분 축퇴된 경우를 적용하여 실험하였다.

SOA에 두 신호광(pump광, probe광)을 주입시키면, 그림 1-(b)에 보인 바와 같이, 생성되는 4광파 혼합 출력광의 주파수는 두 입력 신호광 주파수들의 결합으로서 다음과 같이 결정된다.

$$\omega_c = 2\omega_p - \omega_s \quad (1)$$

여기서, ω_c 는 새로이 생성된 4광파 혼합 출력신호인 공역파(conjugation wave)의 주파수이며, ω_p 는 펌프 광(pump) 주파수로 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_p$ 이고, ω_s 는 입력 신호광 주파수를 나타낸다. 만일 $\omega_s \geq \omega_1$ 이면 생성되는 4광파 혼합 신호광의 주파수는 입력 신호광 보다 높으므로 상향 변환이라 하고, $\omega_s \leq \omega_1$ 이면

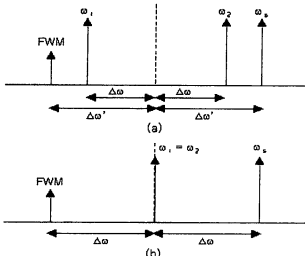


그림 1. 위상정합 조건에 따른 4광파 혼합. (a) 완전 비축퇴 현상을 이용한 4광파 혼합, (b) 부분 축퇴 현상을 이용한 4광파 혼합.

하향 변환이라 한다. 4광파 혼합 효율은 SOA 내부에서의 각 전기장의 결합 방정식으로부터 계산할 수 있는데, 이때 입력 및 4광파 혼합 신호광에 대해 다음과 같은 전체 조건이 필요하다. 즉, 첫째로 SOA는 길이가 1 mm 정도에 불과하므로 파장 변환에 대한 분산은 고려하지 않는다. 이 가정은 본 연구와 같은 수 THz의 주파수 변환에 대해서는 SOA에서의 분산 효과가 무시되어 타당하나, 20 THz 이상의 주파수 변환에 대해서는 무시할 수 없다. 둘째, 생성되는 4광파 혼합 광 세기는 펌프광과 입력신호 광의 세기에 비해 무시할 정도로 작다. 이 가정도 수 GHz 정도 이상의 변환 주파수 차에 대해서는 항상 타당하다.

이러한 가정으로부터 각 전기장 세기에 대한 결합 방정식은 다음과 같다.^[6,7]

$$\frac{dE_j}{dz} = \left\{ \frac{1}{2} [g(z) - \gamma + i\Delta k(z)] \right\} E_j + \mu_j(z) \quad (j=p, s) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_c}{dz} = & \left\{ \frac{1}{2} [g(z) - \gamma + i\Delta k(z)] \right\} E_c - \frac{\Gamma g_0 E_p^2 E_s^*}{2} \epsilon_{ch}^0 \epsilon_c^0 (1 - i\beta) H_{ch}(\Omega) \\ & + \frac{\Gamma g_0 E_p^2 E_s^*}{2(1 + P(z)/P_\sigma)} \left\{ \frac{(1 - i\alpha)}{P_\sigma} H_c(\Omega) + \epsilon_{hb} H_{hb}(\Omega) \right\} \\ & + \epsilon_{ch} (1 - i\beta) H_{ch}(\Omega) + \mu_c(z) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, P_σ 는 포화 세기를 $P(z)$ 는 SOA 내의 전체 파워를 나타내고, g_0 는 소신호 이득계수, Γ 는 전기장구속지수(field confinement factor), γ 는 산란 손실을 나타낸다. 또한 SOA 내에서의 이득($g(z)$)과 비선형 파수 부정합(mismatching(Δk))의 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} g(z) = & \frac{\Gamma g_0}{1 + P(z)/P_\sigma} [1 - \epsilon_{hb} H_{hb}(\Omega) P(z) - \epsilon_{ch} H_{ch}(\Omega) P(z)] \\ & - \Gamma g_0 \epsilon_{ch}^0 \beta H_{ch}(\Omega) P(z) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta k(z) = \frac{\Gamma g_0 [\alpha - \epsilon_{ch} \beta H_{ch}(\Omega) P(z)]}{1 - P(z)/P_\sigma} - \Gamma g_0 \epsilon_0^{ch} \beta H_{ch}(\Omega) P(z) \quad (5)$$

여기서 α, β 는 선폭 증가인수의 선형, 비선형 항을 나타내며, 비선형 이득 표현에서 $\epsilon_{hb}(n)$, $\epsilon_{ch}(n)$ 는 SHB와 CH의 크기에 기여하는 항으로서 전자 밀도의 선형 함수로서 가정한다. SHB와 CH에 의한 이득포화를 반송자 공핍(depletion)에 비해 무시한다고 가정하면 입력 파워에 의존하는 평균 이득에 대한 해를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{P(0)}{P_\sigma} = \frac{(\Gamma g_0 - \gamma)(1 - (G/G_0)^{\gamma/\Gamma g_0})}{\gamma(G - (G/G_0)^{\gamma/\Gamma g_0})} \quad (6)$$

주파수 변환 효율을 입력 신호 광과 생성된 4광파 혼합 광과의 파워 비로 정의하면 $\eta(\Omega) = P_c(L)/P_s(0)$ 에 대해 다음과 같은 해석적인 표현을 얻을 수 있다.

$$\eta(\Omega) = \frac{1}{4} \left[\frac{P_p(0)}{P_s(0)} \right]^2 P_s^2 G \left[\ln(G_O/G) \right]^2 \times \left[\frac{1-i\alpha}{P_s} H_c + \epsilon_{hb} H_{hb} + \epsilon_{ch} H_{ch}(1-\beta) + \epsilon_{ch}^0(1-\beta) H_{ch} \frac{\Gamma_{g0}}{\gamma} \left[\frac{P(0)(1-G)}{P_s \ln(G_O/G)} + 1 \right] \right]^2 \quad (7)$$

위의 결과식에서 우리는 펄프광의 세기 변화에 따른 4광과 혼합 효율은 펄프광의 세기가 증가함에 따라 감소하여 4광과 혼합 신호 광은 이득포화가 됨을 알 수 있으며, 이때까지 4광과 혼합 출력신호는 입력 펄프광의 제곱에 비례하게 됨을 볼 수 있다.^[6] 이것을 토대로 본 연구에서는 고리형 반도체 광섬유 레이저를 이용한 파장 변환기와 단일 통과 모드 방식의 파장 변환기 입력세기변화의 영향에 관하여 살펴볼 수 있었다.

III. 고리형 반도체 광섬유 레이저의 구성 및 동기 신호 추출

본 연구에 사용된 실험 구성도는 그림 2에 보인 바와 같다. 입력 신호 광원(probe)으로는 능동형 모드 잠긴형 이득 도핑 광섬유 레이저(ML-EDFL: Mode-locked Er-doped Fiber Laser)를 사용하였다. 이 레이저는 광강도 변조기를 이용하여 능동적으로 10 GHz로 고조모드잠김되어 11 ps의 펄스 폭, 1.2 mW의 평균 출력과 0.42 nm의 선폭을 가진 출력특성을 가지고 있으며, 공진기 내부에 삽입된 파장가변 필터를 이용하여 발진파장을 1530-1560 nm까지 조절 가능하였다.^[10] 가는 선폭 조정과 최대의 4광과 효율을 얻기 위해 ML-EDFL 입력신호 광(probe)과 SOA에서 귀환되어 생기는 광섬유 레이저(pump) 각각의 부분에 편광 조절기(PC)를 설치하였다.^[6] 이론에서 보인 바와 같이 4광과 혼합 신호(FWM)는 펄프광 세기의 제곱에 비례하고 입력 신호광의 세기에 선형적으로 비례하므로 펄프광의 세기를 입력 신호광 보다 크게 하고, 이 신호광의 입력 세기에 대한 효과를 살펴보기 위해 광 감쇠기를 입력단에 연결하였다. 또한 고리형 반도체 광섬유 레이저에서는 SOA 출력 전력을 귀환시켜 펄프광을 생성시키므로, 보다 높은 펄프광 전력을 유지하기 위해 각각의 광 소자에서의 손실을 최소화시켰다. SOA로 입력신호 광과 자체 생성되는 펄프 광을 주입시킬 때 사용하는 커플러는 3-dB 커플러를 사용하였으며,

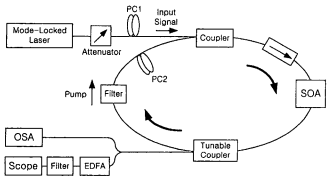


그림 2. 고리형 반도체 광섬유 레이저(SFRL)를 이용한 파장변환 실험 장치 구성도.

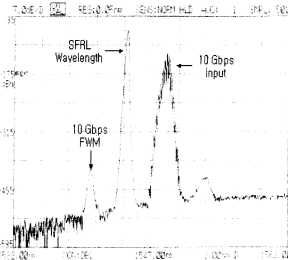


그림 3. 입력, 펄프, 및 4광과 혼합에 의해 변환된 출력의 스펙트럼(펄프광 파장: 1544.0 nm, 신호광 파장: 1548.9 nm, 변환된 출력 파장: 1539.3 nm).

출력 가변 커플러를 출력단에 설치하여 펄프 광 출력 레이저의 발진을 조절하여 4광과 혼합이 더욱 잘 일어날 수 있도록 하였다. 이때의 가변 비율은 9:1에서 8:2 사이에서 설정되었다. 구성된 레이저의 공진기의 길이(Ring Cavity)는 총 11.8 m였다. 본 실험에서 사용한 반도체 광증폭기(SOA: 1550 nm)는 반송자 수명이 800 피코초(ps)이고 양면에 반사율이 10^{-3} - 10^{-4} 정도의 무반사 박막증착된 반도체 증폭기로서 fiber-to-fiber 이득은 대략 23 dB(@200 mA)이고 ASE 선폭은 40 nm 정도이며 TEMT 모드간의 이득차는 0.9 dB 이하로 매우 작다. 입력신호 광이 없는 상태에서 구현된 SFRL는 SOA 인가전류 165 mA에서 -7.0 dBm의 단일모드 연속발진 특성을 보였다. 이 발진 광이 자체 펄프 광 역할을 하는데, 이 펄프 광의 파장 조정을 위해 1530 nm에서 1560 nm까지 조절 가능한 1.2 nm 대역폭의 파장 가변 필터를 설치하였다. 이 조건에서 입력신호 광을 주입시키면 4광과 혼합에 의한 파장 변환된 신호(FWM)를 얻을 수 있었는데, 그림 3은 ML-EDFL 입력신호 광이 4광과 혼합에 의해 파장 변환되었음을 보여주는 출력 스펙트럼이다. 입력신호 광 파장은 1548.9 nm이고, 펄프 광은 1544.0 nm이었다. 파장 변환된 신호는 -8 nm 이하 변환되어 1539.3 nm에서 나타났다. 파장가변 가능한 최대 범위를 조사하기 위해, 입력신호 광을 1550 nm에 고정시키고 공진기 내에 있는 파장가변 필터를 이용하여 펄프 광의 파장을 가변시켰다. 그 결과, 그림 4와 5에 보인 바와 같이 30 nm에 이르는 하향 변환과 17 nm에 이르는 상향 변환이 가능함을 확인하였다. 그림 6은 ML-EDFL 입력 신호광(상)과 파장 변환된 출력 신호광(하)을 20 GHz 대역폭의 검출기와 자기 상관기로 측정할 필드 스코프를 보이고 있다. 그림의 왼쪽에서 보는 바와 같이 10 GHz의 입력 펄스신호와 파장 변환된 신호는 거의 똑 같은 형태를 유지하고 있음을 보여준다. 각 펄스의 특성을 보다 자세히 살펴보기 위하여 자기상관제적(auto-correlation trace)를 왼쪽에 나타내었다. 제적의 형태는 거의 유사하나, 펄스 폭은 입

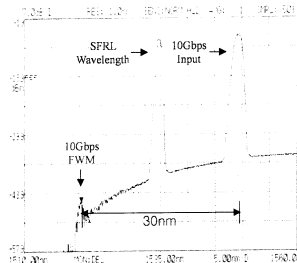


그림 4. 30 nm의 하향 파장변환을 보이는 입력력 신호 스펙트럼.

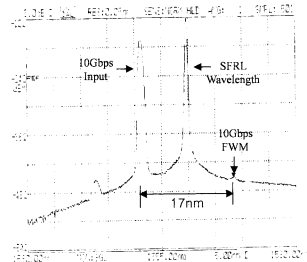


그림 5. 17 nm의 상향 파장변환을 보이는 입력력 신호 스펙트럼.

력신호가 ~11 ps일때 변환된 출력신호는 ~18 ps로 나타났다. 변환된 펄스의 펄스 폭 증가는 변환과정뿐만 아니라, 미약한 변환신호의 자기상관계측을 조사하기 위해 신호를 크게 증폭했기 때문에 이로 인한 펄스폭 증가효과도 포함된 것으로 판단된다. 변환된 4광과 혼합 신호의 펄스 폭이 측정된 비와 같이 ~18 ps라고 해도, 본 연구 시스템은 50 Gbps 이상의 신호에 대한 고속 파장변환이 가능함을 알 수 있다.

본 제안 시스템의 효율을 분석하기 위해, 입력신호에 대한 파장 변환신호의 변환효율(E)을 조사한다. 변환효율을 계산하기 위하여, 다음의 수식을 이용하였다.

$$E(\%) = \frac{P_s}{P_i} \times 100 \quad (8)$$

여기서, P_i 와 P_s 는 각각 입력 및 출력 신호광의 전력이다. 그림 7은 그림 3-5와 같은 실험조건에서 1550 nm의 -2 dBm 입력광을 주입했을 때, 각 파장 대역에서의 파장변환효율을 보

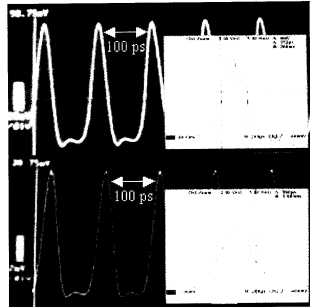


그림 6. 입력(상) 및 변환된 출력(하) 광펄스의 형태 비교; (좌) 20 GHz 검출기로 검출한 파형 및 (우) 자기상관계측.

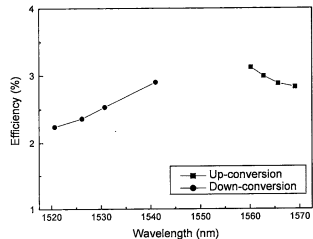


그림 7. 1550 nm의 -2 dBm 입력 신호에 대한 파장 변환된 신호의 변환효율.

인다. 전체 파장변환 영역에서 2-3%의 변환효율을 보임을 알 수 있으며, 파장변환효율은 SOA의 이득특성곡선을 따르는 것을 확인할 수 있다.

SOA의 단일통과에 의한 파장변환 방식과 본 연구에서 고려한 SFRL을 이용한 파장변환 방식에서 입력신호에 대한 파장 변환 특성을 비교하기 위해, 그림 8과 같은 단일통과방식의 파장변환기 실험장치를 구성하였다. 입력신호 및 펄스 광 각각에 변광 조절기를 설치한 후, SOA에 주입시켜 4광과 혼합을 유도하였다. 물론 4광과 혼합 신호는 전력이 낮기 때문에 어블림기 광섬유 증폭기(EDFA)로 증폭시켜 주어야만 관찰할 수 있었다. 그림 9에 그림 8에 보인 종래의 단일통과 4광과 혼합 파장변환의 경우(역 삼각형)와 본 실험의 SFRL 구조에 의한 파장변화(원형)에 대해, 입력 신호 출력에 따른 파장 변환된

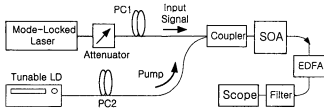


그림 8. SOA 단일통과 방식의 파장 변환기 실험 구성도.

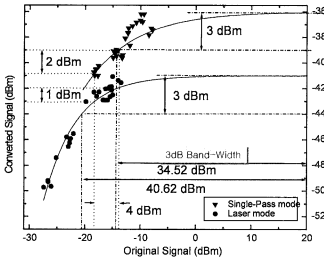


그림 9. SOA 단일통과 및 고리형 레이저 방식에서의 입력 신호 전력에 따른 파장변환된 출력신호의 전력 비교.

신호 출력 값의 변화를 비교하여 나타냈다. 이 그림은 동일한 펌프 광 전력에서, SFRL을 이용한 방식은 단일통과 방식에 비해, 낮은 입력신호 광 전력에서 4광파 혼합에 의한 파장변환이 가능하며, 낮은 입력신호 광 전력에서 4광파 혼합된 변환신호의 포화현상이 나타남을 보이고 있다. 즉, 단일통과 방식에서 4광파 혼합 신호발생이 불가능한 -20 dBm 이하의 입력신호 광 전력에서도 SFRL 이용 방식은 파장변환이 가능했으며, 입력신호 광 전력 -18~-14 dBm에 대해, 단일 통과 모드와 4광파 혼합 파장변환 신호 전력은 -41~-39 dBm으로 나타났다. SFRL 경우에서는 -43~-42 dBm으로 측정되었다. 후자에서 보인 실험결과와 같은 낮은 입력신호 전력에서의 출력포화현상은 SFRL을 이용한 파장변환기가 단일통과방식의 파장변환기보다 입력세기변화에 대해 변환된 출력신호가 영향을 적게 받음을 보여준다. 실험결과, 데이터를 최적화된 포화 입력세기의 3 dB 대역폭은 단일통과방식에서 34.5 dBm, SFRL 방식에선 40.6 dBm으로 나타났다. 이는 파장 변화될 신호(입력신호 광) 변동폭이 큰 실제적인 통신망에서 본 연구에서 고려한 SFRL을 이용한 파장변환기가 보다 유용함을 입증한다.

IV. 결 론

능동형 모드잠김 방식을 이용한 10 GHz 초단펄스 모드잠김 레이저를 입력신호 광원으로하고, 고리형 반도체 광섬유 레이저(SFRL)의 자체 발전 광을 펌프 광으로 사용하여, 이 레이

저의 공진기 안에 삽입된 반도체 광 증폭기의 4광파 혼합특성을 이용하여 광대역 파장변환기를 구현하였다. 이 구조에서 SOA는 레이저 내의 이득 매질로서 작용할 뿐만 아니라, 입력신호에 의해 변조되는 비선형 소자의 역할을 하므로서, 넓은 파장 변환 대역 및 고속의 파장 변환이 가능하게 한다. 실험결과, 고리형 반도체 광섬유 레이저 내에 삽입된 파장 가변필터를 조절하여, 연속적으로 최대 30 nm의 하향 파장 변환과 17 nm의 상향 파장변환이 가능함을 보였으며, 변환 전후의 펄스 형태를 비교한 결과 변조 형태와 무관하게 50 Gbps급 이상의 고속신호에 대한 파장변환이 가능함을 확인하였다. 또한, SFRL을 이용한 파장 변환기와 본래의 SOA 단일통과형 파장 변환기의 출력특성을 비교함으로써, SFRL을 이용한 파장변환기가 낮은 입력신호 광에 대한 파장변환이 가능하고 낮은 입력신호 광 전력에서 출력 포화특성을 보임을 확인하였다. 이는 입력신호 전력이 낮은 실제적인 통신 시스템에서 SFRL을 이용한 파장변환기가 보다 유용함을 의미한다. 또한, 펌프 광 전력을 충분히 올릴 수 있는 반도체 광 증폭기를 사용하면 보다 낮은 입력신호 전력에서 파장 변환 및 출력포화가 가능하여, 본 연구 시스템이 입력 전력에 무관한 파장 변환 장치로서 보다 많은 분야에 활발히 응용될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-00249)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Z. G. Lu, S. A. Boothroyd, and J. Chrostowski, "Tunable wavelength conversion in a semiconductor-fiber ring laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 11, pp. 806-808, 1999.
- [2] D. Zhou, P. R. Prucnal, and I. Glesk, "A widely tunable narrow linewidth semiconductor fiber ring laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 781-783, 1998.
- [3] A. D'Ottavi, P. Spano, G. Hunziker, R. Paiella, R. Dall'Ara, G. Guekos, and K. J. Vahala, "Wavelength conversion at 10 Gb/s by four-wave mixing over a 30-nm interval," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 7, pp. 952-954, 1998.
- [4] B. E. Little, H. Kuwatsuka, and H. Ishikawa, "Nondegenerate four-wave mixing efficiencies in DFB laser wavelength converters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 519-521, 1998.
- [5] D. H. Kim, S. H. Kim, Y. M. Jhon, S. Y. Ko, J. C. Jo, and S. S. Choi, "Relaxation-free harmonically mode-locked semiconductor-fiber ring laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 5, pp. 521-523, 1999.
- [6] A. D'Ottavi, E. Iannone, A. Mecozzi, S. Scotti, P. Spano, R. Dall'Ara, J. Eckner, and G. Guekos, "Efficiency and noise performance of wavelength converters based on FWM in semiconductor optical amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 357-359, 1995.
- [7] A. Uskov, J. Mork, and J. Mark, "Wave mixing in semicon-

ductor laser amplifier due to carrier heating and spectral-hole burning," *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. 30, no. 8, pp. 1769-1781, 1994.

[8] L. Y. Lin, J. M. Wiesenfeld, J. S. Perino, and A. H. Gnauck, "Polarization-insensitive wavelength conversion up to 10 Gbps based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 7, pp. 955-957, 1998.

[9] 김동환, 김상혁, 조재철, 최상삼, "반도체 광증폭기에서 발생된 4광파 혼합 신호를 이용한 10GHz 위상 동기 쿨프," 한국광학회지, 제10권 6호, pp. 507-510, 1999.

[10] 이유승, 전영민, 김동환, 장지용, 조윤조, 이 석, "10 GHz로 고조모드록킹된 고리형 어 블첨가 광섬유 레이저의 이론적 해석 및 향상된 공진기 설계," 한국광학회지, 제11권 5호, pp. 353-358, 2000.

Widely-tunable high-speed wavelength converter based on four-wave mixing in a semiconductor-fiber ring laser

Kyoung Sun Choi[†] and Dong Sun Seo

Department of Electronics, Myong-Ji University, Yongin 449-728, KOREA

[†]E-mail: cool_jime@hanmail.net

Yoo Seung Lee, Ho Jin Ki, Young Min Jhon, and Seok Lee

Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, KOREA

Dong Hwan Kim

Novera Optics, Taejon 302-223, KOREA

(Received July 3, 2001 ; revised manuscript received January 10, 2002)

We demonstrate a widely-tunable wavelength converter based on four-wave mixing in a semiconductor-fiber ring laser with no external pump light. Applying 10 GHz short pulses at -8 dBm as a probe signal, we achieve continuous wavelength tuning over the semiconductor optical amplifier gain-bandwidth reaching 30 nm down- and 17 nm up-wavelength conversion. In addition to the wide tuning capability, the converter shows high-speed conversion and low saturation power capabilities.

Classification codes : FO.020, OE.050.