

## 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기

이상용<sup>†</sup> · 김재관 · 정제명

한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

Ⓣ 133-791 서울시 성동구 행당동 17번지

장호성

단국대학교 전기전자컴퓨터공학부

Ⓣ 140-714 서울시 용산구 한남동 산 8번지

(2002년 11월 26일 받음, 2003년 3월 11일 수정본 받음)

Kerr 매질로 구성된 비선형 간섭계의 파라메트릭 증폭을 자기위상변조(self-phase modulation)를 이용하여 구하고, 사광자혼합(four-wave mixing)으로 구한 것과 등가임을 보여 파라메트릭 이득 발생에 적합함을 보였다. 또한 빛의 전파 거리에 대한 파워 이득의 변화율을 구하여 비선형 팔의 길이에 따라 이득이 포화됨을 보이고, 파라메트릭 증폭의 대역폭 특성을 비축퇴 사광자혼합(nondegenerated four-wave mixing)을 통해 분석하였다. 수치해석을 통해 자기위상변조로 구한 파라메트릭 증폭의 여러 특성을 분석하여, 전광증폭기(all-optical amplifier)와 같은 전광소자의 분석 및 설계에 적용될 수 있음을 보였다.

주제어 : nonlinear optics, self-phase modulation, optical parametric amplifier, nonlinear interferometer.

### I. 서 론

광통신 시스템에서 빛의 감쇄를 보상하는 종래의 방법은 광전 변환, 전기 신호의 증폭, 전광 변환의 과정을 거치는 것이었다. 따라서 통신 시스템의 구성이 복잡하고, 이로 인한 열손실, 잡과 지연, 전자기 간섭 등의 요소가 시스템 성능을 제한하였다. 반면, 전광 증폭(all-optical amplification)은 이러한 변환 과정이 필요없어 통신 시스템의 구성을 간단히 할 수 있을 뿐만 아니라, 전기적 신호처리에 비해 빠르고, 전기 통신의 성능 제한 요소로부터 비교적 자유롭기 때문에 많은 주목을 받고 있다.

광신호의 전광 증폭 방식에는 반도체 광증폭기(semiconductor optical amplifier, SOA), 어븀 첨가 광섬유 증폭기(erbium doped fiber amplifier, EDFA) 등과 같이 레이저 이득 매질로부터의 유도 방출(stimulated emission)을 활용한 방식과 비선형 매질에서의 Raman 산란(Raman scattering, SRS), 사광자혼합(four wave mixing, FWM) 등과 같은 유도 광산란(stimulated light scattering) 특성을 활용한 방식이 있다. 이 중 비선형 매질에서의 유도 광산란에 기초한 광증폭 방식은 레이저 광증폭 방식과 비교할 때 자발 방출 잡음(spontaneous emission noise)이 적고, 넓은 대역폭을 운영할 수 있는 등의 이점이 있어 선호되고 있다.

유도 광산란에 의한 광섬유 파라메트릭 증폭기(fiber-optical parametric amplifier, FOPA)는 FWM에 의해 세 개의 주파수( $\omega_s, \omega_p, \omega_i$ ) 성분의 조합으로 된 네 개의 광파(lightwave)를 유기한다. 즉, 주파수가  $\omega_s$ 인 신호와 주파수가  $\omega_p$ 인 펌프가 상

호작용을 하여  $\omega_p \pm (\omega_p - \omega_s)$ 의 주파수 성분을 갖는 새로운 광파를 만들어내는 것이다.  $\omega_p - \omega_p + \omega_s$ 의 주파수를 갖는 Stokes 파는 주파수가  $\omega_s$ 인 신호에 중첩되어 이득을 발생하는 반면,  $\omega_s = 2\omega_p - \omega_s$ 의 주파수를 갖는 anti-Stokes 파 또는 유티파(idler)가 두 번째 측파대에 만들어진다.<sup>[1,2]</sup> 한편 FOPA의 파라메트릭 증폭 효율은 자기-위상정합(self-phase matching)이 이루어지는 Raman 증폭기와는 달리, 빛이 비선형 물질을 통과하는 동안 네 광파의 위상정합(phase matching) 정도에 달려 있으며 그 대역폭은 펌프파워, 광섬유의 비선형성, 그리고 분산 정도 등에 의하여 결정된다.<sup>[3]</sup>

최근 FOPA는 새로운 HNLF(highly-nonlinear fiber)<sup>[4]</sup>의 개발로 인해 EDFA나 Raman 증폭기 보다 더 넓은 대역폭을 얻을 수 있고,<sup>[2,3]</sup> 위상 정합에 따른 위상에 민감한 증폭기 (phase sensitive amplifier, PSA)를 구현할 수 있다는 장점<sup>[5]</sup> 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다. 한편 Kerr 매질의 팔로 구성된 비선형 Mach-Zehnder 간섭계가 완벽한 위상 정합 조건하에서 축퇴 사광자혼합(degenerated four-wave mixing, DFWM)을 수행하여, 파라메트릭 이득을 발생시킬 뿐 아니라 펌프와 신호의 분리가 가능하다는 보고가 있다.<sup>[6]</sup> Kerr 효과를 이용한 비선형 간섭계 광증폭기의 응용으로, G. Manneberg 등은 AM 및 PM 신호에 대한 집적 Mach-Zehnder 간섭계 전광 증폭기를 최초로 제안했다.<sup>[7,8]</sup> M. E. Marhic 등은 DFWM에 의한 비선형 Sagnac 간섭계 내의 파라메트릭 이득을 알아 보았고,<sup>[9]</sup> 최근 W. Imajuku 등에 의해 PSA로써 도파로 코히어런트 증폭기(inline coherent amplifier)가 제안되었다.<sup>[10]</sup>

본 논문에서는 Kerr 매질의 팔로 구성된 비선형 간섭계 광증폭기의 파라메트릭 이득을 참고문헌 [11]과 달리 자기-위상변조(self-phase modulation, SPM)에 기초하여 해석하여 그 결과가

<sup>†</sup>E-mail: nikylee@chollian.net

DFWM에 의한 해석과 동일함을 보였다. 수치해석을 통하여 입력 신호와 펌프 사이의 초기 위상차, 입력 펌프 및 신호파워, 입출력 광분배기의 분배율 및 비선형 팔의 길이 등에 따른 파라메트릭 이득 및 출력 신호파워의 변화 등 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 여러 특성에 대해 알아 보았다. 파라메트릭 이득 대역폭에 대해서는 비축퇴 사광자혼합(nondegenerated four-wave mixing, NDFWM)으로 해석하여 그 특성을 분석하였다.

## II. 비선형 간섭계 광증폭기의 파라메트릭 이득 및 특성

그림 1은 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 기본 구성을 나타내고 있다. 간섭계의 양팔은 비선형 Kerr 매질의 단일 모드 도파로로 이루어지며, 신호  $E_{si}(=E_1)$ 와 펌프  $E_{pi}(=E_2)$ 가 각각 입력단 1과 2에 입력된다. 이때  $E_{si}$ 와  $E_{pi}$ 는 동일 편광을 가지는 기본 단일 모드와 동일한 주파수를 가정하면 각각  $E_{si}=|E_{si}|e^{j\phi_{si}}$ ,  $E_{pi}=|E_{pi}|e^{j\phi_{pi}}$ 로 표현된다. 입력된 신호와 펌프는 분배율이  $\rho_1: \sqrt{1-\rho_1^2}$ 인 광분배기 1을 통과하고, 길이가  $L$ 인 비선형 팔을 지나면서 위상 변이 및 신호 감쇄를 겪은 후, 다시 분배율이  $\rho_2: \sqrt{1-\rho_2^2}$ 인 광분배기 2를 통과하여 출력단 3과 4로 출력된다. 이때  $E_3$ 와  $E_4$ 는 각 출력단에서의 전계이다. 한편, 광분배기는 무손실이고 오직 비선형 팔에서만 신호의 감쇄 및 위상 변이가 일어나는 것으로 가정한다.

### 2.1. 자기위상변조에 의한 비선형 간섭계의 출력

그림 1의 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 출력을 비선형 매질로 이루어진 간섭계 두 팔에서의 SPM에 의한 위상 변이와 광시스템의 전송행렬(transfer matrix)을 이용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_2 & \sqrt{1-\rho_2^2} \\ \sqrt{1-\rho_2^2} & \rho_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{\Delta\phi_u} & 0 \\ 0 & e^{\Delta\phi_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_1 & -\sqrt{1-\rho_1^2} \\ \sqrt{1-\rho_1^2} & \rho_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{si} \\ E_{pi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

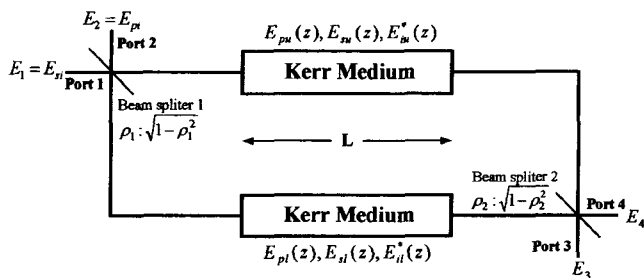


그림 1. Kerr 매질의 비선형 팔로 구성된 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기: 입력단 1과 2를 통해 광분배기 1로 입력되는 신호와 펌프는 각각  $E_{si}=|E_{si}|e^{j\phi_{si}}$ ,  $E_{pi}=|E_{pi}|e^{j\phi_{pi}}$ , 이고, 길이가  $L$ 의 비선형 Kerr 매질을 통과한 후 광분배기 2를 거쳐 출력단 3과 4를 통해 출력된다.  $E_u(0)$ 와  $E_l(0)$ 는 각각 비선형 Kerr 매질을 통과하기 전,  $E_u(L)$ 와  $E_l(L)$ 은 비선형 Kerr 매질을 통과한 후의 위팔과 아래팔에서의 전계이다.

여기서  $\rho_i(i=1,2)$ 는  $i$ 번째 광분배기에서의 분배율이다. 우변의 첫째 항은 출력 광분배기 2, 둘째 항은 비선형 매질의 팔, 셋째 항은 입력 광분배기 1의 전송행렬을 각각 나타낸다.  $e^{\Delta\phi_u}$ ,  $e^{\Delta\phi_l}$ 는 각각 비선형 팔의 위팔과 아래팔에서의 위상 변이와 감쇄를 나타낸다.

먼저 길이  $L$ 의 Kerr 매질로 이루어진 두 비선형 팔에서의 위상 변이와 감쇄는 SVEA(slow varying envelop approximation)를 적용한 비선형 Schrodinger 방정식(nonlinear Schrodinger equation)으로부터<sup>[1]</sup>

$$e^{\Delta\phi_j} = e^{j\gamma|E_j(0)|^2 L_{eff} - \alpha L} \quad (j=u, l) \quad (2)$$

으로 표현할 수 있다. 여기서  $E_u(0)$ 와  $E_l(0)$ 는 그림 1에서 볼 수 있듯이 각각 광분배기 1을 통과한 후 위팔과 아래팔에서의 전계를 나타낸다. 그리고  $\alpha$ 는 도파로의 감쇄상수, 비선형 파라미터  $\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{cA}$ ,  $A_{eff}$ 는 도파로 모드의 유효면적으로  $E_{si}$ ,  $E_{pi}$ 가 앞의 가정과 달리 서로 다른 편광을 가지거나 또는 도파로가 다중모드 일 경우에는  $A_{eff}$ 를 overlap integral<sup>[12]</sup>으로 표시하여  $E_{si}$ ,  $E_{pi}$ 의 도파로 spatial mode에 대한 영향을 고려해야 한다.  $n_2$ 는 비선형 굴절률,  $\omega_0$ 는 중심주파수,  $c$ 는 자유공간에서의 빛의 속도를 나타내고, 도파로 손실에 따른 유효길이  $L_{eff}$ 는

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-2\alpha L}}{2\alpha} \quad (3)$$

이다. 만약 도파로의 손실이 없다면 ( $\alpha=0$ ),  $L_{eff}=L$ 이다.

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 출력 전계를 구하면

$$E_3 = \rho_2 \left( \rho_1 E_{si} - \sqrt{1-\rho_1^2} E_{pi} \right) e^{j\left( \rho_1^2 |E_{si}|^2 + (1-\rho_1^2) |E_{pi}|^2 - 2\rho_1 \sqrt{1-\rho_1^2} |E_{si}| |E_{pi}| \cos \Phi \right) L_{eff} - \alpha L} + \sqrt{1-\rho_2^2} \left( \sqrt{1-\rho_1^2} E_{si} + \rho_1 E_{pi} \right) e^{j\left( (1-\rho_1^2) |E_{si}|^2 + \rho_1^2 |E_{pi}|^2 + 2\rho_1 \sqrt{1-\rho_1^2} |E_{si}| |E_{pi}| \cos \Phi \right) L_{eff} - \alpha L} \quad (4a)$$

$$E_4 = -\sqrt{1-\rho_2^2} \left( \rho_1 E_{si} - \sqrt{1-\rho_1^2} E_{pi} \right) e^{j\left( \rho_1^2 |E_{si}|^2 + (1-\rho_1^2) |E_{pi}|^2 - 2\rho_1 \sqrt{1-\rho_1^2} |E_{si}| |E_{pi}| \cos \Phi \right) L_{eff} - \alpha L} + \rho_2 \left( \sqrt{1-\rho_1^2} E_{si} + \rho_1 E_{pi} \right) e^{j\left( (1-\rho_1^2) |E_{si}|^2 + \rho_1^2 |E_{pi}|^2 + 2\rho_1 \sqrt{1-\rho_1^2} |E_{si}| |E_{pi}| \cos \Phi \right) L_{eff} - \alpha L} \quad (4b)$$

이고, 이로부터 출력 전계의 세기는

$$|E_3|^2 = e^{-2\alpha L} \times [ |E_{si}|^2 + |E_{pi}|^2 - |E_{si}|^2 ] \times (\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1^2 \rho_2^2 - 2\rho_1 \rho_2 \sqrt{1-\rho_1^2} \sqrt{1-\rho_2^2} \cos(\gamma L_{eff} \Psi)) \times (\rho_1 \sqrt{1-\rho_1^2} - 2\rho_1 \rho_2 \sqrt{1-\rho_1^2} + 2\rho_1^2 \rho_2 \sqrt{1-\rho_2^2} \cos(\gamma L_{eff} \Psi)) 2|E_{si}| |E_{pi}| \cos \Phi - \rho_2 \sqrt{1-\rho_2^2} |E_{si}| |E_{pi}| 2 \cos(\gamma L_{eff} \Psi + \Phi), \quad (5a)$$

$$|E_4|^2 = e^{-2\alpha L} \times [ |E_{pi}|^2 + |E_{si}|^2 - |E_{pi}|^2 ] \times (\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1^2 \rho_2^2 - 2\rho_1 \rho_2 \sqrt{1-\rho_1^2} \sqrt{1-\rho_2^2} \cos(\gamma L_{eff} \Psi)) - (\rho_1 \sqrt{1-\rho_1^2} - 2\rho_1 \rho_2 \sqrt{1-\rho_1^2} + 2\rho_1^2 \rho_2 \sqrt{1-\rho_2^2} \cos(\gamma L_{eff} \Psi))$$

$$2|E_{si}||E_{pi}|\cos\Phi - 2\rho_2\sqrt{1-\rho_2^2}|E_{si}||E_{pi}|\cos(\gamma L_{eff}\Psi + \Phi) \quad (5b)$$

이다. 여기서  $\Psi = |E_{si}|^2(2\rho_1^2 - 1) + |E_{pi}|^2(1 - 2\rho_1^2) - 4\rho_1\sqrt{1-\rho_1^2}|E_{si}||E_{pi}|\cos\Phi$ 이고,  $\Phi (= \phi_{si} - \phi_{pi})$ 는 신호와 펌프 간의 초기 위상차이다.

식 (4)와 (5)에서  $\rho_1 = \rho_2$ 이고, 입력 신호  $E_{si}$ 와 입력 펌프  $E_{pi}$ 가 위상 변이를 유도하기에 너무 작은 파워일 때, 비선형 간섭계는 평형(balanced)이 된다. 이때  $E_3, E_4$ 는 각각  $E_1, E_2$ 와 동일해지며, 입력 신호가 그대로 투과(transparent)하는 현상을 보인다. 한편 입력 펌프파워가 충분히 크면, 비선형 간섭계는 불평형(imbalanced)이 되고 광분배기의 분배율에 따라 출력단 3으로 펌프파워가 전이되어 출력된다. 이러한 출력은 펌프파워 광분배기의 분배율, 비선형 팔의 길이에 대한 함수이며, 입력 신호와는 무관하다. 따라서 출력단 3에서 이러한 전이된 펌프파워를 제거한 출력이 실제적인 출력 신호 ( $E_{so}$ )이라 할 수 있다.

## 2.2 비선형 간섭계의 파라메트릭 이득 및 대역폭 특성

### 2.2.1 파라메트릭 이득 특성

입력 신호  $E_{si}$ 에 대하여 입력 펌프  $E_{pi}$ 가 Kerr 효과를 유도하기에 충분히 큰 파워를 갖는 경우, 도파로 손실이 없다고 가정하면 식 (5)로부터 펌프파워의 전이성분을 제거한 입력 신호에 대한 출력 신호의 파워 이득  $G_p$ 는

$$G_p = 1 - (\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1^2\rho_2^2\sqrt{1-\rho_1^2}\sqrt{1-\rho_2^2}\cos(\gamma L_{eff}\Psi)) - 2\left\{(\rho_1\sqrt{1-\rho_1^2} - 2\rho_1\rho_2^2\sqrt{1-\rho_1^2} + 2\rho_1^2\rho_2\sqrt{1-\rho_2^2}\cos(\gamma L_{eff}\Psi)) - \rho_2\sqrt{1-\rho_2^2}\cos(\gamma L_{eff}\Psi + \Phi)\right\}\frac{|E_{pi}|}{|E_{si}|} \quad (6)$$

이다.

$\rho_1 = \rho_2 = 1/\sqrt{2}$  일 때는, 식 (4)로부터

$$E_3 = [E_{si}\cos(\Delta\Phi_{NL}) + jE_{pi}\sin(\Delta\Phi_{NL})] \times \exp\left[j\frac{\gamma}{2}(|E_{si}|^2 + |E_{pi}|^2)L_{eff} - \alpha L\right] \quad (7a)$$

$$E_4 = [E_{pi}\cos(\Delta\Phi_{NL}) + jE_{si}\sin(\Delta\Phi_{NL})] \times \exp\left[j\frac{\gamma}{2}(|E_{si}|^2 + |E_{pi}|^2)L_{eff} - \alpha L\right] \quad (7b)$$

이고, 이때 비선형 위상변이  $\Delta\Phi_{NL} = \gamma L_{eff}|E_{si}||E_{pi}|\cos\Phi$ 이다. 식 (7)은 참고문헌 [11]의 DFWM으로 구한 비선형 간섭계의 출력과 동일하다. 또한 입력 펌프파워가 입력 신호파워보다 매우 크기 때문에  $E_{pi} \gg E_{si}$ 로 가정할 수 있으며, 비선형 위상변이  $|\Delta\Phi_{NL}| \ll 1$ 인 경우, 식 (7a)는 다음과 같이 근사된다.

$$E_3 \approx e^{j\frac{\gamma}{2}L_{eff}|E_{pi}|^2 - \alpha L} (1 + je^{j\Phi}\gamma L_{eff}|E_{pi}|^2 \cos\Phi)E_{si} \quad (8)$$

도파로 손실이 없다고 가정하면, 입력신호에 대한 출력신호의

파워 이득  $G_p$ 는

$$G_p = 1 + \Delta\Phi^2 \cos^2\Phi - 2\Delta\Phi \sin 2\Phi \quad (9)$$

로 쓸 수 있다. 이때  $\Delta\Phi = \gamma L_{eff}|E_{pi}|^2$ 는 펌프에 의해 발생하는 비선형 위상 변이이다. 식 (9)에서 파워 이득  $G_p$ 는 펌프파워에 의해 발생하는 비선형 위상 변이  $\Delta\Phi$ 와 입력 신호와 펌프의 초기 위상차  $\Phi$ 에 대한 함수임을 알 수 있다. 즉 식 (9)는 비선형 간섭계 광증폭기의 파라메트릭 이득이 신호와 펌프의 초기 위상차  $\Phi$ 에 대한 PSA 임을 보여준다.

한편, 비선형 위상 변이  $|\Delta\Phi_{NL}|$ 이 충분히 큰 경우, 식 (6)은

$$G_p = \frac{1}{2}\left[1 + \cos(2\Delta\Phi_{NL}) - 2\frac{|E_{pi}|}{|E_{si}|}\sin(2\Delta\Phi_{NL})\sin\Phi\right] \quad (10)$$

이 되고, 이때 파워 이득  $G_p$ 의 비선형 팔의 길이에 대한 변화율을 구하면

$$\frac{dG_p}{dL} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \sin(2\Delta\Phi_{NL} - \theta) \quad (11)$$

이 된다. 여기서  $\alpha = -\gamma|E_{si}||E_{pi}|\cos\Phi$ ,  $\beta = -\gamma|E_{pi}|^2\sin 2\Phi$ ,  $\theta = \tan^{-1}\frac{\beta}{\alpha}$ 이다. 식 (11)로부터 비선형 팔의 길이에 의한 파워 이득  $G_p$ 의 첨두치는 비선형 팔의 길이  $L$ 이 0보다 큰 양수이므로  $2\Delta\Phi_{NL} - \theta = \pi$ , 혹은  $\Delta\Phi_{NL} = \frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{2}$ 일 때 발생함을 알 수 있다. 동위상의 경우, 비선형 위상 변이는  $\frac{\pi}{2}$ 이므로 이득이 최대가 되는 비선형 팔의 특성 길이(characteristic length)  $L_c$ 는

$$L_c = \frac{\pi}{2\gamma|E_{si}||E_{pi}|} \quad (12)$$

이다.

### 2.2.2 파라메트릭 이득의 대역폭 특성

식 (9)에서 알 수 있는 것처럼 광섬유에서의 파라메트릭 이득은 이완 시간이 수십 fs 정도인 비선형 굴절률  $n_2$ 에 대한 함수이므로, 증폭기는 원천적으로 광대역이고 고속이다. 앞 절의 SPM을 적용한 분석에 있어, 광 신호는 quasi-monochromatic한 것으로 가정하였다. 즉, 중심주파수가  $\omega_0$ 이고 스펙트럼 폭이  $\Delta\omega/\omega_0 \ll 1$ 이라고 가정하였으며, 이는  $\omega_0$ 가 약 1000 THz에 근접하므로 신호의 스펙트럼 폭이 약 10 THz보다 좁은 경우에 유효하다. 이것은 변조 주파수가 수 THz에 달하는 신호에 대해 SVEA를 적용한 해석이 가능함을 의미하고, 따라서 이 증폭기의 대역폭은 수 THz가 될 수 있다.

그림 2는 NDFWM으로 해석한 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 구성을 보여준다.  $E_{pu}$ 와  $E_{pl}$ 은 비선형 매질의 위 팔과 아래팔에서의 펌프,  $E_{su}$ 와  $E_{sl}$ 은 비선형 팔을 통과하는 신호,  $E_{iu}^*$ 와  $E_{il}^*$ 은 FWM에 의한 유희파이다.

위팔에서 주파수  $\Omega$ 로 변조된 AM 신호를 고려하면, 입력 신호  $E_{si}$ 를 신호와 유희파의 중첩으로 생각할 수 있다. 따라서 위쪽 팔에서의 FWM은 주파수  $\omega_0$ 에서 강한 파워의 펌프( $E_{pu}(z, t)$ )와 약한 파워의 신호파( $E_{su}(z, t)$ ) 및 유희파( $E_{iu}^*(z, t)$ ) 간의 상호작용으로 발생할 것이다. 따라서 위쪽 팔에서의 전계  $E_u(z, t)$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$E_u(z, t) = \frac{1}{2} [E_{pu}(z, t) \exp[j(k_p z - \omega_0 t)] + E_{su}(z, t) \exp[j(k_1 z - \omega_1 t)] + E_{iu}^*(z, t) \exp[j(k_2 z - \omega_2 t)] + c.c.] \quad (13)$$

여기서  $\omega_p$ 는 반송파 혹은 펌프 주파수이고,  $\omega_1 = \omega_0 - \Omega$ ,  $\omega_2 = \omega_0 + \Omega$ 이며,  $\Omega$ 는 변조 주파수이다. 펌프와 두 측파대(side band)의 파수(wave number)는 각각  $k_p$ ,  $k_1$ 과  $k_2$ 이다.

이때 펌프파워가 신호에 비해 충분히 크고 ( $|E_{su}|, |E_{iu}^*| \ll |E_{pu}|$ ), 펌프 고갈(pump depletion)이 없으며, 변조 주파수가 펌프 주파수에 비해 충분히 작은 경우 ( $\Omega \ll \omega_0$ ), SVEA를 적용하면 FWM에 의한 결합 파동 방정식(coupled wave equations)은

$$\frac{\partial E_{su}}{\partial z} = j2\gamma_{1,s} |E_{pu}|^2 E_{pu} \quad (14a)$$

$$\frac{\partial E_{su}}{\partial z} = j2\gamma_{1,s} |E_{pu}|^2 E_{su} + j\gamma_{1,i} E_{pu}^2 E_{iu}^* e^{-j\Delta k z} \quad (14b)$$

$$\frac{\partial E_{iu}^*}{\partial z} = -j2\gamma_{2,i} |E_{pu}|^2 E_{iu}^* - j\gamma_{2,s} E_{pu}^* E_{su} e^{j\Delta k z} \quad (14c)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서  $\gamma_{m,j} = \frac{n_2 \omega_m}{c A_{eff}}$  ( $m=0, 1, 2$  and  $j=0, s, i$ )이다.  $A_{eff}$ 는 각각 펌프, 신호, 유희파에 대한 overlap integral<sup>[12]</sup>로 표시한다. 식 (14)를 간단히 풀기 위해서 단일 모드 도파로로 가정하면  $\gamma_{m,j} \cong \gamma_{0,0} = \gamma$ 로 거의 일정하게 되며, 변수  $B_j = E_j e^{-j2\gamma |E_{pu}|^2 z}$  ( $j=pu, su, iu$ )를 도입하면, 결합 파동 방정식의 해는 다음과 같이 표현된다.

$$B_{su} = \left[ X_{su} e^{\sqrt{(\gamma |E_{pu}|^2)^2 - \left(\frac{\kappa}{2}\right)^2} z} + X_{su} e^{-\sqrt{(\gamma |E_{pu}|^2)^2 - \left(\frac{\kappa}{2}\right)^2} z} \right] e^{-j\frac{\kappa}{2} z} \quad (15a)$$

$$B_{iu}^* = \left[ X_{iu} e^{\sqrt{(\gamma |E_{pu}|^2)^2 - \left(\frac{\kappa}{2}\right)^2} z} + X_{iu} e^{-\sqrt{(\gamma |E_{pu}|^2)^2 - \left(\frac{\kappa}{2}\right)^2} z} \right] e^{j\frac{\kappa}{2} z} \quad (15b)$$

이때 위상부정합  $\kappa = \Delta k + 2\gamma |E_{pu}|^2$  이고,  $X_{su}, X_{iu}, Y_{su}, Y_{iu}$ 는 각각 경계조건으로부터 구해진다. 아래팔에서도 같은 방법으로 해를 구할 수 있고, 그림 2에서 보는 것과 같이 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 전체 광시스템을 고려하면, 출력단에서의 전계는 각각

$$E_3 = \rho_2 (B_{su}(L) + B_{iu}^*(L) + B_{pu}(L)) + \sqrt{1 - \rho_2^2} (B_{sl}(L) + B_{il}^*(L) + B_{pl}(L)) \quad (16a)$$

$$E_3 = \rho_2 (B_{su}(L) + B_{iu}^*(L) + B_{pu}(L)) + \sqrt{1 - \rho_2^2} (B_{sl}(L) + B_{il}^*(L) + B_{pl}(L)) \quad (16b)$$

로 표현된다. 이때 각각의 변수는

$$B_{sj}(z) = [X_{sj} e^{g_j z} + Y_{sj} e^{-g_j z}] e^{-j\frac{\kappa_j}{2} z} \quad (17a)$$

$$B_{ij}^*(z) = [X_{ij} e^{g_j z} + Y_{ij} e^{-g_j z}] e^{j\frac{\kappa_j}{2} z} \quad (17b)$$

$$B_{pj}(z) = |E_{pj}| e^{-j\gamma |E_{pj}|^2 z} \quad (j = u \text{ (upper arm)}, l \text{ (lower arm)}) \quad (17c)$$

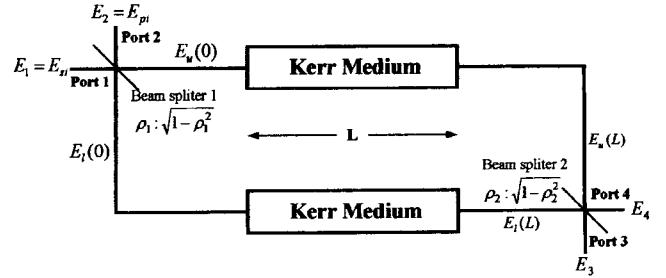


그림 2. 비축퇴 사광자혼합으로 해석한 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기:  $E_{pu}(0), E_{su}(0), E_{iu}^*(0)$ 와  $E_{pl}(L), E_{sl}(L), E_{il}^*(L)$ 은 각각 비선형 Kerr 매질을 통과하기 전후의 위팔과 아래팔에서의 펌프, 신호, 유희파의 전계이다.

이다. 또한 경계조건으로부터

$$X_{sj} = \frac{(g_j + j\frac{\kappa_j}{2}) B_{sj}(0) + j\gamma |B_{pj}(0)|^2 B_{ij}^*(0)}{2g_j} \quad (18a)$$

$$X_{sj} = \frac{(g_j - j\frac{\kappa_j}{2}) B_{sj}(0) - j\gamma |B_{pj}(0)|^2 B_{ij}^*(0)}{2g_j} \quad (18b)$$

$$X_{ij} = \frac{-j\gamma |B_{pj}(0)|^2 B_{sj}(0) + (g_j - j\frac{\kappa_j}{2}) B_{ij}^*(0)}{2g_j} \quad (18c)$$

$$X_{ij} = \frac{j\gamma |B_{pj}(0)|^2 B_{sj}(0) + (g_j + j\frac{\kappa_j}{2}) B_{ij}^*(0)}{2g_j} \quad (j = u, l) \quad (18d)$$

이고, 파라메트릭 이득 계수와 위상 부정합은 각각

$$g_j = \sqrt{(\gamma |B_{pj}(0)|^2)^2 - \left(\frac{\kappa_j}{2}\right)^2} \quad (19a)$$

$$\kappa_j = \Delta k_j + 2\gamma |B_{pj}(0)|^2 \quad (j = u, l) \quad (19b)$$

이다. 여기서  $B_{sj}(0), B_{ij}^*(0), B_{pj}(0)$ 는 각각 광분배기 1을 지난 후 위팔과 아래팔에서의 신호, 유희파, 펌프의 전계에 대한 변수이다.

입출력 광분배기의 분배율이 50:50인 경우, 유희파의 초기파워가 이라고 가정하면, 출력 신호의 파워 이득은 식 (15)와 식 (16)으로부터

$$G_p = 1 + \left[ \frac{\gamma |E_{pl}|^2}{g} \sinh gL \right]^2 \quad (20)$$

과 같이 표현된다.

위상 정합 ( $\Delta k = k_1 + k_2 - 2k_p = 0$ )일 때는 결합 파동 방정식의 해법과 AM 신호라는 가정 ( $E_{su}^*(0) = E_{iu}(0)$ )으로부터

$$E_{su}(L) = E_{su}(0) [1 + j2\gamma L |E_{pu}|^2] \exp(-j\gamma L |E_{pu}|^2) \quad (21a)$$

$$E_{iu}^*(L) = E_{iu}^*(0) [1 - j2\gamma L |E_{pu}|^2] \exp(j\gamma L |E_{pu}|^2) \quad (21b)$$

를 구할 수 있다. 아래팔에서도 같은 방법으로 전계를 구할 수 있고, 그림 2의 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 전

체 광시스템을 고려하면, 광분배기 2를 통과한 출력단에서의 전리는 각각

$$E_3 = \rho_2(E_{su}(L) + E_{iu}^*(L) + E_{pu}(L)) + \sqrt{1 - \rho_2^2}(E_{sl}(L) + E_{il}^*(L) + E_{pl}(L)), \quad (22a)$$

$$E_2 = \sqrt{1 - \rho_2^2}(E_{su}(L) + E_{iu}^*(L) + E_{pu}(L)) + \rho_2(E_{sl}(L) + E_{il}^*(L) + E_{pl}(L)) \quad (22b)$$

이다. 이때 각각의 변수는

$$E_{ij}(L) = E_{pj}(0) \exp(-j\gamma L |E_{pj}|^2), \quad (23a)$$

$$E_{ij}(L) = E_{sj}(0) [1 + j2\gamma L |E_{pj}|^2] \exp(-j\gamma L |E_{pj}|^2), \quad (23b)$$

$$E_{ij}^*(L) = E_{ij}^*(0) [1 - j2\gamma L |E_{pj}|^2] \exp(j\gamma L |E_{pj}|^2) \quad (23c)$$

이다.  $E_{sj}(0)$ ,  $E_{ij}^*(0)$ ,  $E_{pj}(0)$ 는 각각 광분배기 1을 통과한 후 위 팔과 아래팔에서의 신호, 유티파, 펌프의 전계이다. SPM을 이용한 분석에서와 같이 광분배기라고 가정하면  $E_{pu}(0) = E_{pl}(0) = E_{pj} / \sqrt{2}$ ,  $E_{su}(0) = -E_{sl}(0)$ ,  $E_{iu}^*(0) = -E_{il}^*(0)$ 이다. 이로부터  $E_{su}(0) + E_{iu}^*(0) = -(E_{sl}(0) + E_{il}^*(0)) = E_{sl} / \sqrt{2}$  임을 적용하면, 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 출력은 다음과 같다.

$$E_3 = e^{j\frac{\gamma}{2}L|E_{pl}|^2} E_{sl} [1 + j\gamma L |E_{pl}|^2]. \quad (24)$$

따라서 위상 정합인 경우 비선형 간섭계 광증폭기의 전체 광시스템의 파라메트릭 이득  $G_p$ 는

$$G_p = 1 + (\gamma L |E_{pl}|^2)^2 \quad (25)$$

이고, 식 (25)는 동위상인 경우 식 (9)의 SPM으로 구한 파라메트릭 이득과 같은 결과를 보인다. 식 (25)로부터 파라메트릭 이득은 펌프파워와 비선형 팔의 길이에 대한 함수임을 알 수 있다. 식 (24)와 2.2.1절의 SPM으로 해석한 출력 신호의 식 (8)은 동위상인 경우 하나의 펌프와 두 개의 측파대 (파라메트릭 상호작용을 하는 신호와 유티파) 사이의 NDFWM으로써 이해할 수 있고, 따라서 SPM과 NDFWM에 기초한 접근 방식이 같은 결과를 도출한다는 것을 알 수 있다.

### III. 수치해석 결과

본 논문에서는 먼저 입출력 분배기의 분배율이 50:50인 경우 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 입력 신호파워, 초기 위상차, 비선형 팔의 길이에 대한 파라메트릭 이득 특성에 대해 알아 보았다. 그리고 입출력 광분배기의 분배율에 대한 출력단에서의 출력 신호파워, 파라메트릭 이득 및 출력 위상 등 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 출력 특성을 살펴 보았으며, 또한 NDFWM을 적용하여 비선형 팔의 길이와 파라메트릭 이득 및 대역폭의 관계를 고찰하였다.

그림 3은 식 (4)에 대해서 광분배기의 분배율이 50:50일 때 비선형 간섭계 광증폭기의 파라메트릭 이득 특성을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 비선형 팔의 길이가  $L = 10$  m인 경우, 입력 신호파워가 0에서 1 mW까지 변할 때의 출력 신호파워를 주어진 몇 가지 펌프파워에 대해 알아 본 것으로, 입력 신호가

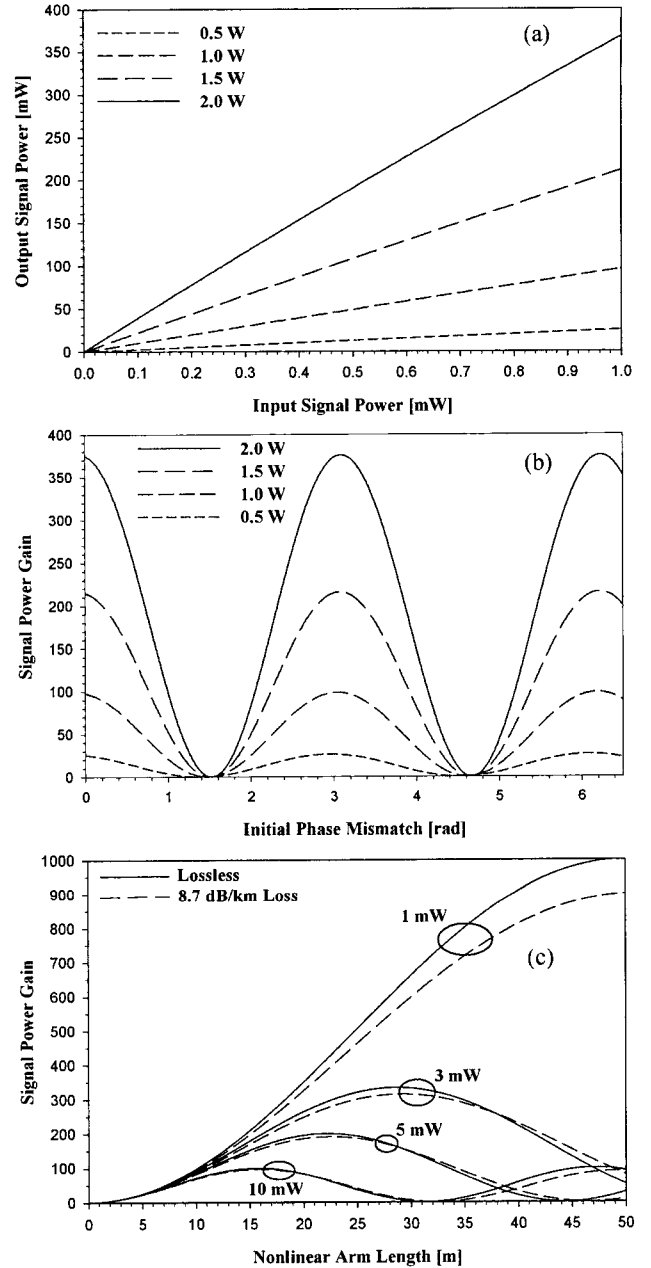


그림 3. 입출력 광분배기의 분배율이 50:50일 때의 파라메트릭 이득 특성. (a)  $L = 10$  m인 경우, 주어진 펌프파워에서의 입출력 신호파워의 특성. (b)  $L = 10$  m이고, 입력 신호파워가 1 mW일 때 경우, 주어진 펌프파워에서의 초기 위상차에 대한 파라메트릭 이득 특성. (c) 펌프파워가 1 W일 때, 주어진 입력 신호파워에서의 비선형 팔의 길이  $L$ 에 따른 파라메트릭 이득 특성.

증가함에 따라 출력 신호가 선형적으로 증가하므로 이 구간에서 선형 증폭기로 활용할 수 있을 것이다. 또한, 입력 펌프파워가 증가할수록 파라메트릭 이득이 커지고 있으므로, 이득 효율을 향상시키기 위해서는 펌프파워를 증가시켜야 함을 알 수 있다. 그림 3(b)는 비선형 팔의 길이가  $L = 10$  m일 때, 초기 위상차에 대한 파라메트릭 이득의 변화를 알아 본 것으로, 입력 신호파워는 1 mW로 가정하였다. 그림 3(a)와 마찬가지로

펌프파워가 클수록 파라메트릭 이득이 커지는 것을 볼 수 있으며, 입력 신호와 펌프간의 초기 위상차가 0와  $\pi$  부근에서 파라메트릭 이득이 최대가 되고,  $\frac{\pi}{2}$  부근으로 갈수록 급격히 감소하여 이득이 0에 근접하는 것을 볼 수 있다. 하지만 이득이 1이 되는 지점은 펌프파워에 관계없이  $\frac{\pi}{2}$ 와  $\frac{3}{2}\pi$ 로 동일하다. 파라메트릭 이득이 초기 위상차  $\Phi$ 가 0나  $\pi$ 에서 최대가 되지 않는 것은 비선형 위상 변이가 신호 및 펌프파워, 그리고 비선형 팔의 길이에 대한 함수로서 초기 위상차와 정확하게 일치하지 않기 때문이다. 그림 3(b)에서 알 수 있듯이 파라메트릭 이득이 초기 위상차  $\Phi$ 에 대해 크게 변하고 있으므로 PSA로써 응용이 가능할 것이다. 그림 3(a)와 그림 3(b)을 통해 파라메트릭 이득을 높이기 위해서는 펌프파워를 크게 하고, 초기 위상차를 줄여야 함을 알 수 있고, 이러한 수치해석 결과는 식 (9)에서의 이득을 높이기 위한 조건과 일치한다. 그림 3(c)는 펌프파워를 1 W로 고정된 상태에서 주어진 신호파워에 대해 비선형 팔의 길이  $L$ 에 따른 파라메트릭 이득을 보인 것이다. 도파로의 손실이 있는 경우( $\alpha=8.7$  dB/km), 손실만큼 파라메트릭 이득이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 입력 신호파워가 작을수록(즉 펌프와 신호의 비율이 클수록) 파라메트릭 이득은 커지고, 이득이 포화되는 거리도 길어진다. 그림 3을 통해 알 수 있는 것처럼, 파라메트릭 이득은 펌프파워와 초기 위상차, 그리고 비선형 팔의 길이에 대한 함수이다. 펌프 및 신호파워, 그리고 초기 위상차가 결정된 조건에서는 비선형 팔의 길이를 과도하게 늘리는 것은 이득을 높히는데 도움이 되지 않을 뿐만 아니라 오히려 이득을 감소시키는 원인이 될 수도 있다. 따라서 높은 효율의 파라메트릭 이득을 얻기 위해서는 적당한 비선형 매질 길이의 선택과, 적절한 펌프 및 초기 위상차의 조절이 중요하다.

그림 4는 분배기의 분배율이 파라메트릭 이득에 미치는 영향을 알아보기 위해, 펌프파워가 1 W이고, 신호파워가 1 mW 일 때, 주어진 초기 위상차에 대해 입출력 분배기의 분배율을 10:90에서 90:10까지 변화시켜 가면서 비선형 간섭계의 파라메트릭 이득과 출력 신호파워, 출력 위상을 관찰한 것이다. 주어진 초기 위상차에 대해 파라메트릭 이득은 크게 변하지만, 출력 신호파워는 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 이것은 입출력 분배기의 분배율이 50:50이 아닌 경우 입력 분배기에서 비대칭으로 나뉘어진 펌프파워가 위아래 두 비선형 팔에서 서로 다른 위상 변이를 일으키고, 이로 인해 펌프파워의 일부가 출력 분배기에서 출력 신호와 합쳐져 출력되기 때문이다. 하지만 특이점 A, B를 살펴보면 초기 위상차에 따른 출력 위상은 서로 많은 차이가 있지만, 파라메트릭 이득과 출력 신호파워는 상대적으로 작은 차이를 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 AM 변조 시에 특이점 A, B에서의 분배율을 입출력 광분배기에 사용할 경우, 제시한 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기는 초기 위상차에 무관한 증폭 특성을 얻을 수 있을 것이다.

그림 5는 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 입출력 광분배기의 분배율( $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ )에 대한 입력 신호와 펌프파워, 그리고 비선형 팔의 길이에 대한 출력단 3에서의 출력을 본 것이다. 식 (5)와 그림 5를 통해 알 수 있듯이 출력단 3으로

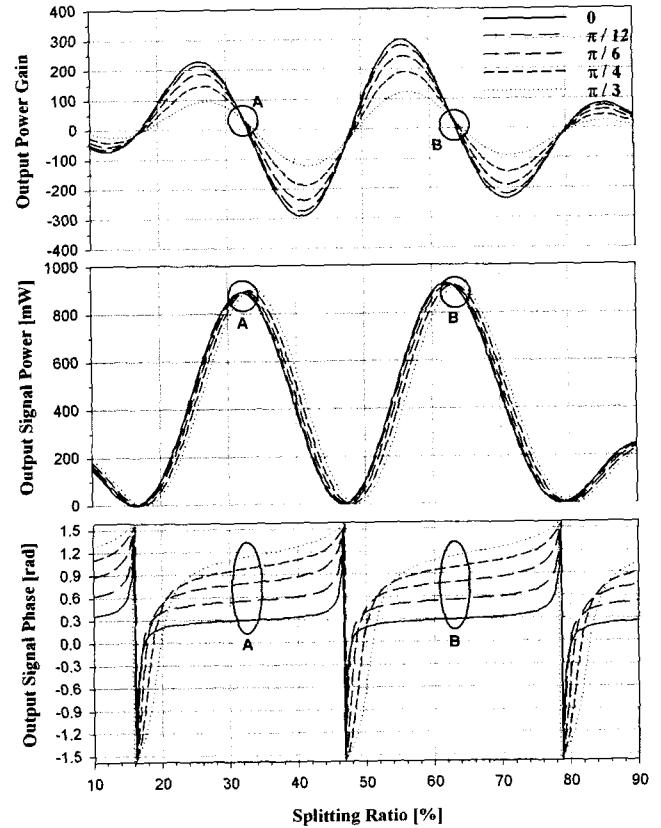


그림 4. 선택된 초기 위상차  $\Phi$ 에 대한 입출력 광분배기의 분배율에 따른 비선형 간섭계 광증폭기의 파라메트릭 이득, 출력 신호파워, 출력 위상 특성(펌프파워  $P_{p1} = 1$  W, 입력 신호파워  $P_{s1} = 1$  mW, 비선형 팔의 길이  $L = 10$  m).

전이된 펌프파워는 입력 신호와는 무관한 입출력 광분배기의 분배율, 입력 펌프파워, 그리고 비선형 팔의 길이에 대한 함수이다. 그림 5(a)는 펌프파워가 1 W, 비선형팔의 길이  $L = 10$  m 일 때, 주어진 입력 신호파워에 대한 출력단 3에서의 펌프파워의 전이 성분과, 그것을 제거한 신호파워를 본 것이다. 출력단 3으로 전이된 펌프파워는 입력 신호파워에 무관하게 같은 값인 것을 볼 수 있다. 또한 최대 출력 신호파워를 얻는 광분배기의 분배율은 50:50을 벗어나 있음을 볼 수 있는데, 이러한 분배율을 이용해 보다 높은 출력을 가지는 전광 증폭기를 설계할 수 있을 것이다. 그림 5(b)와 그림 5(c)는 입력 신호파워가 1 mW일 때, 펌프파워와 비선형 팔의 길이가 광분배기의 분배율에 대해서 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 출력에 미치는 영향을 살펴본 것이다. 그림에서 전이된 펌프파워가 입력 펌프파워와 비선형 팔의 길이, 그리고 광분배기의 분배율에 따라 변하는 것을 볼 수 있고, 입력 펌프파워가 클수록 또는 비선형 팔의 길이가 길수록 최대 출력을 가지는 분배율이 50:50에 가까워짐을 볼 수 있다.

그림 6은 입출력 광분배기의 분배율이 50:50일 때, 벌크 실리카(bulk silica) 광섬유( $\gamma = 2 \times 10^{-3} \text{m}^{-1} \text{W}^{-1}$ )에 대해서 식 (20)에 의한 NDFWM으로 해석한 파라메트릭 이득을 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 주어진 비선형 팔의 길이  $L$ 에 대한 이상적인 이득

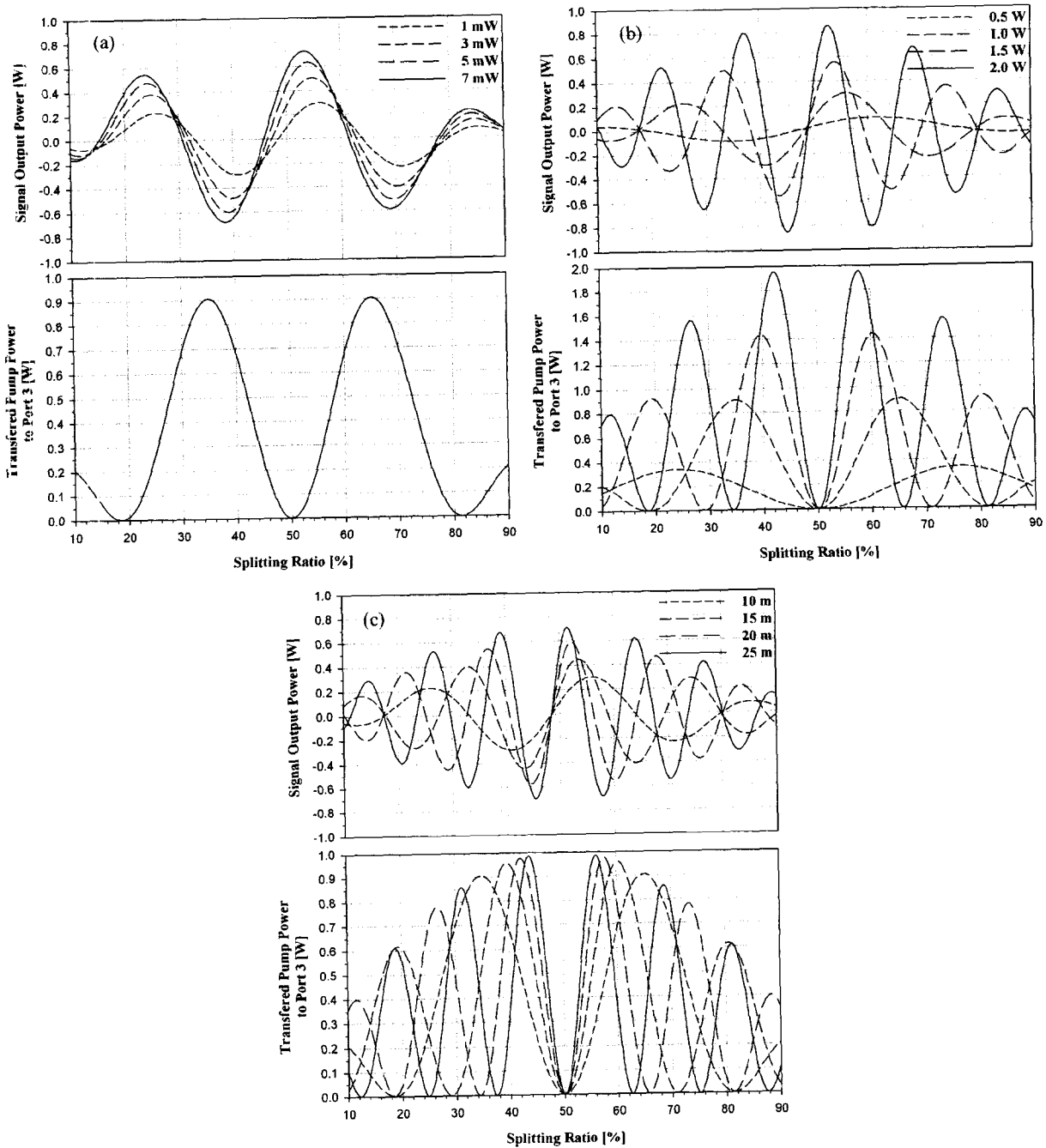


그림 5. 입출력 광분배기의 분배율에 따른 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기의 출력단 3으로 전이된 펌프파워 및 이를 제거한 출력 신호 특성. (a) 주어진 입력 신호파워에서의 광분배율에 따른 출력단 3에서의 출력 신호 및 전이된 펌프파워. (b) 주어진 펌프파워에서의 광분배율에 따른 출력단 3에서의 출력 신호 및 전이된 펌프파워. (c) 주어진 비선형 팔의 길이에서의 광분배율에 따른 출력단 3에서의 출력 신호 및 전이된 펌프파워.

대역폭을 나타낸 것인데, 그림에서 알 수 있듯이 비선형 팔의 길이  $L$ 에 따라 이득은 높아지지만 대역폭은 좁아진다. 주어진 비선형 팔의 길이에 따른 대역폭은 200, 400, 600, 800 m일 때 대략 3300, 2300, 1850, 1600 GHz 정도이다. 그림 6(b)는 주어진 펌프파워에 대해 신호의 대역폭을 구한 것인데, 같은 비선형 팔의 길이에 대해서 펌프파워가 클수록, 또는 비선형 팔의 길이가 길어질수록 대역폭이 좁아지는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 비선형 매질의 팔로 구성된 간섭계 광증폭기의 파라메트릭 이득을 SPM과 NDFWM으로 구하여 그 결과가 서로 동일함을 보였다. 펌프파워와 초기 위상차, 분배기의 분배율에 대한 파라메트릭 이득의 특성을 분석하였고, 비선형 팔의 길이에 대한 파라메트릭 이득의 포화 특성을 알아 보았

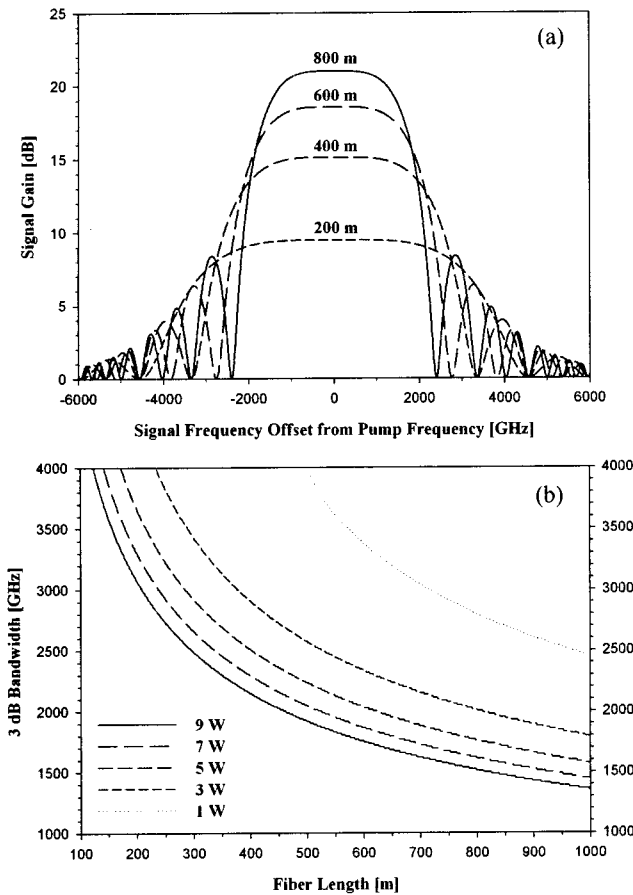


그림 6. 벨크 실리카 ( $\gamma = 2 \times 10^3 \text{ m}^{-1} \text{ W}^{-1}$ ) 광섬유의 길이에 따른 이상적인 이득-대역폭. (a) 광섬유의 길이에 따른 파라메트릭 이득-대역폭 스펙트럼. (b) 펌프파워에 대한 광섬유의 길이에 따른 3 dB 대역폭.

다. 또한 NDFWM으로 펌프파워와 비선형 팔의 길이에 대한 파라메트릭 이득의 대역폭에 대해서도 알아 보았다.

수치해석을 통하여 입력 펌프파워가 증가할수록 파워 이득이 좋아지고, 같은 펌프 파워에 대해서 입력 신호에 대해 출력 신호가 선형적으로 증가하는 것을 보임으로써 선형 증폭기로 사용할 수 있음을 보였다. 초기 위상차가 적을수록 이득이 커지고, 위상차가 커짐에 따라 파워 이득이 급격히 감소하여  $\frac{\pi}{2}$  부근에서는 펌프파워에 관계없이 이득이 없음을 보여 PSA 임을 보였다. 펌프파워와 초기 위상차에 대해서 파워 이득이 비선형 매질의 길이에 대해 포화되는 것을 보였고, 그리고 비선형 팔의 길이를 특성 길이 이상 늘이는 것은 오히려 이득을 감소시킴을 보였다. 이로써 높은 이득 효율을 얻기 위해서는 펌프파워를 증가시키고 초기 위상차를 줄이는 동시에, 비선형 팔의 길이를 조절하는 것 또한 중요함을 알 수 있었다. 광분배기의 분배율에 의하여 광증폭기의 출력, 파라메트릭 이득, 출력 위상 등이 변화하므로 분배율을 조절하여 최적의 이득 조건을 얻는 것 또한 비선형 간섭계 광증폭기의 설계에 있어 중요한 고려 사항을 알 수 있었다.

광섬유를 이용하여 비선형 간섭계 파라메트릭 광증폭기를 광통신 시스템에 적용할 경우, 장거리 송수신 시스템에서 광/전

및 전/광 변환을 요하는 증계기를 대체할 수 있고, 다수의 가입자가 있는 다중 채널 망에서 사용될 경우, 삽입 손실과 전력 산란을 보상하는 전치 증폭기로 사용될 수 있는 등의 이점이 있다. HNLF의 개발과 동시에 높은 광 파워의 활용성의 증가로 광섬유의 비선형성에 기초한 많은 새롭고 상업적으로 실용적인 응용이 실현될 전망이다. 일반적으로 비선형 파라메트릭 상호 작용의 비선형 파라미터  $\gamma$ 는 도파로에서의 각 진행파의 공간 모드(spatial mode), 편광 등에 의해 결정되므로 비선형 매질로서 편광유지 단일 모드 광섬유를 사용하는 것이 증폭효율을 높일 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 2000년도 한양대학교 교비학술연구비로 이루어진 연구입니다.

### 참고문헌

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Third edition, Academic Press, New York, 2001).
- [2] J. Hansryd, P. A. Andrekson, P.-O. Hedekvist, J. Li, and M. Westlund, "Optical parametric amplifiers and their applications," *Optical Fiber Communication Conference '02*, Optical Society of America, Anaheim, USA, 2002, Tu S1.
- [3] M. E. Marhic, N. Kagi, T.-K. Chiang, and L. G. Kazovsky, "Broadband fiber optical parametric amplifier," *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 573-575, 1996.
- [4] M. Onishi, T. Okuno, T. Kashiwada, S. Ishikawa, N. Akasaka, and M. Nishimura, "Highly nonlinear dispersion-shifted fibers and their application to broadband wavelength converter," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 4, pp. 204-214, 1998.
- [5] W. Imajuku and A. Takada, "Reduction of fiber-nonlinearity-enhanced amplifier noise by means of phase-sensitive amplifiers," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 31-33, 1997.
- [6] M. Shirasaki and H. A. Haus, "Squeezing of pulses in a nonlinear interferometer," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 7, pp. 30-34, 1990.
- [7] G. Manneberg, M. Kull, and S. Lindquist, "An all-optical amplifier for terahertz AM signals: a proposal," *J. Lightwave Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 236-242, 1987.
- [8] M. Kull and G. Manneberg, "Integrated optical amplifier for fast phase modulated signals," *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 331-335, 1989.
- [9] M. E. Marhic, C. H. Hsia, and J.-M. Jeong, "Optical amplification in a nonlinear interferometer," *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 210-211, 1991.
- [10] W. Imajuku, A. Takada, and Y. Yamabayashi, "Inline coherent optical amplifier with noise figure lower than 3dB quantum limit," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 1, pp. 63-64, 2000.
- [11] M. E. Marhic and C. H. Hsia, "Optical amplification and squeezed-light generation in fibre interferometers performing degenerate four-wave mixing," *Quantum Opt.*, vol. 3, pp. 341-358, 1991.
- [12] R. H. Stolen and J. E. Bjorkholm, "Parametric amplification and frequency conversion in optical fibers," *J. IEEE. Quantum Electron.* QE-18, pp. 1062-1071, 1982.



## **Nonlinear interferometric optical parametric amplifier**

Sangyong Lee<sup>†</sup>, Jaekwan Kim, and Je-Myung Jeong

*Division of Electrical and Computer Engineering Hanyang University Seoul 133-791, KOREA*

Hosung Chang

*Division of Electronics and Computer Engineering Dankook University Seoul 140-714, KOREA*

(Received November 26, 2002, Revised manuscript March 11, 2003)

We obtain a solution of optical parametric amplification using self-phase modulation within the Kerr media in a nonlinear interferometer with two arms. We show that it is equivalent to the solution driven by four-wave mixing and that the solution of parametric amplification is suitable to generate a parametric gain. We obtain a derivative of power gain with respect to the propagation distance and show that gain-saturation can occur as the beam propagates along the nonlinear arms. We also show a bandwidth characteristic of the parametric amplification driven by nondegenerate four-wave mixing. Numerical examples are given to illustrate that the solution of the parametric amplification can be applied to design and analysis of all-optical devices such as all-optical amplifiers.

OCIS Code : 190.497.