

## 파장 다중 광통신에서의 반도체 광증폭기의 비선형성과 연속파동 레이저가 입사된 반도체 광증폭기의 이득고정효과

김동철 · 유건호

경희대학교 물리학과 및 기초과학연구소

김형문 · 주홍로 · 한선규 · 주관종\*

한국전자통신연구원

원천기술연구본부 및 \*회로소자기술연구소

(1999년 6월 18일 받음, 2000년 1월 10일 수정본 받음)

반도체 광 증폭기의 특성을 이해하기 위하여 비율 방정식을 수치 해석적으로 풀었다. 사용된 비율 방정식은 운반자 밀도와 자발 방출된 빛, 그리고 신호 빛을 위치와 시간의 함수로 기술할 수 있다. 사각 파형의 신호가 입사했을 경우에 대하여 위의 세가지 양을 구하여서 반도체 광증폭기의 동적인 특성을 파악하였다. 파장 다중 광통신에서처럼 다중신호가 입사하는 경우의 비선형성을 분석하였다. 맥놀이에 의한 내부변조 변형을 계산하여 본 결과 파장 간격이 넓을수록 내부변조 변형은 줄어드는 결과를 정량적으로 얻었으며, 신호간의 채널 간섭은 신호의 세기가 감소하면 줄어드는 결과를 얻었다. 또한 신호로 사용되는 파장에서 충분히 멀리 떨어진 연속파동 레이저가 입사하는 경우에는 채널간의 신호간섭과 출력파형 변형이 감소하는 이득 고정 효과가 나타남을 계산을 통하여 확인하였다.

### I. 서 론

파장 다중 광통신(Wavelength Division Multiplexing : WDM)은 여러 개의 파장을 하나의 광섬유에 전송하는 방법으로 기존에 설치되어 있는 광섬유의 정보 전달 능력을 효율적으로 사용할 수 있게 한다. 광섬유를 통하여 전달되는 신호는 어느 정도의 거리를 진행하면, 세기가 약해져서 이를 증폭하여 주는 것이 필수적이다. 이러한 과정은 초기에는 광신호를 전기신호를 바꾸고 이를 전자장치를 통하여 증폭시켜서 다시 광신호로 전환하는 방법이 이용되었으나, 이 방법은 비용이 많이 드는 등 효율적인 방법은 아니어서, 광증폭기를 사용하여 광신호를 직접 증폭하는 방법이 연구되고 있다.

이러한 광증폭기의 대표적인 예로서 어븀(Erbium :  $Er^{3+}$ )이 첨가된 광섬유 광증폭기(Erbium-Doped Fiber Amplifier : EDFA)<sup>[1]</sup>와 반도체 광증폭기(Semiconductor Optical Amplifier : SOA)<sup>[2]</sup>를 들 수 있다. EDFA는 기존의 광섬유에 어븀을 첨가한 광증폭기이다. SOA는 기존의 레이저 다이오드에 무반사막 코팅(Anti-reflection coating)을 하여 발진이 되지 않도록 유지하면서, 약해진 신호를 증폭시키는 광증폭기이다. EDFA에 비하여 SOA는 증폭 대역폭이 넓고, 증폭 파장 영역의 조절이 가능하고, 크기가 작은 등의 유리한 점이 있다.

일반적으로 광증폭기는 입사되는 신호의 세기가 강하면, 증폭률이 현저하게 감소하는 이득 포화(gain saturation)상태가<sup>[2]</sup>되어, 오히려 입사 신호의 소광비(extinction ratio)를 감소시킬 가능성이 있다. 이러한 이득 포화를 억제하기 위하여, 광증폭기의 이득을 고정시키기 위한 여러 연구가 진행되어져 왔다. 이러한 연구로써 SOA의 경우는 DBR(Distributed Bragg

Reflector), DFB(Distributed Feedback Bragg Reflector) 구조를 동시에 가지고 있는 이득 고정형 SOA(gain-clamped SOA : GCSOA)가 제안되었다<sup>[3]</sup>. 그러나 이 경우는 기존의 반도체 광증폭기에 DBR, DFB 구조를 추가하여야 하는 등 구조가 복잡해지는 단점이 있다.

본 논문에서는 SOA의 성능과 비선형적인 현상을 이해하기 위하여 비율 방정식을 수치 해석적으로 풀어서 단일 파장의 사각 파형이 입사하는 경우에 대한 SOA의 특성을 분석하였다. 또한 다중 파장의 신호가 입사하는 경우에는 내부변조 변형과 신호들 사이의 간섭효과에 대한 계산을 하여 SOA의 비선형성을 분석하였다. 위와 같은 SOA의 특성을 분석한 결과, 이득 고정 효과는 DBR, DFB 같은 추가적인 구조 없이 기존의 SOA에서 증폭시키려는 신호 파장에서 충분히 멀리 떨어진 파장의 연속파동(continuous wave) 레이저를 신호들 보다 큰 세기로 입사시킬 경우에도 얻어질 수 있음을 계산을 통하여 확인하였다.

### II. 이 론

SOA를 기술하기 위하여서는 1) 운반자 밀도(carrier density), 2) 자발 방출되어 증폭된 빛(amplified spontaneous emission), 3) 입사된 신호 등을 기술하여야 한다. 일반적으로 위의 세가지 양은 SOA 내의 위치와 시간에 의존하는 양이다. 위의 세가지 양은 비율 방정식을 도입하여 기술할 수 있다. 그러나 이 비율 방정식을 어림(approximation)없이 풀어서 세가지 양을 시간과 위치의 함수로 얻는 것은 간단한 일이 아니어서, 여러 가지 어렵게산이 보고되었다. 참고문헌[4]는 SOA 내에서의 운

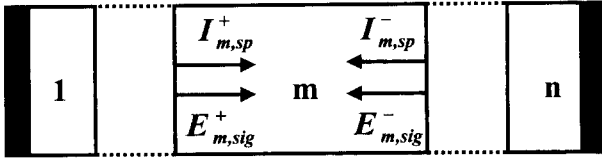


그림 1. SOA를 n개의 다중 영역으로 나눈 그림. I는 자발 방출된 광자의 세기, E는 신호의 전기장이고, +/-는 오른쪽/왼쪽으로 진행되는 방향을 나타냄.

반자 밀도는 SOA 내에서 적분을 하여 평균값으로 대표되며, 또한 충분한 시간이 흘러 평형 상태에 도달하였다는 가정을 하여 비율 방정식을 풀었다. 그러나 위의 방법은 운반자 밀도의 위치 의존성이 강한 SOA를 기술하는 데는 무리가 따르며, 또한 평형 상태를 기술하므로, 신호들 사이의 간섭(channel crosstalk)과 같이 시간에 따라 변화하는 양을 알고자 하는 경우에는 적당하지 못하다. 참고문헌 [5]는 운반자 밀도의 위치 의존성을 계산에 고려한 경우로써, SOA 내에서의 운반자 밀도의 변화를 비교적 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 이 경우 역시 위의 양들을 시간에 따라 기술하지 못하는 단점이 있다.

본 논문에서는 참고문헌 [6]을 참고로 하여 수치 해석적으로 운반자 밀도와 자발 방출되어 증폭된 빛 그리고 입사된 신호를 위치와 시간의 함수로 구하였다. 참고문헌 [6]의 방법을 간단히 소개하면 다음과 같다. 그림 1과 같이 길이가 L인 SOA를 n개의 다중 영역으로 나누어, 각각의 영역에서는 참고문헌 [4]와 같은 가정을 하여 비율 방정식을 풀고, 각 영역의 경계면에서 경계조건이 만족되도록 자체 모순이 없는 수치해석(self-consistent numerical analysis)을 통하여 비율 방정식을 푸는 방법이다. 이 방법은 위치와 시간의 함수로 세가지 양을 기술할 수 있는 장점이 있다.

m번째 영역에서 입사된 신호는 다음의 조건을 만족한다.

$$E_{k,m}^+(\omega, z_m^-) = E_{k,m-1}^+(\omega, z_{m-1}^+), \quad m \neq 1, \quad (1)$$

$$E_{k,m}^-(\omega, z_m^+) = E_{k,m+1}^-(\omega, z_{m+1}^-), \quad m \neq n, \quad (2)$$

$$E_{k,1}^+(\omega, z_1^-) = r_1 E_{k,1}^-(\omega, z_1^+) + E_k^{\text{in}}(\omega), \quad m=1, \quad (3)$$

$$E_{k,m}^-(\omega, z_m^-) = r_1 E_{k,m-1}^+, \quad m=n. \quad (4)$$

여기서 E는 입사신호의 전기장이며, k는 채널 지표이다. r<sub>1</sub>과 r<sub>2</sub>는 각각 입사면과 투과면의 반사율(reflectivity)이다. 이와 유사하게 자발 방출된 빛은 다음의 경계조건을 만족한다.

$$I_{m,sp}^+(\omega, z_m^-) = I_{m-1,sp}^+(\omega, z_{m-1}^+), \quad m \neq 1, \quad (5)$$

$$I_{m,sp}^-(\omega, z_m^+) = I_{m+1,sp}^-(\omega, z_{m+1}^-), \quad m \neq n, \quad (6)$$

$$I_{1,sp}^+(\omega, z_1^-) = r_1^2 I_{k,1}^-(\omega, z_1^+), \quad m=1, \quad (7)$$

$$I_{1,sp}^-(\omega, z_n^+) = r_2^2 I_{n,sp}^+(\omega, z_n^+), \quad m=n. \quad (8)$$

여기서 I<sub>m,sp</sub>는 자발 방출된 빛의 세기이다. 또한 영역 m에서의 운반자 밀도는 입사된 신호와 자발 방출된 빛의 크기를 변수로 하는 아래와 같은 방정식을 만족한다.

$$\frac{dN_m}{dt} = \frac{I_m}{eV_m} - R(N_m) - [g(\omega, N_m)S_{m,sig} + a_m(N_m - N_0)S_{m,spont}] \frac{c}{n_{g,o}} \quad (9)$$

여기서 N<sub>m</sub>은 영역 m에서의 운반자 밀도이고, 또한 S<sub>sig</sub>과 S<sub>sp</sub>는 각각 신호와 자발 방출된 빛의 광자 밀도이다. I<sub>m</sub>은 주입 전류, e는 전자의 전하량, V<sub>m</sub>은 영역 m의 부피, c는 빛의 속도, n<sub>g,o</sub>는 군 굴절률(group index)이다. 재결합을 나타내는 R(N<sub>m</sub>)은 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$R(N_m) = c_1 N_m + c_2 N_m^2 + c_3 N_m^3. \quad (10)$$

여기서 c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, c<sub>3</sub>는 상수이다. g(ω, N<sub>m</sub>)은 다음의 식을 만족한다.

$$g(\omega, N_m) = a_m(N_m - N_0) - \gamma(\omega - \omega_p)^2. \quad (11)$$

경계면에서 전기장의 포락선 함수(envelope function)을 도입하여 주어진 시간 t에서 위에서 기술한 SOA내의 각 영역에서의 비율방정식이 주어진 경계조건을 만족하도록 하는 운반자 밀도와 자발 방출된 빛, 신호 빛을 구하면 된다. 입력 파라메터는 참고문헌 [6]을 참고하였다.

### III. 계산결과 및 토론

#### 3.1. 단일 파장의 사각 파형이 입사하는 경우

위에서 논의한 비율 방정식을 수치 해석적으로 풀면 임의의 시간에서의 운반자밀도와 자발 방출된 빛 그리고 신호 빛을 위치의 함수로 얻게 된다. 그림 2는 1 ns의 사각 파형(1 ns < t < 2 ns인 구간에서만 신호가 있는 경우)이 SOA에 입사한 경우의 끝단에서의 (a) 출력 파형과 (b) 운반자 밀도, 그리고 (c) 자발 방출된 빛을 시간의 함수로 그린 것이다. 이 경우의 주입 전류 밀도는 100 mA, 입사 파장은 1550 nm, 입사된 신호의 세기는 -10 dBm이고, SOA의 길이는 500 μm이다. (a)의 경우를 보면, 1 ns 정도에서 출력 파형이 나오기 시작한다. 평형상태에 도달한 후에는 약 20 mW 정도로 증폭된 파형이 나오는 것을 알 수 있다. 지금의 계산 결과에서 가장 주목할 만한 것은 입사된 사각 파형의 모양이 변형이 되었다는 점이다. 이러한 파형이 출력되는 이유는 SOA 내의 운반자 밀도의 시간에 따른 변화(그림 (b)의 경우)를 살펴보면 알 수 있다. 입사 신호가 없는 경우 운반자 밀도는 외부에서 주입된 양으로 일정하게 유지된다(그림 (b)에서 t < 1 ns인 영역). 신호가 입사하게 되면 유도 방출(stimulated emission)이 일어나고, 신호가 증폭되면서 동시에 운반자 밀도는 감소한다. 처음에는 운반자 밀도가 급격히 감소하게 되어 그림 (a)에서 보는 것처럼 overshoot이 생기게 된다(그림 (b)에서 t > 1 ns가 되기 시작하는 영역). 시간이 지남에 따라 운반자 밀도의 감소는 작아지게 되고 더 이상 감소하지 않는 영역이 생긴다. 이 영역에서는 이득이 일정하게 유지되어 신호는 일정한 이득 만큼만 증폭되어 일정한 크기로 유지된다(그림 (b)에서 1.4 ns < t < 2 ns인 영역). 입사 신호가 없는 영역에 이르게 되면, 출력은 신호

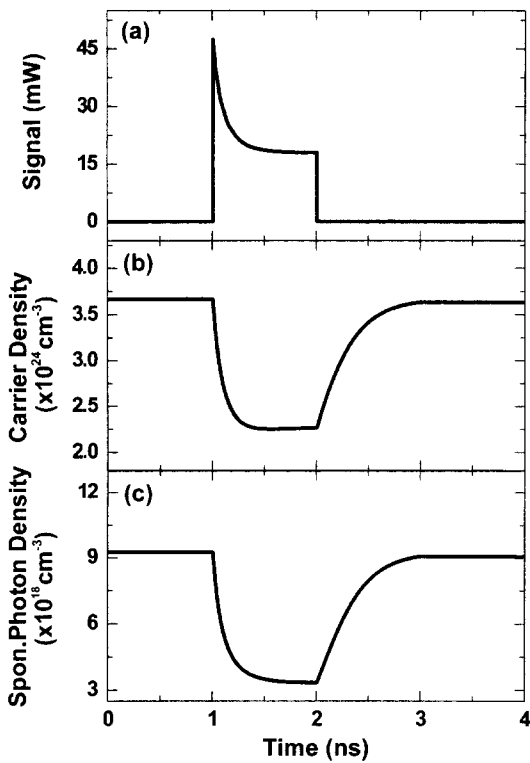


그림 2. SOA의 길이가 500  $\mu\text{m}$ , 주입 전류는 100 mA일 때, 파장이 1550 nm이고 세기가 -10 dBm이고 폭 1 ns의 사각 파형이 입사한 경우, (a) 출력 파형, (b) 운반자 밀도, 그리고 (c) 자발 방출된 광자의 밀도를 시간의 함수로 그린 그림.

가 없는 상태로 되고, 운반자 밀도는 생존시간(life time) 정도의 시간이 지나게 되면, 원래의 주입된 운반자 밀도의 크기의 평형 상태에 이르게 된다((b)에서  $t > 2 \text{ ns}$ 인 영역). 그림 (c)는 시간의 함수로 그린 자발 방출된 광자의 밀도를 그린 것으로 (b)운반자 밀도의 경우와 비슷한 모양을 갖는다.

그림 2의 (a)에서 그 사각 파형의 신호가 끝나는 시각( $t = 2.0 \text{ ns}$ )에서 SOA내의 위치의 함수로 (a)출력 파형과 (b)운반자 밀도, 그리고 (c)자발 방출된 광자의 밀도를 그린 것이 그림 3이다. (a)의 경우를 보면 입사 된 신호의 빛이 SOA내를 진행함에 따라 지수 함수적으로 증폭되는 것을 볼 수 있다. 신호가 증가함에 따라 운반자 밀도는 감소하게 되는 공간 정공 고갈(spatial hole burning) 현상이 일어남을 그림 (b)를 통하여 알 수 있다. 그림 (c)는 이 경우에 자발 방출된 광자의 밀도를 그린 것이다. 자발 방출된 빛의 경우는 주어진 경계 조건을 만족하도록 움직이게 되기 때문에, 입사신호의 세기나 주입된 전류에 따라서 그 모양이 변하게 된다.

**3.2. 다중 파장의 신호가 입사하는 경우의 SOA의 비선형성**

WDM 방식에서 사용되는 신호에는 서로 다른 파장이 이용된다. 이러한 신호들이 SOA에 입사하는 경우에는 몇 가지의 비선형적인 현상이 발생하게 된다.

**3.2.1. 맥놀이(beat)에 의한 내부변조 변형(Intermodulation Distortion)**

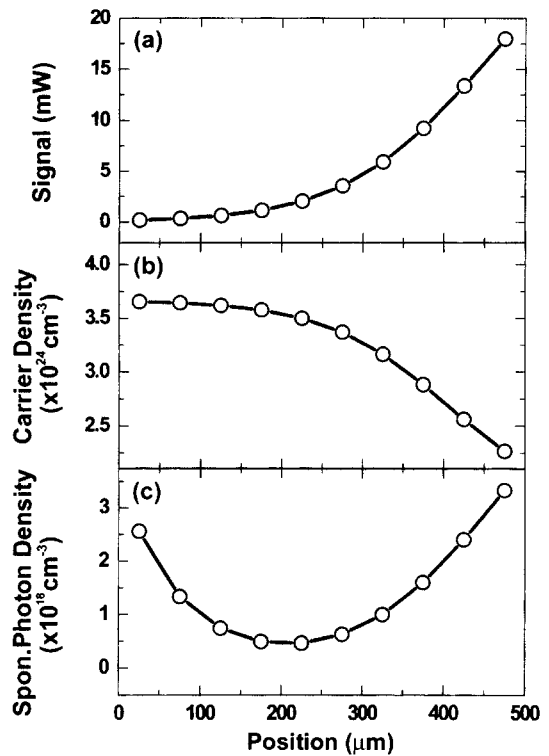


그림 3. 그림 2에서 시간이 2 ns일 때, (a) 출력 파형, (b) 운반자 밀도, 및 (c) 자발 방출된 광자의 밀도를 SOA 내에서의 위치의 함수로 그린 그림.

일반적으로 서로 다른 파장의 신호가 입사하는 경우에 두 신호의 파장 간격이 가까워지면 맥놀이(beat)현상이 일어나게 된다. 이러한 맥놀이 현상은 신호의 변형을 일으키게 된다. WDM 방식에서는 신호의 파장 간격을 좁혀서 통신 용량을 넓히고자 하는 방향으로 연구가 진행되고 있으므로, 이러한 맥놀이에 의하여 발생하는 현상은 중요하다. 본 논문에서는 II에서 기술한 다중 영역 모델을 이용한 계산을 통하여, 맥놀이에 의하여 발생하는 SOA의 비선형적인 현상인 내부변조 변형<sup>[6]</sup>을 살펴보고자 한다.

두 개의 신호가 중첩되면 맥놀이 현상이 일어난다. 이러한 맥놀이에 의하여 SOA 내의 운반자는 진동하게 되고, 따라서 출력 신호의 내부변조 변형을 일으키게 된다. 특히 이것은 두 신호의 파장 간격이 좁을수록 심하다. 신호 1( $S_1$ ; 1550 nm, -20 dBm)과 신호 2( $S_2$ ; -20 dBm)가 SOA에 입사하는 경우, 두 신호의 채널 간격을 변화시켜 가면서,  $S_1$ 의 출력 파형을 시간의 함수로 그린 것이 그림 4의 (a)이다.  $S_1$ 의 파장은 1550 nm로 고정되어 있고,  $S_2$ 의 파장을 변화시켰다. 이 경우 신호들은 시간이 0보다 클 때 들어오게 된다. 앞에서 설명한 것처럼 overshoot가 생기는 것을 볼 수 있다. 두 신호의 파장 간격(채널 간격)이 좁아지면  $S_1$ 의 출력 파형은 내부변조 변형이 되는 것을 볼 수 있다. (신호변형의 진폭/내부변조된 신호의 평균 크기)를 두 신호의 채널 간격의 함수로 나타낸 것이 그림 4의 (b)이다. 두 신호의 채널 간격이 넓어지면 내부변조 변형은 급격히 감소하고, 두 채널의 간격이 200 GHz 정도 되면 신호 2의 입력 세기가 0 dBm일 경우에도, 내부변조 변형

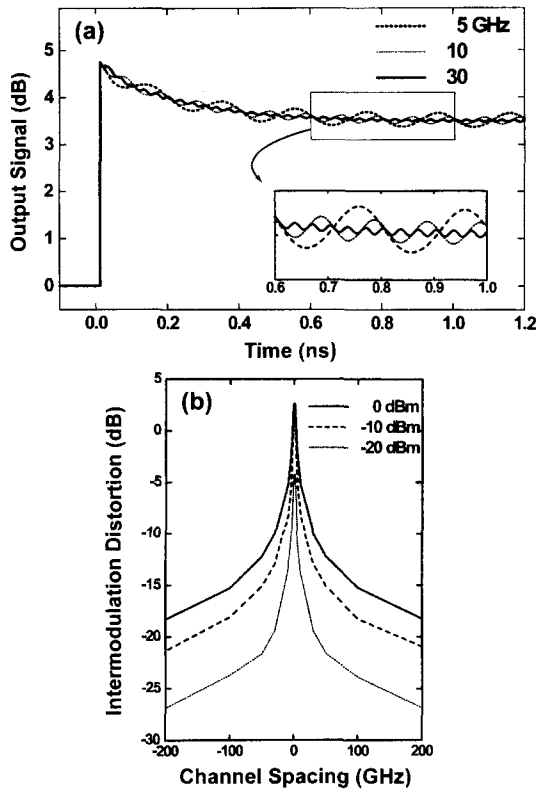


그림 4. (a)  $S_1$  (1550 nm, -20 dBm)과 채널 간격이 5, 10, 30 GHz인  $S_2$  (1551.6 nm, -20 dBm)가 동시에 입사했을 경우  $S_1$ 의 출력 파형. (b)  $S_2$ 의 세기가 0, -10, -20 dBm 일 때, 채널 간격의 함수로 그린 IMD.

은 -20 dB 정도로 작아지는 것을 볼 수 있다. 이 이후의 계산은 신호의 채널 간격이 200 GHz인 경우에 해당하므로 내부 변조 변형에 의한 효과는 계산에 고려하지 않았다.

### 3.2.2. 신호 간의 간섭(Channel Crosstalk)

WDM에 SOA가 증폭 소자로서 사용되는 경우, 여러 신호가 서로 다른 주파수로 변조되면 하나의 신호의 변조 효과가 다른 신호에 영향을 미칠 수 있다. 이를 살펴보기 위하여 두 개의 신호  $S_1$ 과  $S_2$ 가 입사하는 경우를 가정하였다.  $S_1$ 은 1550 nm의 파장과 -20 dBm의 세기를 가진 균일한 연속파동으로 입사되고,  $S_2$ 는 1551.6 nm의 파장을 가지고 변조 주파수 1 GHz, 변조 폭 0.2로 싸인 함수로 변조되는 경우  $S_1$ 의 출력을  $S_2$ 의 세기의 함수로 그린 것이 그림 5의 (a)이다. 신호 1과 신호 2는  $t=0$  ns에서 입사된다. 이 경우 역시 overshoot 효과가 생기게 되고, 어느 정도의 시간이 지나면 평형 상태가 됨을 알 수 있다. 또한 신호 2의 변조 효과가 신호 1에 얹혀져서 나타남을 알 수 있다. 이러한 신호들간의 간섭이 생기는 이유는 각각의 신호의 변조 주파수로 SOA내의 운반자 밀도가 변조되고, 이 효과가 이득을 변조시켜서 상대방 신호의 증폭률에 그 영향을 미치기 때문이다. 이 경우 신호간섭은 내부 변조 변형의 경우와 유사하게(간섭된 신호의 진폭/간섭된 신호의 평균 크기)로 정의된다. 그림 5의 (b)는 신호  $S_2$ 의 세기의 함수로 그린 신호 간섭이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼  $S_2$ 의 세기가 증가하면, 신호 간의 간섭은 두드러지게 된다.

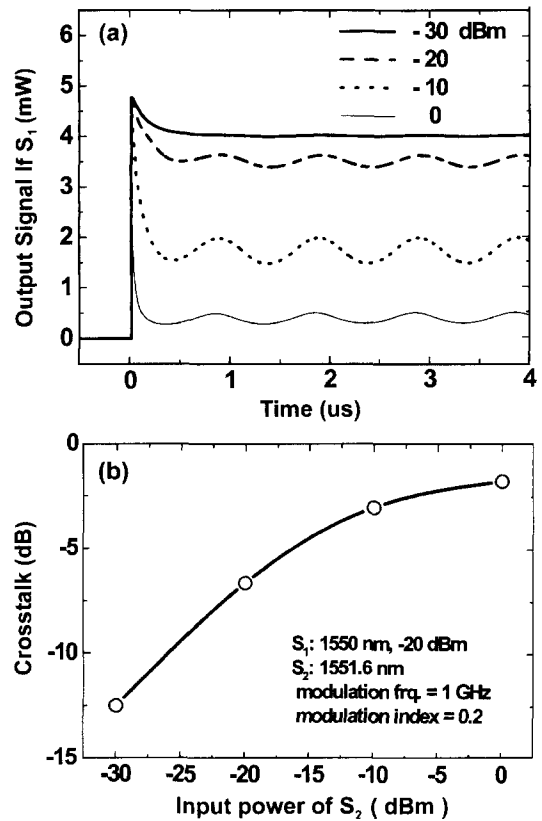


그림 5.  $S_1$  (1550 nm, -20 dBm, 연속파동)과  $S_2$  (1550 nm, 0, -10, -20, -30 dBm, 변조 주파수 1 GHz, 변조 폭 0.2)가 동시에 입사했을 경우의 (a)  $S_1$ 의 출력 파형과 (b)  $S_1$ 이 겪게 되는 신호 간섭.

### 3.3. 연속파동 레이저가 입사된 반도체 광증폭기에서의 이득 고정효과

일반적으로 SOA에 입력되는 신호의 세기가 증가하면 이득이 감소한다. 이렇게 되면 입사 신호가 변조되는 경우 변조의 소광비를 오히려 감소시킬 가능성이 있다. WDM 방식에서처럼 여러 신호가 입사하는 경우에 내부변조 변형 혹은 신호 간의 간섭에 의하여 SOA의 사용에 제한을 받게 되는 경우가 생긴다. 이러한 SOA의 비선형적인 현상은 SOA의 사용에 많은 제한을 주므로 이러한 단점을 보완한 GCSOA가 제안되었으나, 이 경우는 구조가 복잡한 단점이 있다. 본 논문에서는 기존의 SOA에 증폭시키고자 하는 신호의 파장에서 충분히 떨어진 파장의 연속파동 레이저가 입사시키는 경우, 신호 간섭에 연속파동 레이저가 미치는 효과 등의 이득 고정 효과를 얻을 수 있는 지에 대하여 살펴보았다.

그림 6은  $S_1$ (1550 nm, -20 dBm)과  $S_2$ (1551.6 nm), 그리고 연속 파장으로 입사하는  $S_{Las}$ (1520 nm)가 SOA에 입사되는 경우,  $S_1$ 이 겪는 신호 간섭을  $S_2$ 와  $S_3$ 의 세기의 함수로 그린 그림이다.  $S_2$ 는 변조 폭 0.2, 변조 주파수 1 GHz의 싸인 함수 형태로 변조되고, 세기는 -30 dBm에서 0 dBm으로 변하는 경우이다. 그리고  $S_{Las}$ 은 파장이 1520 nm인 연속파동 레이저로, 그 세기는 0, -10, -20, -30 dBm인 경우와 입사가 없는 경우로 하였다. 앞에서 설명한 대로  $S_2$ 의 세기가  $S_1$ 과 비슷하게

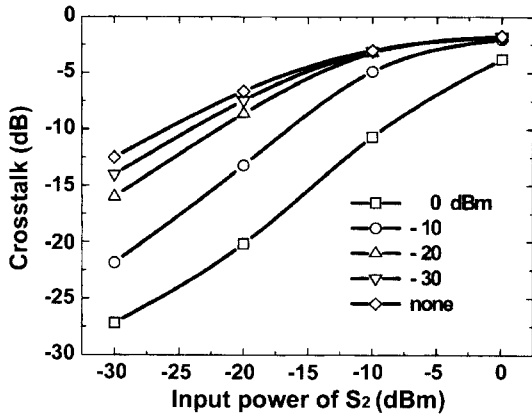


그림 6.  $S_1$  (1550 nm, -20 dBm, 연속파동)과  $S_2$  (1550 nm, 변조 주파수 1 GHz, 변조 폭 0.2)이 동시에 입사했을 경우,  $S_1$ 이 겪게 되는 신호 간섭을  $S_2$ 의 세기와  $S_{Las}$  (1520 nm, 연속파동)의 세기의 함수로 그린 그림.

나 커지게 되면 신호 간의 간섭은 아주 심해지게 된다. 그러나  $S_{Las}$ 가 입사하게 되면 신호 간섭은 줄어들게 되는데  $S_{Las}$ 의 세기가  $S_2$ 의 세기보다 커지면 이러한 경향은 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이러한 경향이 나타나게 되는 이유는 다음과 같다. 기본적으로 신호 간의 간섭은 앞서 설명한 것과 같이 상대 신호가 변조되면, 그 영향으로 SOA 내의 운반자 밀도가 변조되고, 이 효과가 다른 신호에 실리게 되는 것이다. 그러나 변조되지 않는 연속파동의 레이저가 입사하고, 이 레이저의 세기가 다른 신호들보다 상대적으로 크게 되면, SOA 내의 운반자 밀도는 연속파동으로 입사되는 레이저에 의한 영향을 더 많이 받게 되어 신호 간의 간섭 효과가 줄어들게 된다. 그림 7은 입사하는  $S_{Las}$ 의 세기가 0 dBm으로 일정할 경우 신호의 간섭을 입사 레이저  $S_3$ 의 파장의 함수로 그린 그림이다. 그림에서 보는 것처럼 입사하는 레이저의 파장이 장파장으로 가면 채널 간섭은 줄어든다. 이것은 계산상에 고려되어진 활성층의 이득

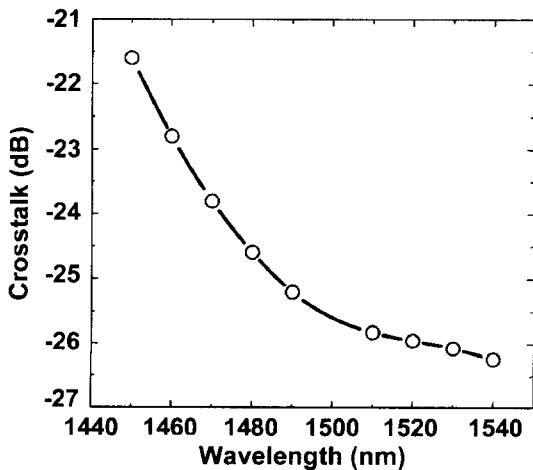


그림 7.  $S_1$  (1550 nm, -20 dBm, 연속파동)과  $S_2$  (1551.6 nm, -20 dBm, 변조 주파수 1 GHz, 변조 폭 0.2)가 동시에 입사했을 경우,  $S_1$ 이 겪게 되는 신호 간섭을 연속파동  $S_{Las}$ 의 파장의 함수로 그린 그림.

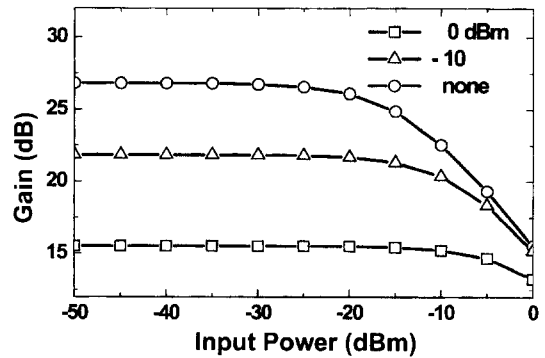


그림 8.  $S_1$  (1550 nm, -20 dBm, 연속파동)의 이득을  $S_1$ 의 입사 세기와  $S_{Las}$  (1520 nm, 연속파동)의 세기의 함수로 그린 그림.

이 파장 1550 nm 정도에서 최대가 되기 때문이다.

입사하는 신호 이외에, 이 신호들보다 세기가 큰 레이저가 입사하게 되면 SOA의 이득은 줄게 된다. 그림 8은 레이저가 입사하지 않는 경우와 1520 nm의 파장으로 0 dBm 및 -10 dBm의 세기로 입사할 때의 입력 신호  $S_1$  (1550 nm)의 세기의 함수로 이득을 그린 것이다. 그림에서처럼 레이저가 입사하지 않는 경우 이득은 약 27 dB 정도가 되고, 3 dB 포화 입력 세기(3 dB saturation input power)는 -10 dBm 정도이다. 이에 비하여 레이저가 입사하게 되는 경우, SOA의 이득은 줄어들지만 3 dB 포화 입력 세기는 커지는 것을 볼 수 있다. 결론적으로 SOA의 이득은 줄어드는 단점을 가지는 반면 포화 입력 세기가 커지는 장점을 가지게 된다. 또한 WDM에서처럼 입사하는 신호가 여럿 일 경우 이득이 감소하기는 하나, 신호 간의 간섭 없이 각각의 신호를 증폭시킬 수 있는 장점을 얻게 된다. 이러한 경향은 기존의 GCSOA에서와 동일하다. 이러한 이득 고정 효과의 또 하나의 장점은 입사 신호의 출력 파형 변형을 감소시킨다는 것이다. 그림 9는 레이저(1520 nm, -10 dBm)가 입사하는 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 입사된 사각파의 출력 파형을 시간의 함수로 그린 것이다. 앞서 설명한 것처럼 먼저 입사된 부분은 overshoot을 보인다. 그림에서처럼 연속파동의 레이저와 함께 입사시키면 이러한 overshoot은 상당히 줄어든다. 이러한 바람직한 효과를 얻는 반면,

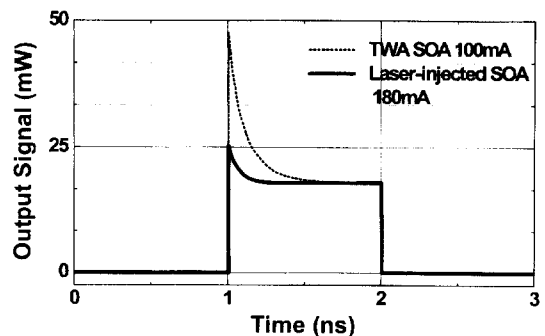


그림 9. 1550 nm, -10 dBm의 사각 파형의 출력 파형. 점선은 기존의 SOA(주입 전류 100 mA)의 경우이고, 실선은 1520 nm, -10 dBm의 연속파동이 함께 입사되는 SOA(주입 전류 180 mA)의 경우이다.

SOA의 전체 이득은 감소하게 되어, 동일한 이득을 얻기 위하여서는 더 큰 전류를 주입시켜 주어야 한다(주입 전류를 100 mA에서 180 mA로 증가시킴)는 단점이 있지만, 이것은 이득 고정 효과로 인한 여러 장점을 얻기 위하여서는 불가피한 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 SOA의 특성을 분석하기 위하여 비율 방정식을 수치 해석적으로 풀었다. SOA의 특성을 기술하기 위한 비율 방정식은 기본적으로 SOA를 다중 영역으로 나누어 적절한 경계조건을 부가한 형태로 운반자 밀도와 자발 방출된 빛, 신호 빛을 위치와 시간의 함수로 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 계산 결과 단일 신호의 사각파가 입사하는 경우의 운반자 밀도와 자발 방출된 빛, 신호 빛을 위치와 시간의 함수로 얻어 SOA의 기본적인 특성을 상세히 살펴보았다. 또한 WDM에서처럼 다중 파장이 입사하는 경우도 고려하여 SOA의 비선형적인 현상을 계산하였다. 채널의 간격이 좁아지면 맥놀이로 인하여 발생하는 IMD가 신호의 변형에 큰 영향

을 미치고, 채널간의 간섭을 계산하여 상대 채널의 세기가 증가하면 채널의 간섭이 심하여짐을 정량적으로 계산하였다. 신호로 사용되는 파장에서 충분히 멀리 떨어진 레이저가 입사하는 경우에 대하여 채널의 간섭과 3 dB 포화입력세기, 출력 신호의 변형을 계산하여 본 결과, 이 경우에 있어서 이득 고정 효과가 얻어짐을 계산을 통하여 확인하였다.

#### 참고문헌

- [1] E. Desurvire, J. R. Simpson and P. V. Becker, *Optt. Lett.* **12**, 888 (1987).
- [2] T. Mukai and Y. Yamamoto, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-17**, 1034 (1981).
- [3] L. F. Tiemeijer, P. J. A. Thijs, T. v. Dongen, J. J. M. Binsma, E. J. Jansen, and H. R. J. R. van Helleputt, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7**, 284 (1995).
- [4] M. J. Adams, V. J. Collins, and I. D. Henning, *IEE Proc.* **132**, pt. J, 58 (1985).
- [5] P. Brosson, *J. Lightwave. Technol.* **12**, 49 (1994).
- [6] T. Durhuus, B. Mikkelsen, and K. E. Stubkjaer, *J. Lightwave. Technol.* **10**, 1056 (1992).

### Nonlinearity of semiconductor optical amplifier and gain-clamping effects of laser-injected semiconductor optical amplifier in wavelength division multiplexing

Dong Churl Kim and Keon-Ho Yoo

*Department of Physics and Research Institute for Basic Sciences, Kyung Hee University, Seoul 130-701, Korea*

Hyung Mun Kim, Heung Ro Choo, Seon Kyu Han and Gwan Jong Joo\*

*Telecommunication Basic Research Lab. and \*Micro-electronics Technology Lab.  
Electronics and Telecommunications Research Institute, Taejon 305-350, Korea*

(Received June 18, 1999, Revised manuscript received January 10, 2000)

We have numerically solved rate-equations of semiconductor optical amplifier (SOA) to understand the characteristics of SOA. The rate-equations we have used can describe injection carrier density, amplified spontaneous emission and signal photon density in spatial and time domain by dividing the cavity into multi-section. We have investigated injection carrier density, amplified spontaneous emission and signal photon density as a function of position and time in the case of single channel input in the form of square pulse. Also we have analyzed the non-linear phenomena of SOA in the case of injecting multi-channel wavelengths as in WDM. Intermodulation distortion (IMD) caused by beat among channels has significant effects on the signal distortion as the channel spacing becomes narrower, and channel crosstalk becomes larger as the power of signals increases. In the case of the injection of another CW laser whose wavelength is far enough from the signal wavelengths, the crosstalk and the output signal distortion can be significantly reduced.