

굽은 비선형 도파로를 이용한 완전 광 신호 처리 소자

김찬기* · 정준영 · 장형욱 · 송준혁 · 정제명

*한양대학교 전자통신공학과
한양대학교 전파공학과

(1997년 7월 24일 받음)

굽은 비선형 도파로를 이용한 완전 광 스위치와 굽은 비선형 Y 분기각을 갖는 도파로를 이용한 완전 광 논리 연산소자를 제안하였다. 제안된 완전 광 스위치와 완전 광 논리 연산소자는 굽은 비선형 도파로를 따라가는 비선형과의 전파에 기초를 두고 있다. 빔의 전파특성은 도파로의 비선형성과 입력 파워, 도파로의 굽은 각도 등의 파라미터에 의해 좌우되므로 파라미터를 변화시켜 가면서 파워의 출력 특성을 계산해 보았다. 또한, 비선형 물질로 빠져 나오는 파워를 다양한 위치의 검출기에서 계산함으로써 특정한 검출기의 위치에서 가장 이상적인 디지털 스위칭 특성을 찾았고 도파로 끝과 비선형 물질로 빠져 나오는 파워의 비율에 의해 다양한 논리 함수(AND, OR, XOR)를 구현해 보았다.

I. 서 론

비선형 도파로안에서 Kerr effect를 이용한 완전 광 스위칭 소자와 논리 연산소자는 초고속 광통신 시스템과 초고속 정보처리를 위해 큰 관심을 끌어오고 있다. 먼저 스위치에 있어서 과거 수십년동안 Kerr 스위치^[1], 비선형 간섭계(nonlinear interferometer; NLI)^[2,3], 비선형 방향성 결합기(nonlinear directional coupler; NLDC)^[4]와 비선형 도파로(nonlinear waveguide junction; NLWJ)^[5,6]를 이용한 수많은 완전 광 스위치가 제안되었다. NLI의 경우, 파워에 의한 굴절률의 변화 때문에 두 팔(arm)안에 두 개의 진행하는 파 사이의 상대적인 위상차가 간섭을 받아 주어진 단에 따라 보강 간섭 또는 상쇄 간섭을 일으킨다. NLDC에서는 선형 커플링에서 일어나는 위상일치조건이 높은 파워에서 간섭을 받아, 광파워는 다른 출력단으로 스위칭 된다. NLWJ의 경우, 대칭 결합 구조에서 파워에 따라 변하는 굴절률의 특성 때문에 대칭 효과가 일어나, 파워에 의한 완전 광 스위칭이 일어난다. NLDC와 NLI의 스위칭 특성은 "ON"과 "OFF" 상태의 완만한 전달 특성을 가진다. NLWJ는 NLDC, NLI와 달리 급격한 디지털 전달 특성을 가졌지만 두 고유 모드 사이의 파워에 의한 위상차 때문에 진동적인 전달 특성을 가지고 있고 디지털 스위칭은 여러 번의 진동적인 스위칭 후에야 일어난다. 그러므로 NLDC, NLI, 그리고 NLWJ의 완만한 전달 특성과 진동적인 스위칭 특성은 디지털 스위치 응용에 적합하지 못하다. 최근에 Ogusu와 Chang 등은 굽은 비선형 유전체 접촉면^[7,8]을 따라 진행하는 비선형파를 이용한 스위치를 연구하고 있다.

둘째로 논리 연산소자에 있어 비선형 도파로를 이용한 완전 광 논리 연산소자들은 수많은 실험과 이론적인 논문을 통해 보고되고 있다. 최근에 보고되는 예로써, 솔리톤 이용 소자^[9], 비대칭 비선형 결합기(asymmetric nonlinear directional coupl-

er; ANDC)^[10], 그리고 비선형 주기적, 비주기적 도파로 구조^[11]를 이용한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 솔리톤 이용 소자를 사용한 경우, 광섬유의 분산과 비선형성으로 인한 광섬유 팔길이가 조정되어 두 광섬유로 출력되는 위상변화로 인해 출력단의 파워를 조정하여 OR 함수와 AND 함수를 구현하였다. ANDC는 각각 다른 코어 크기와 비선형성으로 인해 큰 파워가 들어왔을 때 굴절률이 변하여 선형 커플링의 위상일치조건이 깨지게 된다. 입력이 하나일 경우에는 출력 파워는 비선형성이 큰 도파로에서 나타나고 양쪽에 입력이 가해졌을 때에는 양 입력신호의 위상차에 따라 출력단이 결정되어 AND, OR, 그리고 XOR 함수를 구현하였다. 비선형 주기적 또는 비주기적 도파로를 이용한 경우에는 파워에 의해 조정되는 광쌍안정(bistability)성질에 기초를 두고 있고 AND, OR, 그리고 NOT 함수를 구현하였다. 이 밖에도 2 또는 3개의 도파로로 이루어진 비선형 방향성 결합기, Y 분기 구조의 비선형 도파로^[5], X 형태의 도파로^[6], NLI^[12]를 이용한 논리 연산소자들이 있다.

이 논문에서는 도파로의 굽은 각, 입력 파워 등의 파라미터를 적절히 조절함으로써 Kerr 성질을 가진 비선형 도파로에서 완전 광 스위치와 완전 광 논리 연산소자를 구현할 수 있음을 제안하였다. 두 소자 모두 입력 파워에 의존하는 비선형 도파로의 전파 특성에 기초하고 있다. 완전 광 스위치로 사용된 경우에, "ON"과 "OFF" 사이의 거의 이상적인 파워 전달 특성을 가져 광 threshold소자로 사용할 수 있음을 보여준다. 완전 광 논리 연산소자는 굽은 비선형 Y 분기각을 갖는 도파로를 사용하였고, 어느 임계치의 입력 파워에서 발생된 솔리톤과 도파로를 따라 출력된 빔을 이용하여 여러 가지 논리 연산 함수(XOR, AND, OR)를 구현해 보았다. 수치 해석 방법으로는 FD-BPM (Finite Difference Beam Propagation Method)^[13,14]을 이용하였다.

II. 동작 원리

도파로를 따라가는 광파를 연구하기 위해 Z방향으로 진행

*본 연구는 한국 과학 재단 지원(KOSEF 961-0922-117-2)에 의해 수행된 것임.

하는 전계는 Y방향으로 균일하다고 가정할 때 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E(x, z, t) = \Psi(x, z) \exp[j(kz - \omega t)] \quad (1)$$

여기서 $k = \beta k_0$, k_0 는 자유공간 파장수이고 β 는 유효 굴절률이다.

직교 좌표계에서 광파의 벡터 성질을 무시하고 종축 근사를 하면 Helmholtz 방정식은 다음과 같이 Fresnel 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$2j k_0 \frac{\partial \Psi}{\partial z} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + k_0^2 [n^2(x, z, |\Psi|^2) - \beta^2] \Psi = 0 \quad (2)$$

Kerr-effect를 갖는 비선형 물질안에서 n^2 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n^2(x, z, |\Psi|^2) = n_c^2(x, z) + \alpha |\Psi|^2 \quad (3)$$

여기서 n_c^2 는 굽은 비선형 도파로의 굴절률 분포이고 α 는 비선형계수를 나타내고 양수이다. α 가 양수이면 굴절률이 커져 self-focusing 성질을 갖게 된다.

2.1. 완전 광 스위치

그림 1은 굽은 비선형 도파로의 구조이다. 두께가 d 이고 굴절률이 n_f 인 도파로가 굴절률 n_s 를 가지는 물질과 굴절률이 n_c 인 물질로 둘러싸여 있다. 현재의 해석 방법은 Z방향으로 진행되는 TE 모드로 제한되어 있고 선형-비선형 접촉면을 따라 비선형 도파 모드의 전계 분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[15]

$$E_c(x) = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \frac{q}{\cosh[k_0 q(x_1 - x)]} \exp[j(\beta k_0 z - \alpha x)] \quad (4)$$

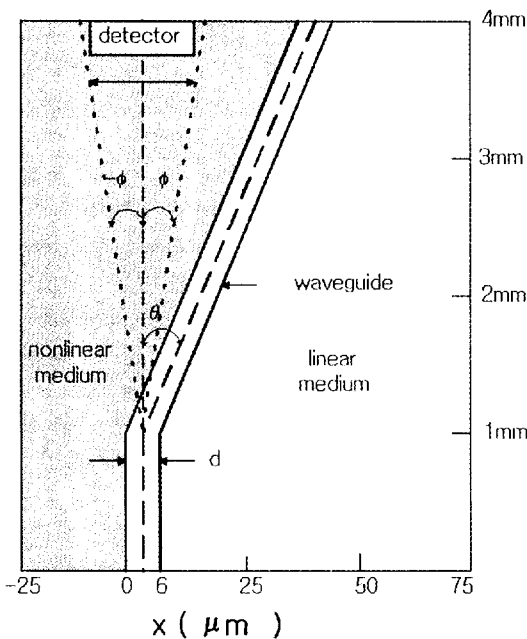


그림 1. 완전 광 스위치로 제안된 굽은 비선형 도파로의 구조.

$$E_f(x) = E_c(0) \left[\cosh(k_0 \chi x) + \frac{q}{\kappa} \tanh(k_0 q x_1) \sinh(k_0 \chi x) \right] \quad (5)$$

$$E_s(x) = E_f(d) \exp[-s k_0(x - d)] \quad (6)$$

여기서 $q^2 = \beta^2 - n_c^2$, $s^2 = \beta^2 - n_f^2$, $\chi^2 = |\beta^2 - n_f^2|$ 이고 x_1 은 파면을 따라 단위길이당 전체 파워로부터 구할 수 있는 상수이다.

그리고 분산 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[12]

$$\tanh(k_0 \chi d) = \frac{\chi [\tanh(k_0 q x_1) + s]}{\chi^2 - q s \tanh(k_0 q x_1)} \quad \text{for } \beta^2 < n_f^2, \quad (7)$$

$$\tanh(k_0 \chi d) = \frac{\chi [q \tanh(k_0 q x_1) + s]}{-\chi^2 - q s \tanh(k_0 q x_1)} \quad \text{for } \beta^2 > n_f^2 \quad (8)$$

완전 광 스위칭 소자로써 굽은 비선형 도파로의 동작은 다음과 같다. 제안된 소자는 굽은 비선형 도파로를 따라가는 전파 특성에 기초하고 있다. 입력 파워가 낮을 때는 제안된 비선형 도파로는 굽은 선형 도파로와 마찬가지로 전계가 도파로를 따라 진행한다. 그리고 입력 파워가 중간 정도이면 제안된 소자는 입력 파워에 따라 선형 도파로를 따라 진행하는 파워와 비선형 물질을 따라 진행하는 파워로 나누어진다. 이 조건을 잘 이용하면 파워 분배기로 쓸 수 있다. 입력 파워가 클 때는 굽은 도파로 부근에서 솔리톤이 발생하여 self-focused channel을 형성하여 비선형 물질속으로 진행한다.^[16,17] 그러므로 소자끝에서 파워의 출력 특성을 계산해 봄으로써 입력 파워에 따라 공간상의 완전 광 스위치로써의 기능을 알 수 있다.

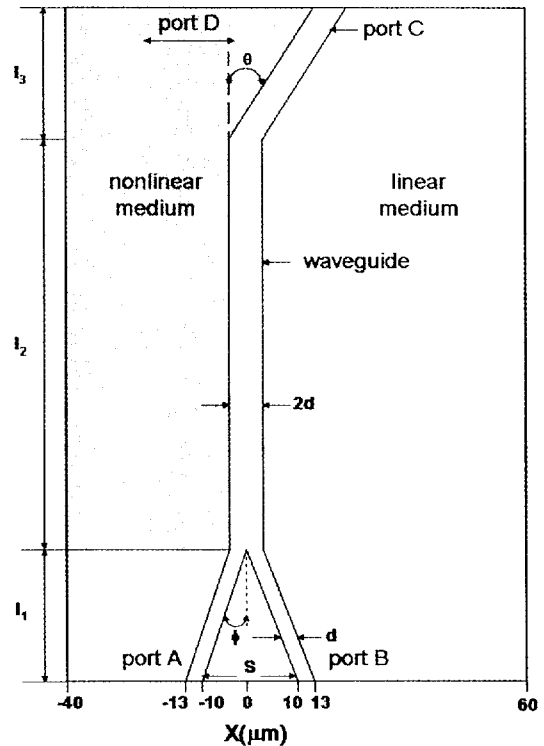


그림 2. 완전 광 논리 연산 소자로 제안된 Y 분기각을 이용한 비선형 도파로의 구조.

2.2. 논리 연산소자

논리 연산소자로서 제안된 구조는 그림 2와 같이 입력단은 두 개의 선형 도파로로 구성되어 있다. 출력단은 Kerr-like 성질의 클래딩이 구부러진 도파로의 한쪽 면에 위치하고, 다른 한쪽 면은 선형 기관(substrate)으로 둘러 싸여 있다. 입력단에서 두 도파로 사이의 분기 각도는 ϕ , 출력단에서 도파로의 구부러진 각도는 θ 로 표시하였다. I_1 은 입력 도파로 사이의 폭과 분기각 ϕ 에 의해 결정되는 길이이다. I_2 는 비선형 물질과 선형 물질의 결합면의 길이이다. 그리고 I_3 은 비선형 물질로 빠져 나온 파워와 선형 도파로를 따라가는 파워를 분리하기 위한 길이이다. A와 B는 두 입력단이고 C와 D는 각각 도파로에서 출력과 비선형 물질내에서 출력이다. 두 입력단 A와 B의 도파로는 두 입력 전계가 겹치지 않도록 충분히 멀리 떨어져 설계하여 처음 입력시 각각의 입력 전계가 서로 다른 도파로에 끼치는 전계의 영향은 없도록 하였다. 두 입력 도파로 사이의 거리는 S로 표시하였다. 완전 광 논리 연산소자로써 제안된 도파로의 동작은 다음과 같다. 굵은 각 θ 가 작을 때 제안된 비선형 도파로는 굵은 선형 도파로와 같이 동작하여 광파는 입력단에 상관없이 도파로를 따라 진행한다. 이때 출력단 C의 출력 특성은 이득이 있는 OR 함수로 동작을 한다. 그러나 굵은 각 θ 를 크게 하였을 때, 광파의 전파는 입력단에 상당히 민감하다. 두 입력단 중 하나만 입력을 주면 광파는 도파로를 따라 진행한다. 그러나 두 입력단에 모두 입력 파워를 주었을 때는 두 입력 파워가 합쳐지는 부근에서 전체 파워는 각 입력 파워가 더해져 입력 파워에 의한 비선형 물질의 굴절률의 변화로 인해 광파의 일부는 비선형 물질로 빠져나오고 나머지 파워는 도파로를 따라 출력이 된다. 즉 비선형 물질로 나오는 솔리톤 파워와 도파로를 따라 나온 파워의 비율에 따라 파워 분배기 및 여러 가지 기능을 가지는 논리 연산소자를 구현할 수 있다. 먼저 비선형 물질로 나온 솔리톤 파워가 도파로로 나온 파워보다 큰 경우 출력단 C에서는 XOR 함수 기능을 하고 출력단 D에서는 이득이 있는 AND 함수를 구현할 수 있다. 그리고 솔리톤 파워와 도파로를 통해 나온 파워의 비가 일정한 비율을 가지고 있을 때는 출력단에서 파워 분배기로 사용할 수 있다. 그 중에서 솔리톤 파워와 도파로를 통한 파워가 비슷하게 분배될 경우에 출력단 C는 OR 함수로 출력단 D는 AND 함수의 기능을 할 것이다. 그러나 C와 D로 나오는 파워의 비율은 굵은 각에 의해서만 결정되는 것이 아니고 적절한 입력 파워(P_{in}), 비선형성의 크기(α), 도파로의 길이(I_2)에 의해서도 민감하므로 각각의 파라미터를 조정하여 XOR, AND, 그리고 OR 함수의 기능을 갖는 완전 광 논리 연산소자를 구현한 결과를 3.2절에 나타내었다.

III. 수치 해석

3.1. 완전 광 스위치

수치 계산을 위한 각 파라미터 값은 다음과 같다. 자유 공간 파장 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$, 각 물질의 굴절률 $n_f=2.2888$, $n_s=2.2885$, $n_c=2.2885$, 비선형 계수 $\alpha=1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{V}^2$, 도파로의 두께 $d=6 \mu\text{m}$, $P_0=8.91 \text{ mW/m}$ 이다. P_0 는 아래식에 의해 정

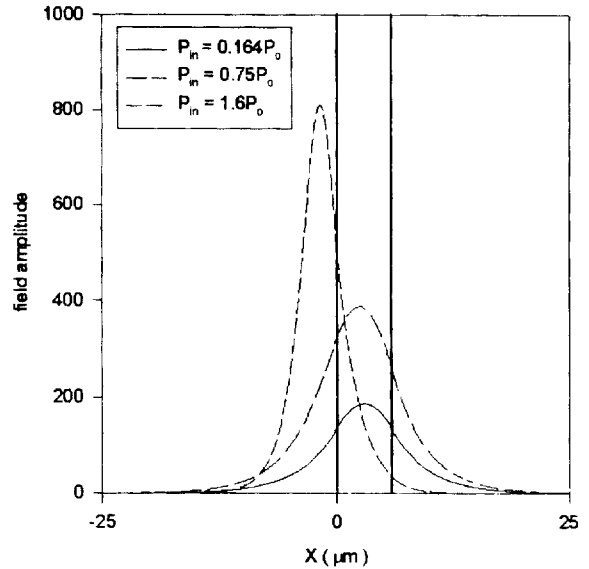


그림 3. 다양한 입력 파워에 따른 비선형 TE₀ 모드의 전계 분포.

규화된 파워이다.^[8]

$$P_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} / 3\alpha k_0 \tag{9}$$

입력 전계는 비선형 분산 곡선에서 입력 파워에 해당하는 비선형 TE₀ 모드가 사용되었다. 그림 3은 다양한 입력 파워에 대한 비선형 TE₀ 모드의 입력 전계 분포를 나타낸다. 파워의 증가에 따라 입력 전계 분포는 점차 비선형 물질로 빠져나간다. 그림 4는 굵은 각이 0.5°일 때 굵은 비선형 도파로를 따라가는 비선형 전계의 진행을 나타낸다. 낮은 입력 파워 영역에서($P_{in}=0.164P_0$), 진행되는 전계는 마치 선형 도파로에서와 마찬가지로 도파로 안에 대부분의 파워가 제한된 채로 진행한다(그림 4-a). 도파로가 구부러진 부분에서도 대부분의 전계는 도파로를 따라 진행하고 비선형 물질로 빠져 나오는 파워는 상당히 작다. 입력 파워가 중간 정도일 때($P_{in}=0.75P_0$), 입력 파워에 의한 비선형 물질의 굴절률이 도파로의 굴절률에 비해 비교할 만큼 커져 도파로가 구부러진 부근에서 전체적인 전계의 분포는 도파로를 따라가되 비선형 물질에서도 도파로에 평행한 self-focusing channel이 생겨 일부의 파워가 비선형 물질로 빠져나간다(그림 4-b). 그러나 입력 파워가 클 때($P_{in}=1.6P_0$)는 도파로가 굵은 부근에서 비선형 물질안에 공간상의 솔리톤을 형성한다. 이 때 솔리톤은 도파로를 따라가지 않고 비선형 물질안에 특정 각도를 가지고 self-focused channel을 형성하여 대부분의 파워가 비선형 물질로 나오게 된다. 그러므로 그림 4는 입력 파워에 따라 완전 광 스위치나 파워 분배기로 사용될 수 있음을 보여준다. 그리고 비선형 물질안의 다양한 위치에 검파기를 놓으므로써, 입력 파워에 따른 각 검파기에서의 전달 특성 $T=P_{out}/P_{in}$ 의 계산 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 1에서와 같이 검파기의 위치는 각도 ϕ 로 나타내지고 검파기의 폭은 $12 \mu\text{m}$ 였다. ϕ 가 양수이면 Z방향의 오른쪽에 검파기가 있음을 의미한다.

그림 5-a에서와 같이 입력 파워를 증가시킴에 따라 도파로

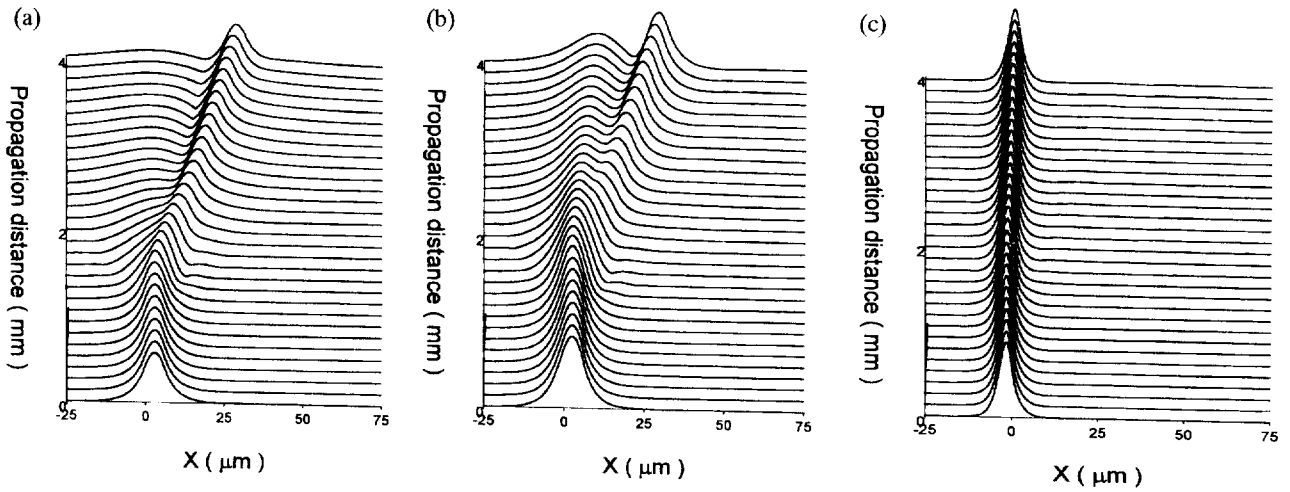


그림 4. 다양한 입력 파워에 따른 비선형 TE₀ 모드의 빔 전파 특성. (a) 입력 파워가 낮을 때 ($P_{in}=0.164P_0$), (b) 입력 파워가 중간일때 ($P_{in}=0.75P_0$), 그리고 (c) 입력 파워가 클때 ($P_{in}=1.6P_0$)

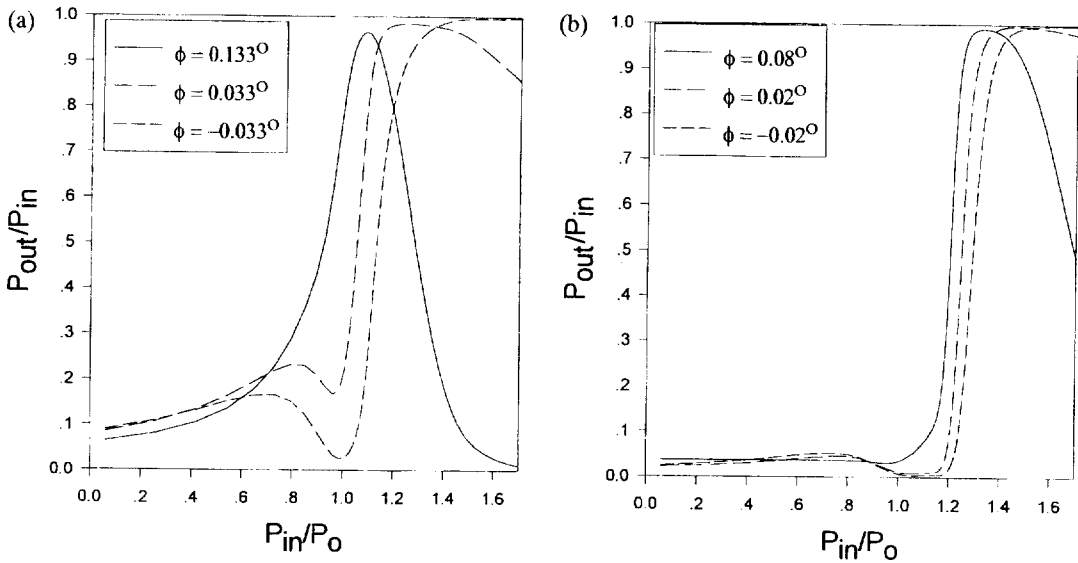


그림 5. 입력 파워에 따라 비선형 물질안의 다양한 검파기 위치에서의 출력 전달 특성. (a) 굽은 각 $\theta=0.5^\circ$, 그리고 (b) 굽은 각 $\theta=0.3^\circ$

안에 남아 있는 파워는 점차 감소하고 비선형 물질안으로 진행하는 파워는 비선형 물질안에서 솔리톤 양을 증가시킨다. 비선형파와 같이 솔리톤의 진행 각도는 입력 파워에 좌우되기 때문에 입력 파워의 증가는 공간상의 솔리톤이 self-focusing effect에 의해 특정한 각을 가지고 비선형 물질안에서 진행하게 만든다. 이 경우 전달 특성 T의 값은 1에 가까워진다. 굽은 각이 $\theta=0.5^\circ$ 인 경우 "ON"과 "OFF" 상태의 파워 소멸비는 5:1 정도를 약간 넘는다. 입력 파워가 낮은 파워 영역에서 ($P_{in}<0.6P_0$) 도파로가 굽은 부분에서 파워의 방사때문에 입력 파워의 10% 정도는 방사 손실을 초래하고 결국 스위칭 특성은 효과적이지 못하다. 방사 손실을 줄이기 위해 굽은 각을 줄였을 때의 향상된 스위칭 특성이 그림 5-b에서와 같이 얻어졌다. 그림 5-b에서는 굽은 각 $\theta=0.3^\circ$ 으로 줄임으로써 "ON"과 "OFF" 상태의 파워 소멸비가 20:1 정도로 향상되었다. 그림 5로부터 파워 전달 곡선은 굽은 각 θ 와 검파기의 위치 ϕ 에 의존함을 알 수 있다.

3.2. 논리 연산소자

모든 예제를 계산하는데 있어 각 물질의 굴절률 $n_f=1.49$, $n_s=n_c=1.485$, 도파로의 두께 $d=3\mu m$, 분기각 $\phi=0.5^\circ$, 입력 도파로의 길이 $L_1=1.146\mu m$, 출력 도파로의 길이 $L_3=1\mu m$, 입력 도파로 사이의 간격 $S=20\mu m$ 는 공통적인 파라미터이다. 각각의 도파로의 입력전계로는 TE₀ 모드를 여기시켰고 입사하는 두 입력광 사이의 위상차는 없었다. 그리고 P_0 는 A에 입력을 주었을 때 소자의 끝단의 수치 계산 영역에서 정규화된 파워로 정의하였다.

첫 번째 예제에 있어 자유공간 파장 $\lambda=0.8\mu m$, 중간 도파로의 길이 $L_2=2\mu m$, $P_{in}=30\text{ W/m}$, 비선형 계수 $\alpha=0.6377\times 10^{-11}\text{ (m}^2\text{/V}^2\text{)}$ 이 사용되었다. 그림 6은 θ 에 따른 각 입력에 대한 각 출력단에서의 정규화된 출력 파워 특성을 나타내었다. 입력 단 A에만 입력을 주었을 때, 출력단 C로는 굽은 각 θ 에 상관없이 $0.9P_0$ 이상의 파워가 출력되었고, 출력단 D로 나오는 파워의 양은 아주 작았다. 입력단 B에만 입력을 주었을 때, 출

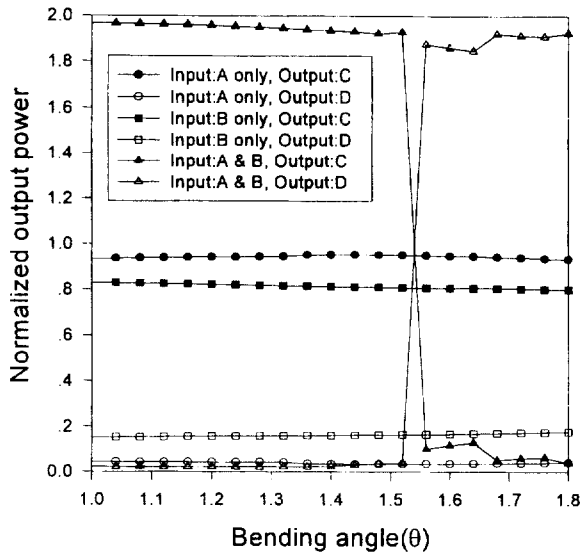


그림 6. 굽은 각 θ 에 따른 각 입력에 대한 각 출력단에서의 정규화된 출력 파워 특성. 여기서 $\lambda=0.8 \mu\text{m}$, $l_2=2 \mu\text{m}$, $P_{in}=30 \text{ W/m}$, $\alpha=0.6377 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 이다.

력단 C에서는 굽은 각에 상관없이 $0.8P_0$ 이상의 파워가 출력되었고 출력단 D로는 $0.2P_0$ 이하의 파워가 출력되었다. 입력단 A와 B에 모두 입력을 주었을 경우에는, 굽은 각 θ 에 따라 C와 D로 출력되는 파워가 결정되었다. 굽은 각이 작은 영역 ($\theta < 1.52^\circ$)에서는 출력단 C에서 $1.93P_0$ 정도의 파워가 출력되고, 굽은 각이 큰 영역 ($\theta > 1.52^\circ$)에서는 $0.07P_0$ 정도의 파워로 급격히 떨어진다. 그러나 출력단 D로 나오는 파워는 출력단 C의 경우와 반대이다. 그림 6에서 보듯이 굽은 각이 작은 영역 ($\theta < 1.52^\circ$)인 경우 출력단 C에서 이득이 있는 OR 함수를, 굽은 각이 큰 영역 ($\theta > 1.52^\circ$)인 경우 XOR 함수를 얻을 수 있다. 그리고 굽은 각 θ 가 큰 영역 ($\theta > 1.52^\circ$)인 경우 출력단 D에서 이득이 있는 AND 함수를 얻을 수 있다. 그림 7은 $\theta=1.4^\circ$ 인 경우 빔 전파 특성을 나타내었다. 그림 7-a는 입력을 A에만 준 경우로서 선형 도파로에서와 비슷하게 대부분의 파워가 도파로를 따라 진행한다. 그림 7-b는 입력을 B에만 준 경우로서 $0.8P_0$ 정도의 파워가 도파로를 따라 진행하고 $0.17P_0$ 정도의 파워가 비선형 물질로 진행하였다.

그림 7-a, b는 입력을 A 또는 B에만 준 경우의 빔 전파 특

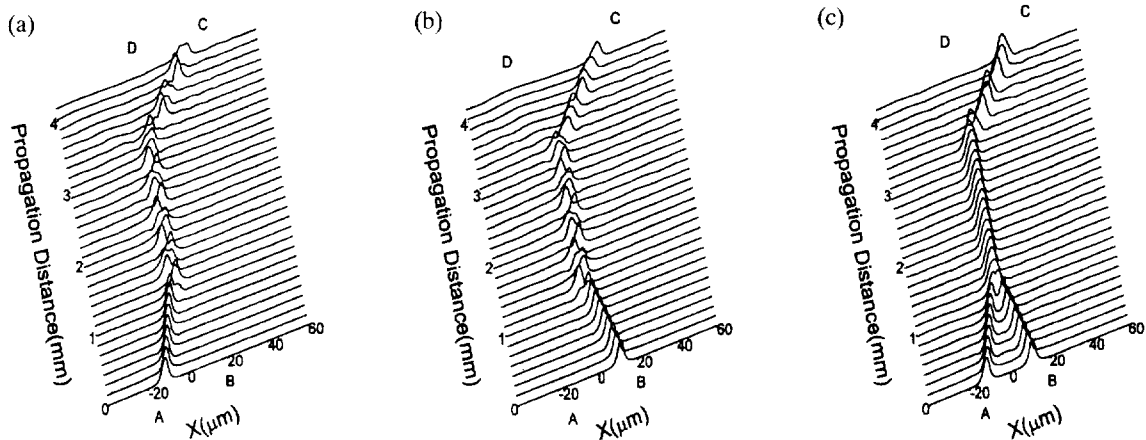


그림 7. 굽은 각 $\theta=1.4^\circ$ 일 때 각 입력단에 따른 출력된 빔 전파 특성. (a) 입력단이 A일 때, (b) 입력단이 B일 때, 그리고 (c) 입력단이 A와 B일 때

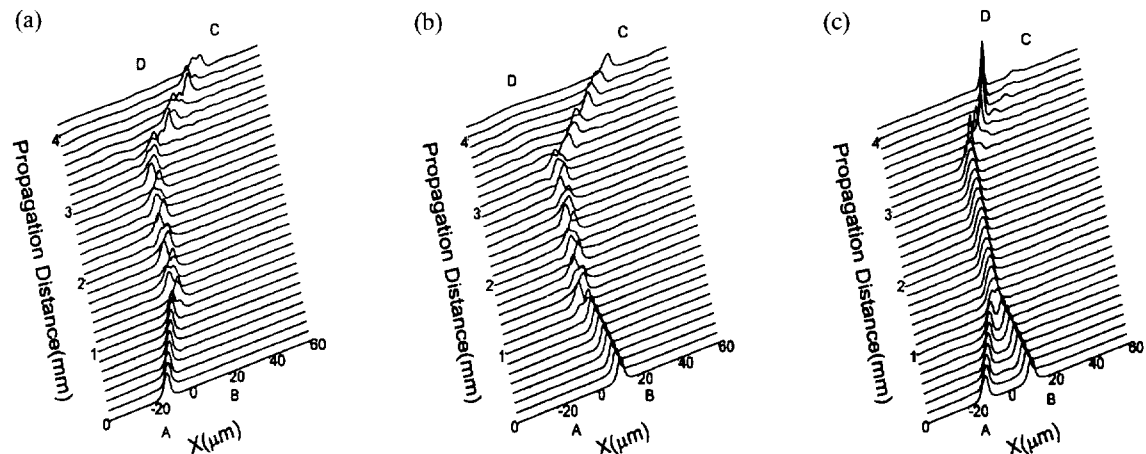


그림 8. 굽은 각 $\theta=1.7^\circ$ 일 때 각 입력단에 따른 출력된 빔 전파 특성. (a) 입력단이 A일 때, (b) 입력단이 B일 때, 그리고 (c) 입력단이 A와 B일 때

성인대 도파로가 합쳐진 I_2 영역에서는 도파로의 너비가 $2d$ 가 되어 TE_0 모드와 TE_1 모드가 같이 여기되며 두 모드 사이의 전파상수의 차이때문에 일정한 beating 주기를 가지고 서로 간섭하면서 진행을 한다. 이러한 I_2 영역에서의 두 모드 사이의 간섭을 없애기 위해서 d 의 폭을 줄여 TE_0 모드만 여기되도록 소자를 설계하면 안정된 빔 전파특성을 얻을 수 있다. 그림 7-c는 입력이 A와 B에 위상차 없이 같이 들어간 경우로 도파로가 합쳐지는 부근에서 안정적인 TE_0 모드를 만들어 구부러진 도파로 끝까지 대부분의 파워를 도파시킨다. 그림 8은 $\theta=1.7^\circ$ 일 경우 빔 전파 특성을 나타내었고 입력이 하나일 때의 그림 8-a와 8-b는 그림 7-a과 7-b의 경우와 비슷한 특성을 갖는다. 그림 8-c는 도파로가 합쳐지는 부근에서 안정적인 모드를 만들어 도파로가 구부러진 부근에서 솔리톤을 형성하여 비선형 물질로 대부분의 파워가 빠져나간다. 그림 6, 7, 8를 이용하여 $\theta=1.4^\circ$, $\theta=1.7^\circ$ 인 경우에 구현 가능한 논리 연산소자를 표 1에 도표화하였다. 팔호안의 이탤릭 숫자는 수치계산 결과를 나타낸다. 아래의 두 예제는 적절한 입력 파워에서 I_2 와 α 를 조절함으로써 여러 가지 논리 연산 함수를 구현 할 수 있음을 보여준다. 두 번째 예제에서는 OR 함수와

AND 함수를 구현하기 위해 새로운 I_2 와 α 의 값을 사용하였다. $I_2=3 \text{ mm}$ 이고 $\alpha=1.1797 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 인 점을 제외하면 첫 번째 경우의 파라미터와 같다. 이 때 θ 에 따른 각 입력에 대한 각 출력단에서의 정규화된 출력 파워 특성을 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 보듯이 하나의 입력단에 입력이 들어간 경우에는 예 상관없이 대부분의 파워가 출력단 C에서 출력이 되고, 입력이 양쪽 도파로에 가해진 경우에는 θ 가 0.6° 까지는 $2P_0$ 가 대부분 출력되고 θ 가 0.6° 이상인 영역에서 출력단 C로는 $0.75P_0$ 정도의 파워가 출력되고 출력단 D로는 $1.2P_0$ 정도의 파워가 출력이 되었다. 이 때 출력단 C에서 $0.5P_0$ 이상의 파워가 출력될 때 정규화된 출력 파워를 "1"로 볼 수 있는 광 thresholder를 이용한다면 θ 가 0.6° 보다 클 때 출력단 C와 D에서 각각 OR 함수와 AND 함수의 기능을 가질 수 있을 것이다. 표 2는 $\theta=0.5^\circ$, $\theta=0.7^\circ$ 인 경우 논리 함수를 도표화하였다. 표 2에서 B의 입력시 C로 출력된 파워가 증가하여 이득이 있는 OR 함수의 "1"과 "0" 사이의 파워 소멸비는 더욱 큰 값을 가졌다. 그러나 OR와 AND함수로 쓰인 출력단 C와 D의 파워 소멸비는 1:1을 가져야 하므로 제안된 소자는 논리 함수보다는 $0.75:1.20$ 의 파워 분배기로 사용될 수 있을 것이다. 다음

표 1. 굽은 각 $\theta=1.4^\circ$ 에서 이득이 있는 OR 함수 그리고 $\theta=1.7^\circ$ 인 경우 XOR 함수와 이득이 있는 AND 함수. 여기서 $\lambda=0.8 \mu\text{m}$, $I_2=2 \mu\text{m}$, $P_{in}=30 \text{ W/m}$, $\alpha=0.6377 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 이다.

입력파워 [W/m]		출력 단		
		$\theta=1.4^\circ$		$\theta=1.7^\circ$
$P_{in}=30$		OR with gain	XOR	AND with gain
A	B	C	C	D
0	0	0	0	0
1	0	1(0.95)	1(0.94)	0(0.03)
0	1	1(0.81)	1(0.80)	0(0.17)
1	1	1(1.93)	0(0.07)	1(1.90)

표 2. 굽은 각 $\theta=0.5^\circ$ 에서 이득이 있는 OR 함수 그리고 $\theta=0.7^\circ$ 인 경우 OR 함수와 AND 함수. 여기서 $\lambda=0.8 \mu\text{m}$, $I_2=3 \mu\text{m}$, $P_{in}=30 \text{ W/m}$, $\alpha=1.1797 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 이다.

입력파워 [W/m]		출력 단		
		$\theta=0.5^\circ$		$\theta=0.7^\circ$
$P_{in}=30$		OR with gain	OR	AND
A	B	C	C	D
0	0	0	0	0
1	0	1(0.96)	1(0.96)	0(0.02)
0	1	1(0.95)	1(0.95)	0(0.02)
1	1	1(1.97)	1(0.75)	1(1.20)

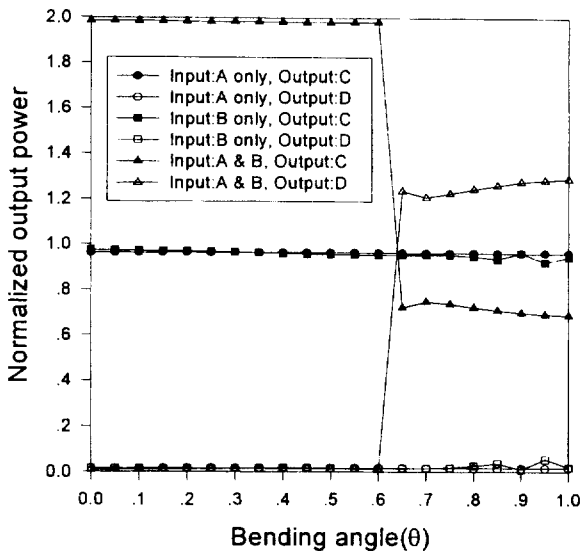


그림 9. 굽은 각 θ 에 따른 각 입력에 대한 각 출력단에서의 정규화된 출력 파워 특성. 여기서 $\lambda=0.8 \mu\text{m}$, $I_2=3 \mu\text{m}$, $P_{in}=30 \text{ W/m}$, $\alpha=1.1797 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 이다.

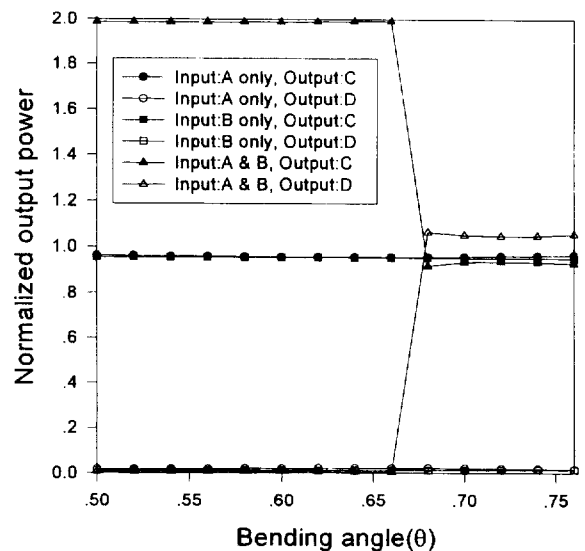


그림 10. 굽은 각 θ 에 따른 각 입력에 대한 각 출력단에서의 정규화된 출력 파워 특성. 여기서 $\lambda=0.6 \mu\text{m}$, $I_2=0.8 \mu\text{m}$, $P_{in}=26 \text{ W/m}$, $\alpha=1.1797 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 이다.

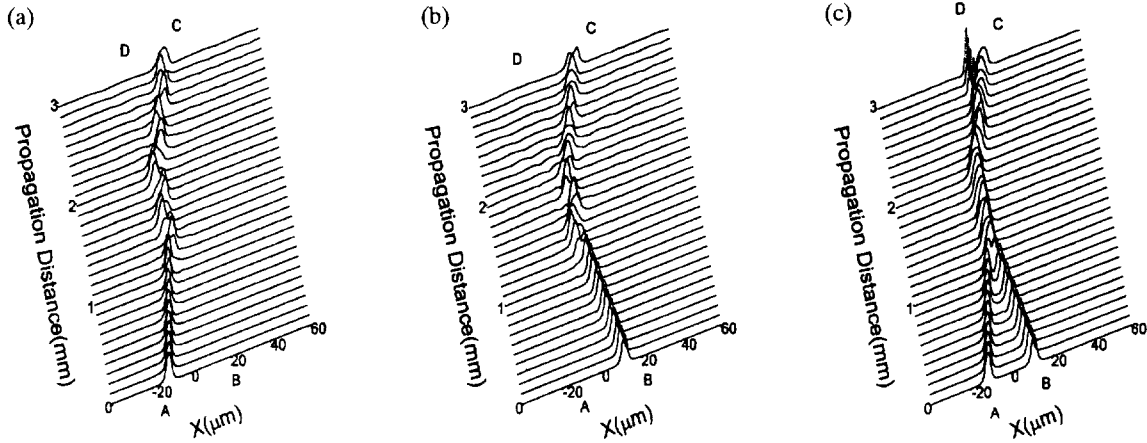


그림 11. 굽은 각 $\theta=0.7^\circ$ 일때 각 입력단에 따른 출력된 빔 전파 특성. (a) 입력단이 A일때, (b) 입력단이 B일때, 그리고 (c) 입력단이 A와 B일때

의 예제는 파워 소멸비가 1:1의 가능성을 가질 수 있음을 나타내 준다.

마지막으로 자유 공간 파장 $\lambda=0.6 \mu\text{m}$, $l_2=0.8 \mu\text{m}$, $P_{in}=26 \text{ W/m}$, $\alpha=1.1797 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 을 제외하면 모든 파라미터의 값은 일정하다. 그림 10은 에 따른 각 입력에 대한 각 출력단에서의 정규화된 출력 파워 특성을 나타내었다. 그림 7에서와 같이 하나의 입력단에 입력이 들어간 경우는 θ 에 상관없이 대부분의 파워가 C에서 출력이 되고, 입력이 양쪽 도파로에 가해진 경우에는 θ 가 0.66° 까지는 $2P_0$ 가 대부분 출력되고 θ 가 0.66° 이상인 영역에서 출력단 C로는 $0.93P_0$ 정도의 파워가 출력되고 출력단 D로는 $1.05P_0$ 정도의 파워가 출력이 된다. 그러므로 출력단 C와 D에서 $0.93:1.05$ (~1:1)의 파워 비율은 얻을 수 있었고 θ 가 0.66° 이상 일때 제안된 소자는 각 출력단 C와 D에서 OR 함수와 AND 함수를 얻었다. $\theta=0.7^\circ$ 일 때 빔 전파특성은 그림 11에 나타내었다.

입력이 A 또는 B 경우에는 그림 11-a와 그림 11-b에서와 같이 대부분의 파워가 도파로를 따라 도파하였다. 반면 그림 11-c에서와 같이 입력이 A와 B에 동시에 들어간 경우는 도파로가 구부러진 영역을 하나의 모드로 진행하다가 $0.93P_0$ 정도의 파워는 출력단 C를 따라 진행하였고 $1.05P_0$ 정도의 파워는 솔리톤을 형성하며 비선형 물질로 빠져나갔다. $\theta=0.6^\circ$, $\theta=0.7^\circ$ 인 경우 논리 연산함수는 표 3에 도표화하였다. 표 3에서

표 3. 굽은 각 $\theta=0.5^\circ$ 에서 이득이 있는 OR 함수 그리고 $\theta=0.7^\circ$ 인 경우 OR 함수와 AND 함수. 여기서 $\lambda=0.6 \mu\text{m}$, $l_2=0.8 \mu\text{m}$, $P_{in}=26 \text{ W/m}$, $\alpha=1.1797 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{V}^2$ 이다.

입력 파워 [W/m]		출력 단		
		$\theta=0.5^\circ$	$\theta=0.7^\circ$	
$P_{in}=26$		OR with gain	OR	AND
A	B	C	C	D
0	0	0	0	0
1	0	1(0.96)	1(0.96)	0(0.02)
0	1	1(0.95)	1(0.95)	0(0.01)
1	1	1(1.97)	1(0.93)	1(1.05)

의 OR 함수와 AND 함수의 "1"과 "0" 사이의 파워 소멸비는 표 2보다 향상되었다.

IV. 결 론

굽은 비선형 도파로를 가지고 완전 광 스위치 및 논리 연산 소자를 제안하였다. 두 구조에서 모두 비선형 도파로의 전달 특성에 기초를 두고 있고 입력 파워, 비선형성의 크기, 도파로의 굽은 각, 도파로의 길이 등의 파라미터를 적절히 조정함에 따라 스위칭 특성과 여러가지 논리 함수를 얻었다. 스위치로 제안된 소자는 다른 완전 광 스위치 소자에 비해 "ON"과 "OFF" 상태의 급격한 전이가 일어나는 것이 특징이다. 제안된 소자는 거의 이상적인 전달 특성 때문에 디지털 광 threshold로써 사용될 수 있을 것이다. 그리고 논리 연산소자로서 제안된 소자는 적당히 파라미터를 조정함에 따라 AND, OR, XOR 등의 논리 함수를 얻었는데 입력이 한쪽 팔로만 입사하였을때 도파로가 합쳐진 l_2 영역에서 두 모드사이의 간섭을 없애기 위해서 d의 폭을 줄여 TE₀ 모드만 여기되도록 소자를 설계하면 더 안정된 동작을 얻을 수 있을 것이다. 그러므로 제안된 소자들은 완전 광 신호 처리 분야에 응용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] H. Kanbara, H. Kobayashi, K. Kubodera, IEEE Photon. Technol. Lett. 1,149 (1989)
- [2] K. J. Blow, N.J. Doran, B. K. Nayar, Opt. Lett. 14, 754 (1989)
- [3] L. Thylen, N. Finalyson, C. T. Seaton, G. I. Stegeman, Appl. Phys. Lett., 51, 1304 (1987)
- [4] S. R. Friberg, A. M. Weiner, Y. Silberberg, B. G. Sfez, P. S. Smith, Opt. Lett. 13, 904 (1988)
- [5] Y. Silberberg, B. G. Sfez, Opt. Lett. 13, 1132 (1988)
- [6] J. P. Sabini, N. Finalyson, G. I. Stegeman, Appl. Phys. Lett. 55, 1176 (1989)

- [7] K. Ogusu, *Opt. Lett.* 16, 312 (1991)
- [8] W. C. Chang, S. F. Liu, W. S. Wang, *Electron Lett.*, 27, 2190 (1991)
- [9] N. J. Doran and David Wood, *J. Opt. Soc. Am.*, 4, 1843 (1987)
- [10] C. C. Yang, *Opt. Lett.* 16, 1641 (1991)
- [11] T. Tamir and G. Griffel, and H. L. Bertoni, *Guided-Wave Optoelectronics* (Plenum, 1995) pp.177-186.
- [12] J.-M. Jeong and M. E. Marhic, *Opt. Comm.* 85, 430 (1991)
- [13] Y. Chung, N. Dagli, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-26, 1335 (1990)
- [14] G. R. Hardley, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-28, 363 (1992)
- [15] C. T. Seaton, J. P. Valera, R. L. Sheemaker, G. I. Stegeman, J. T. Chilwell, S. D. Smith, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-21, 774 (1985)
- [16] E. M. Wright, G. I. Stegeman, C. T. Seaton, *Phys. Rev. A*, 34, 4442 (1986)
- [17] M. A. Gubbels, E. M. Wright, G. I. Stegeman, C. T. Seaton, *J. Opt. Soc. Am. B.*, 4, 1837 (1987)

All-optical signal processing in a bent nonlinear waveguide

Chan Ki Kim*, Jun-Young Jeong, Hyung-ook Jang, Junhyuck Song and Je-Myung Jeong

**Department of Electronic Communications Engineering, Hanyang Univ., Seoul, 133-791, Korea*

Department of Radio Science and Engineering, Hanyang Univ., Seoul, 133-791, Korea

(Received : July 24, 1997)

We proposed and studied an all-optical switching device made of a bent nonlinear waveguide and an all-optical logic gate made of a bent nonlinear Y-junction. The proposed devices as switch and a logic function are based on the evolution of nonlinear guided wave along a bent nonlinear waveguide. Since the characteristics of beam propagation depends on the nonlinearity, input power and bent angle of waveguide, the characteristics of output power transmission is calculated by variation the such parameters. Furthermore, by calculating the output power through the nonlinear media with different positions of detector in nonlinear media, we could find the ideal digital switching performance at specific position of detector and implement several all-optical logic functions (AND, OR, XOR) by power contrast between waveguide end and nonlinear media.