

# 강유전체 (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> 박막을 이용한 분포 정수형 아날로그 위상변위기 설계 및 제작

류한철\*, 김영태\*\*, 문승언\*, 광민환\*, 이수재\*

\* 한국전자통신연구원, \*\* 순천향대학교 정보기술공학부

Email : hcryoo@etri.re.kr

## Design and Fabrication of Distributed Analog Phase Shifter Using Ferroelectric (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> Thin Films

Han-Cheol Ryu\*, Young-Tae Kim\*\*, Seung-Eon Moon\*, Min-Hwan Kwak\*, Su-Jae Lee\*

\* Electronics and Telecommunications Research Institute.

\*\* Division of Information Technology Engineering, Soonchunhyang Univ.

### Abstract

This paper describes the design and fabrication of distributed analog phase shifter circuit. The phase shifter consist of coplanar waveguide(CPW) lines that are periodically loaded with voltage tunable (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> thin film interdigital(IDT) capacitors deposited by the pulsed laser deposition (PLD) on (001) MgO single crystals. The phase velocity on these IDT loaded CPW lines is a function of applied bias voltage, thus resulting in analog phase shifting circuits. The measured differential phase shift is 48° and the insertion loss decreases from -5dB to -3dB with increasing bias voltage from 0 to 40 V at 10GHz.

Key words : Phase shifter, Coplanar waveguide (CPW), Ferroelectric, (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>( BST), Interdigital(IDT) capacitor

### 1. 서 론

강유전체 위상변위기는 가해진 전기장의 세기에 따라 유전율이 변화하는 강유전체의 특성을 이용하여 위상을 조절하는 소자이다. 강유전체 마이크로파 소자는 크기가 작고 무게를 가볍게 할 수 있고, 빠른 응답성과 낮은 유전 손실, 그리고 높은 전력 처리 능력을 가지고 있으므로 현재 많이 쓰이고 있는 반도체 소자들을 대체할 수 있을 것으로 예상된다[1].

Interdigital(IDT) 축전기를 이용한 분포 정수형 위상변위기는 인가 전압을 이용하여 위상 속도를 변화시키는 전송 선로와 같이 생각할 수 있다. 이는 시간 지연 위상 변위 소자의 원리와 같다. 본 논문에서는 높은 특

성 임피던스를 가지는 coplanar waveguide (CPW) 선로와 주기적인 IDT 축전기를 조합한 형태의 회로를 사용하였다. 이러한 분포 정수형 아날로그 위상 변위기는 원하는 어떤 위상으로도 제어 가능하여 정해진 비트의 한계 내에서 동작하는 디지털 위상 변위기보다 정확한 범 제어를 할 수 있게 된다. Loaded 전송 선로의 위상 속도는 IDT 축전기 사이의 인가 전압의 함수이고, 회로내 IDT 축전기가 모두 병렬로 연결되어 동일한 인가 전압을 사용하기 때문에 한 개의 제어 라인만 있으면 된다. 이는 주어진 비트 수와 동일한 제어 라인의 수가 필요한 디지털 위상 변위기에 비해 상당히 좋은 장점이다. 또한 본 회로는 분포 정수형 성질이 IDT의 특성 변화에 둔감하게 만들므로 비교적 개략적인 설계가 가능하다[2].

본 논문에서는 먼저 분포 정수형 위상 변위기의 기

본적인 동작 원리와 이와 관련된 설계 방정식에 대하여 논의하고, 여기서 사용되는 주요 설계 변수에 따른 전체 회로의 특성을 분석하였다. 그리고 이를 이용하여 강유전체 BST 분포 정수형 아날로그 위상변위기의 설계 및 제작에 대하여 기술하였다.

## 2. 기본 이론 및 설계 방정식

분포 정수형 아날로그 위상변위기 회로는 높은 특성 임피던스를 가지는 전송 선로와 전압 제어 IDT 축전기가  $L_{sect}$ 의 간격을 두고 그림 1(a)와 같이 조합되어 있다. 이러한 주기적 구조에서 길이  $L_{sect}$ 의 전송 선로와 접지 부분에 병렬로 연결된 IDT 축전기를 unit cell로 정의한다. 그림 1(a)는 그림 1(b)와 같은 등가 회로로 근사할 수 있다. 이러한 주기 구조는 Bragg 주파수를 가지고, 전체 회로는 Bragg 주파수 아래에서 동작해야 하며 동작 주파수가 Bragg 주파수 근처로 가까워 갈수록 특성이 나빠지게 된다[3][4].

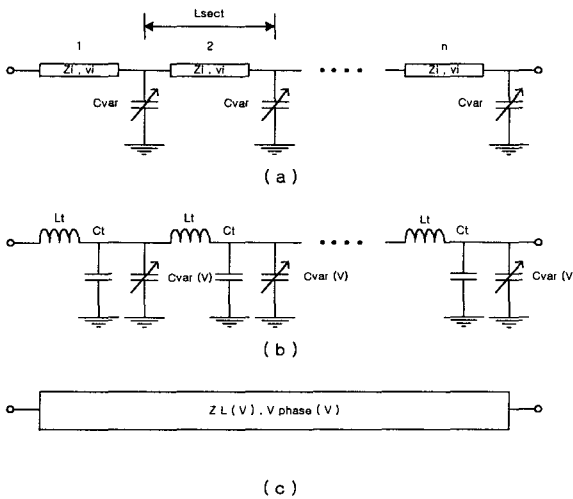


그림 1. (a)높은 특성 임피던스( $Z_i$ )와  $L_{sect}$ 의 거리를 두고 주기적으로  $C_{var}$ 를 연결한 분포 정수형 아날로그 위상 변위기의 schematic. (b)회로 해석을 위한 등가 회로. (c)Voltage-dependent 특성 임피던스( $Z_L(V)$ )와 위상 속도( $V_{phase}(V)$ )를 가지는 synthetic 전송 선로

본 회로의 Bragg 주파수는 다음과 같다.

$$f_{bragg} = \frac{1}{\pi \sqrt{L_t (C_t + C_{var})}} \quad (1)$$

$$L_t = \frac{L_{sect}}{v_i} Z_i \quad (2)$$

$$C_i = \frac{L_{sect}}{Z_i v_i} \quad (3)$$

여기서  $Z_i$ 와  $v_i$ 는 unloaded 전송 선로의 특성 임피던스와 위상 속도를 나타내고 이 전송 선로의 unit cell 당 인덕턴스와 커패시턴스를  $L_t$ 와  $C_t$ 로 나타낸다. 그리고 식 1의 Bragg 주파수 아래에서의 주기적 loaded 전송 선로는 그림 1(c)와 같이 synthetic 전송 선로로 간주할 수 있다. 이러한 synthetic 전송 선로는 주기적 축전기의 loading에 의하여 unit cell 길이당 커패시턴스가 증가한다. 그러나 인덕턴스 값은 원래의 unloaded 전송 선로의 인덕턴스 값과 변함이 없다. 또한 Loaded 축전기는 인가 전압에 따라 커패시턴스가 달라지므로 이러한 synthetic 전송 선로의 특성 임피던스와 위상 속도는 인가 전압에 따라 달라지게 된다. 그러므로 위와 같은 회로는 인가 전압을 변화시킴에 따라 위상 변위를 일으킬 수 있다.

$$Z_L = \sqrt{\frac{L_t}{(C_t + C_{var}(V))/L_{sect}}} \quad (4)$$

$$V_{phase} = \frac{1}{\sqrt{L_t (C_t + C_{var}(V))/L_{sect}}} \quad (5)$$

$$L_t = \frac{Z_i}{v_i} \quad (6)$$

$$C_i = \frac{1}{Z_i v_i} \quad (7)$$

분포 정수형 아날로그 위상 변위기의 설계 방정식을 전개하기에 앞서 두개의 중요한 인자를 정의한다. Loading 인자  $x$ 는 unit cell 길이당 IDT 축전기의 최대 커패시턴스와 unloaded 전송 선로 커패시턴스의 비이고, 인자  $y$ 는 IDT 축전기 커패시턴스의 최대값과 최소값의 비를 의미한다.

- Loading factor

$$x = \frac{C_{var}^{max}/L_{sect}}{C_i} \quad (8)$$

- Capacitance ratio

$$y = \frac{C_{var}^{min}}{C_{var}^{max}} \quad (9)$$

이 회로에서 중요한 설계의 핵심은 IDT 축전기의 커패시턴스가 최대일 때, loaded 전송 선로의 특성 임피던스가  $50\Omega$  되도록 해야 하는 것이다. 이를 만족시키기 위해서 식 4, 6, 7 그리고 식 8을 이용하여 unloaded 전송 선로의 특성 임피던스와 loading 인자  $x$ 의 관계를 식 10에 나타내었다.

$$Z_i = 50\sqrt{1+x} \quad (10)$$

또한, 식 1, 2, 3 그리고 식 8을 조합하면 IDT 축전기 사이의 거리  $L_{sect}$  와 Bragg 주파수와와의 관계를 알 수 있다. 그리고 식 1에서 Bragg 주파수는 인가 전압에 영향을 받는데 IDT 축전기의 커패시턴스가 최대일 때 최소가 됨을 알 수 있다. 그러므로 인자  $x$  이외에 IDT 축전기의 최대 커패시턴스가 결정되어야  $L_{sect}$ 를 결정할 수 있다. 식 12를 보면  $L_{sect}$ 와 IDT의 커패시턴스의 최대값은 상호 작용을 하고 있음을 알 수 있다.

$$L_{sect} = \frac{v_i}{\pi f_{bragg}^{min} \sqrt{1+x}} \quad (11)$$

$$C_{var}^{max} = xL_{sect}C_l = x \frac{L_{sect}}{Z_i v_i} \quad (12)$$

관심 주파수 대역에서 unit cell 당 최대 가능 위상 변위는 다음과 같다.

$$\delta\theta = 2\pi f \frac{L_{sect}}{v_i} (\sqrt{1+x} - \sqrt{1-xy}) \quad (13)$$

식 13에서 loading 인자  $x$ 값이 커지면 더 많은 위상 변위가 일어난다는 것을 알 수 있다. 관심 주파수에서 360°의 위상 변위를 일으킬 수 있는 unit cell의 수는 식 13에서 유추할 수 있다.

### 3. 소자 제작 및 실험 결과

초고주파 영역에서 그 특성이 우수한 것으로 알려져 있는 강유전체 ( $Ba_{0.6}Sr_{0.4}$ ) $TiO_3$  (BST)를 Pulsed Laser Deposition(PLD) 방법으로 (001) MgO 기판에 400 nm 두께의 박막을 증착하였다. 그 후 강유전체 박막위에 2 um 두께로 금속막을 증착한 후 일반적인 사진 식각을 이용하여 소자를 제작하였다[5].

IDT 축전기 밑에 들어가는 BST의 유전율 변화의 한계를 생각하여 위에서 정의한 인자  $y$ 값을 0.5로 고정한다. 그리고 X 대역에서 사용하는 위상 변위기를 제작하기 위해 Bragg 주파수를 고려하여 IDT 축전기의 커패시턴스의 최대값을 0.2pF으로 정하였다. 그리고 BST를 포함한 기판에 CPW의 width를 20 um로 고정하여 인자  $x$ 값에 대응하는  $Z_i$ 의 값으로 CPW의 gap을 정한 후, HFSS을 이용하여 시뮬레이션하여 나온 유효 유전율로 unloaded CPW의 위상 속도를 계산하고 이를 이용하여  $L_{sect}$ 값을 결정하였다. 여기서 BST의 유전율은 1000, 유전체 손실 0.1, 그리고 두께는 0.4 um로

고정하였다. 그림 2에  $x$  값 변화에 따른 unit section 당 가능 위상 변위 각도를 나타내었다.

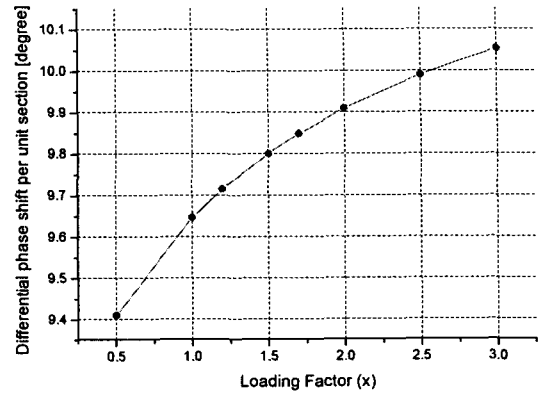


그림 2.  $x$  값 변화에 따른 unit section 당 가능 위상 변위 각

이러한 결과를 이용하여 360°의 위상 변위를 일으킬 수 있는 unit cell의 수를 구하면 그림 3과 같이 360°의 위상 변위를 위한 전체 소자 크기를 파악할 수 있다.

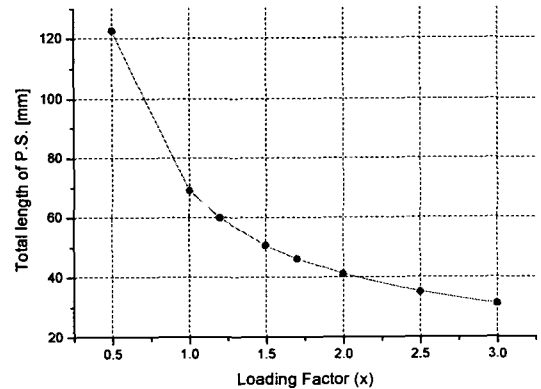


그림 3.  $x$  값 변화에 따른 360° 변위를 위한 위상 변위기의 전체 길이

인자  $x$ 값의 변화에 따른 Bragg 주파수의 변화를 그림 4에 보였다. IDT의 커패시턴스의 최대값이 0.2pF인 경우 10GHz 대역에서 사용할 수 있음을 알 수 있고, 사용 주파수 10GHz 대역 이상으로 높이기 위해서는 식 1에서 알 수 있듯이 IDT 축전기 커패시턴스의 최대값을 낮추어야 한다.

이와 같이 중요 설계 인자  $x$  값에 따라 위상변위기의 특성 및 크기를 예측할 수 있지만 이를 위해서는 고주파 대역에서 박막의 정확한 해석이 필요하다.

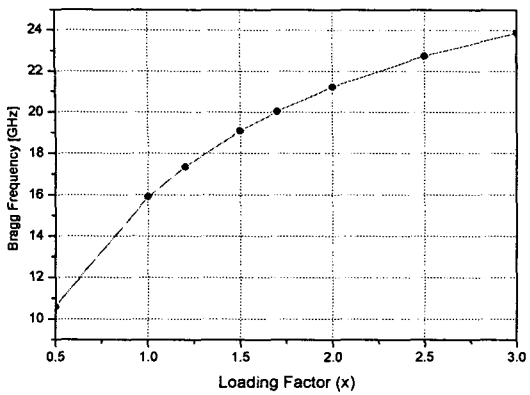


그림 4 x 값 변화에 따른 Bragg Frequency

이러한 박막 고주파 특성의 정확한 해석과 IDT 축전기의 정확한 특성 파악의 어려움에 대한 대안으로 IDT 축전기의 특성 변화에 둔감하게 동작하는 분포 정수형 성질을 이용하여 비교적 개략적인 설계가 가능하도록 하였다. 그러나 MgO 기판위의 BST가 IDT 축전기 아래에만 있는 것이 아니라 CPW의 gap에도 BST가 깔려 있으므로 인가 전압에 따라 IDT 축전기의 커패시턴스 변화 이외에 unloaded CPW의 특성 임피던스 및 위상 속도가 변하여 전체 특성에 나쁜 영향을 미친다. 이에 대한 방안으로 인가 전압 변화에 따라 IDT 축전기의 커패시턴스값만 변하고, unloaded CPW의 위상 속도에는 영향을 미치지 않도록 하여 보다 정확한 설계를 가능하게 하기 위해서는 MgO 기판위의 BST가 IDT 축전기 아래 부분에만 위치하고 CPW gap을 비롯한 다른 부분의 BST를 모두 제거하는 BST 부분 식각 공정 기술이 필요하다.

제작한 소자의 인가 전압에 따른 반사 손실을 그림 5에 나타내었다.

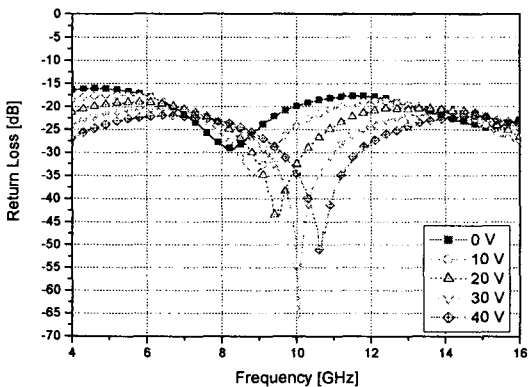


그림 5. 인가 전압에 따른 반사 손실

위 그림에서 4~16GHz 전 대역에서 반사 손실 -15dB 이하의 광대역 특성을 보였다. 그리고 인가 전압이 증가함에 따라 공진 주파수가 올라감을 볼 수 있다. 이는 인가 전압이 증가함에 따라 BST의 유전 상수가 감소하고 이에 따라 unloaded CPW의 위상 속도가 증가한다. 그러면 이에 대응하여  $L_{sect}$  값이 증가하여야 하지만  $L_{sect}$  값이 고정되어 있으므로 공진 주파수가 올라간 것이다.

그림 6에는 제작한 소자의 인가 전압에 따른 삽입 손실을 나타내었다.

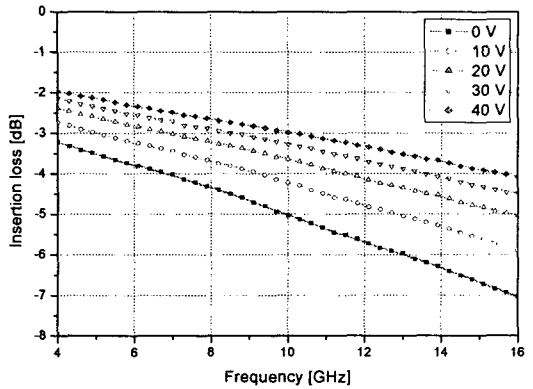


그림 6. 인가 전압에 따른 삽입 손실

위 그림을 살펴보면 인가 전압이 증가함에 따라 삽입 손실이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서와 마찬가지로 인가 전압이 올라가면 BST의 유전율이 줄어들어 유전 손실이 감소하므로 전체 삽입 손실이 줄어든 것이다. 이러한 현상도 BST 식각 공정이 안정화되어 BST 부분적 식각이 가능하면 인가 전압에 따라 비슷한 삽입 손실의 특성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

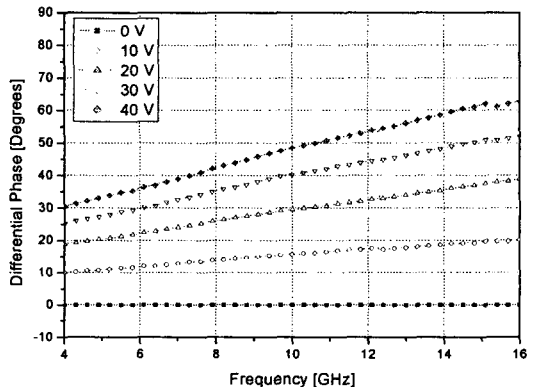


그림 7. 인가 전압에 따른 차등 위상 변위

그림 7은 인가 전압에 따른 차등 위상 변위값을 나타낸다. 위 그림에서 10GHz에서 인가 전압 40 V까지 증가하였을 때, 48°의 차등 위상 변위 값을 나타내었다. 그러므로 360°의 위상 변위 값을 얻기 위해서는 앞에서 정의한 unit cell의 개수를 증가시키면 된다. 이때 차등 위상 변위 값만 증가하는 것이 아니라 전체 삽입 손실도 증가하게 되므로 이에 대한 대처로 BST 부분 식각 공정을 안정화하여 유전 손실을 줄이고 정확한 설계 변수를 찾는 것이 중요하다.

#### 4. 결 론

PLD법으로 MgO 기판위에 증착한 강유전체 BST 박막을 이용하여 높은 특성 임피던스를 가지는 CPW선로와 주기적인 IDT 축전기를 조합한 형태의 X 대역 분포 정수형 아날로그 위상 변위기를 설계, 제작하였다. 제작된 소자는 4~16 GHz 대역에서 반사 손실 -15 dB 이하의 광대역 특성을 보였다. 그리고 10 GHz에서 인가 전압을 0 V에서 40 V로 증가시켰을 때, 차등 위상 변위 값이 48°, 삽입 손실이 -5 dB에서 -3 dB로 감소하는 특성을 보였다. 향후 공정상의 문제를 보완하면 보다 좋은 특성을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M. J. Lancaster, J. Powell, A. Porch, "Thin-film ferroelectric microwave devices," *Supercond. Sci. Technol.* vol. 11 pp. 1323-1334, 1998.
- [2] Amit S. Nagra, Robert A. York, "Distrivuted analog phase shifters with low insertion loss," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp. 1705-1711, September 1999.
- [3] M. J. W. Rodwell, M. Kamegawa, R. Yu, M. Case, E. Carman, and K. S. Giboney, "GaAs nonlinear transmission lines for picosecond pulse generation and millimeter-wave sampling," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, pp. 1194-1024, July 1991.
- [4] M. J. W. Rodwell, S. T. Allen, R. Y. Yu, M. G. Case, U. Bhattacharya, M. Reddy, E. Carman, M. Kamegawa, Y. Konishi, J. Push, R. Pallela, and J. Esch, "Active and nonlinear wave propagation devices in ultrafast electronics and optoelectronics," *Proc. IEEE*, vol. 82, pp. 1035-1059, July 1994.
- [5] W. J. Kim, E. K. Kim, S. E. Moon, S. K. Han,

S. J. Lee, K. Y. Kang, "Microwave phase shifters Using Ferroelectric (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> Films," MRS proceeding (to be published).