

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

류한철, 문승연, 이수재, 광민환, 이상석, 김영태  
한국전자통신연구원

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

HAN-CHEOL RYU, SEUNG EON MOON, SU-JAE LEE, MIN-HWAN KWAK, SANG-SEOK LEE, AND  
YOUNG-TAE KIM  
KETI

### Abstract

This work presents the design, fabrication and microwave performance of distributed analog phase shifter (DAPS) fabricated on (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> (BST) thin films for X-band applications. Ferroelectric BST thin films were deposited on MgO substrates by pulsed laser deposition. The DAPS consists of high impedance coplanar waveguide (CPW) and periodically loaded tunable BST interdigitated capacitors (IDC). In order to reduce the insertion loss of DAPS and to remove the alteration of unloaded CPW properties according to an applied dc bias voltage, BST layer under transmission lines were removed by photolithography and RF-ion milling. The measured results are in good agreement with the simulated results at the frequencies of interest. The measured differential phase shift based on BST thin films was 24° and the insertion loss decreased from 1.1 dB to 0.7 dB with increasing the bias voltage from 0 to 40V at 10 GHz.

**Key Words** : Ferroelectric thin films, distributed analog phase shifter, coplanar waveguide, interdigitated capacitor, phased array antenna.

### 1. 서론

강유전체 박막은 가해주는 전기장의 세기에 따라 유전율이 변화하는 강유전체의 특성을 이용한 초고주파 가변 소자로의 응용으로 많은 관심이 집중되고 있다. 특히, BST 박막은 높은 유전을 변화와 작은 유전 손실 특성을 가지므로 많은 연구가 진행되었다.<sup>1-4)</sup> 최근엔 박막 성장 기술 및 공정 기술의 발전과 더불어 새로운 회로 설계 기술의 개발로 초고주파 가변 소자로의 강유전체 박막 적용이 많은 발전을 이루었다.<sup>5-7)</sup> 또한, 위상 배열 안테나에 적용할 때, 강유전체 아날로그 위상 변위기는 디지털 위상 변위기에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 예를 들어, 주어진 비트 수와 동일한 제어 라인의 수가 필요한 디지털 위상 변위기에 비해 아날로그 위상 변위기는 단 하나의 제어 라인으로

동작이 가능하다. 그리고 아날로그 위상 변위기는 원하는 어떤 위상으로도 제어 가능하여 정해진 비트의 한계 내에서 동작하는 디지털 위상 변위기보다 정확한 빔 제어를 할 수 있게 된다.

본 논문에서는 전체 회로의 삽입 손실을 줄이기 위해서 IDC(Interdigitated Capacitor)아래의 BST를 제외한 나머지 부분의 BST를 식각하여 제작한 분포 정수형 아날로그 위상 변위기에 대하여 기술하였다. 보다 정확한 회로 구성을 위해 전자기 시뮬레이터를 이용하여 설계하였다. 제작된 분포 정수형 위상 변위기의 X-band특성은 실온에서 측정하여 시뮬레이션 결과와 동일한 결과를 나타내었다. 시뮬레이션에 사용한 BST 박막의 유전율은 IDC의 물리적 구조와 측정 결과로 컨포멀 사상 방법을 이용하여 추출하였다.<sup>8)</sup>

## 2. 회로 설계

분포 정수형 아날로그 위상 변위기는 높은 특성 임피던스를 가지는 CPW(coplanar waveguide)와 주기적으로 연결된 전압 제어 IDC로 구성되어 있다. 이러한 주기 구조는 slow-wave 전파 특성을 가진다. 또한 주기적으로 IDC가 loading된 CPW는 unit cell당 IDC의 크기만큼 선로 캐패시턴스가 커진 synthetic 전송 선로로 간주할 수 있다. 그러므로 이러한 synthetic 전송 선로의 특성 임피던스와 위상 속도는 인가 전압에 따라 변함을 알 수 있다. 분포 정수형 아날로그 위상 변위기의 특성 임피던스와 위상 속도는 다음과 같다.

$$Z_{S.T.L.}(V) = \sqrt{\frac{L_{CPW}}{C_{CPW} + C_{IDC}(V)/L_{unit.cell}}} \quad (1)$$

$$v_{S.T.L.}(V) = \frac{1}{\sqrt{L_{CPW}(C_{CPW} + C_{IDC}(V)/L_{unit.cell})}} \quad (2)$$

여기서,  $Z_{S.T.L.}(V)$ 는 synthetic 전송 선로의 특성 임피던스이고,  $v_{S.T.L.}(V)$ 는 synthetic 전송 선로의 위상 속도이다.  $L_{unit.cell}$ 은 IDC 사이의 거리이고,  $C_{CPW}$ 와  $L_{CPW}$ 는 IDC가 연결되지 않은 CPW의 선로 캐패시턴스와 인덕턴스를  $L_{unit.cell}$ 로 정규화한 값이다.  $C_{IDC}(V)$ 는 CPW에 연결된 전압 가변 IDC의 캐패시턴스이다. 그림 1에 분포 정수형 아날로그 위상 변위기의 개략도와 등가 회로를 나타내었다.

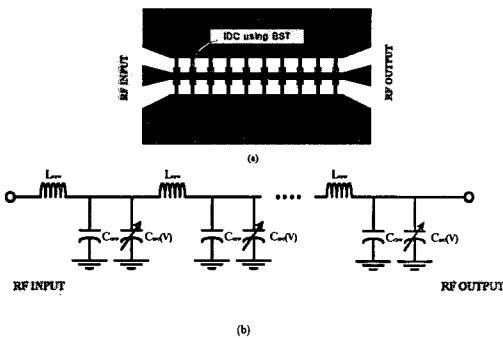


그림 1. (a) DAPS의 구조도 (b) DAPS의 등가회로

분포 정수형 아날로그 위상 변위기의 주요 설계 변수인 CPW의 특성 임피던스와 IDC 사이의 거리는 가변 IDC 캐패시턴스가 최대일 때 임피던스 매칭이 되도록 최적화되었다. 이는 BST에 인가된 전압이 0 V일 때, 즉 가변 IDC 캐패시턴스가 최대일 때, BST의 유전 손실이 최대이고 이를 고려하여 인가 전압 변화에 따른 삽입 손실의 변화를 최소

로 하기 위해서이다.

분포 정수형 아날로그 위상 변위기의 최소 삽입 손실 조건을 만족하는 최적 조건으로 CPW의 특성 임피던스를 74 Ω으로 결정하였다.<sup>9)</sup> 회로의 전체 크기 및 금속 손실을 고려하여 CPW의 폭을 50 μm로 결정하여 이에 따라 74 Ω을 만족하기 위한 CPW사이 겹은 0.5mm 두께의 MgO 기판에서 93μm로 결정되었다.

일반적으로 주기 구조를 가지는 회로는 Bragg 주파수를 가지고, 그 주파수 아래에서만 원하는 특성을 나타낸다. 본 회로의 Bragg 주파수는 다음과 같다.

$$f_{bragg} = \frac{1}{\pi L_{unit.cell} \sqrt{L_{CPW}(C_{CPW} + C_{IDC}^{MAX}/L_{unit.cell})}} \quad (3)$$

여기서  $C_{IDC}^{MAX}$ 는 IDC의 최대 캐패시턴스를 나타낸다. 분포 정수형 아날로그 위상 변위기를 X 밴드에서 사용하기에 충분한 Bragg 주파수를 위해서 BST를 이용한 IDC의 최대 캐패시턴스를 0.08 pF으로 결정하였다. 이 값을 이용하여 Bragg 주파수를 구하고 또한 IDC 사이의 거리를 구할 수 있다.

$$L_{unit.cell} = \frac{50}{\pi f_{bragg} L_{CPW}} \quad (4)$$

식 4로부터 IDC 사이의 거리는 0.65 mm로 결정되었다. 전체 회로에서 결정되지 않은 변수는 최대 0.08 pF의 캐패시턴스를 가지는 IDC의 구조이다. 두개의 IDC가 CPW에 병렬로 연결되므로 IDC의 최대 캐패시턴스는 0.04 pF이어야 한다. 0.04 pF의 IDC 구조를 찾기 위해 여러 구조의 IDC를 0.4 μm 두께의 BST 박막을 이용하여 설계 및 제작, 측정하였다. 그 결과 IDC의 finger 개수는 2개, 중첩 길이, finger의 폭과 겹이 5 μm인 IDC의 최대 캐패시턴스가 0.04 pF임을 확인하였다. 인가 전압이 0 V에서 40 V로 변할 때, 주파수에 따른 IDC의 캐패시턴스의 변화를 그림 2에 나타내었다. 이러한 측정 결과를 바탕으로 컨포멀 사상 방법을 이용하여 구한 BST 박막의 유전율이 1000에서 700으로 변함을 확인할 수 있었다.<sup>10)</sup>

## 3. 실험 절차 및 결과 분석

IDC 캐패시턴스 변화에 사용될  $Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$  박막은 200 mTorr 산소 압력에서 750°C 온도를 유지하는 (001) MgO 기판위에 PLD(Pulsed Laser

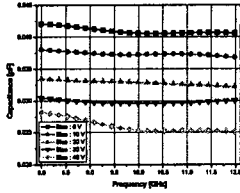


그림 2. 인가 전압 변화에 따른 IDC 캐패시턴스

Deposition)방법을 이용하여 증착하였다. 증착 시간을 조절하여 BST 박막의 두께를 0.4  $\mu\text{m}$ 로 증착하였다. 이러한 박막의 두께는 단면 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 확인하였다. 또한, XRD(X-Ray Diffractometer) 방법을 이용하여 박막이 결맞게 성장하였음을 확인할 수 있었다.<sup>11)</sup>

분포 정수형 아날로그 위상변위기의 정확한 설계와 인가 전압에 따른 CPW의 특성 임피던스와 위상 속도의 변화를 제거하기 위해서 IDC 아래 부분을 제외한 BST 박막을 사진 공정과 RF-ion milling을 이용하여 식각하였다. 이를 통해 회로의 전체 삽입 손실을 줄일 수 있었다. 회로의 전극은 X 대역에서의 표면 깊이를 고려하여 2  $\mu\text{m}$  두께로 금을 Cr 접합층과 함께 dc magnetron sputtering 방법을 이용하여 증착하였다. 제작된 소자의 사진을 그림 3에 나타내었다.

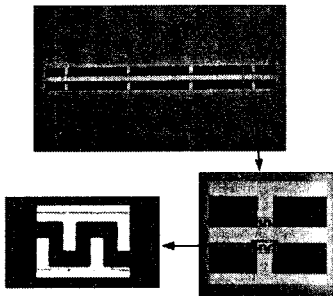


그림 3. 식각된 BST 박막을 나타낸 소자의 사진

분포 정수형 아날로그 위상변위기의 정확한 특성 예측을 위하여 HPSS를 사용하여 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션시 필요한 BST의 유전율은 키포멀 사상 방법을 이용하여 인가 전압에 따라 1000에서 600 값으로 변화시키며 사용하였다. 그리고 가장 나쁜 박막 상태를 고려하여 인가 전압에 상관없이 BST의 loss tangent를 0.1로 고정하였다. 회로의 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다.

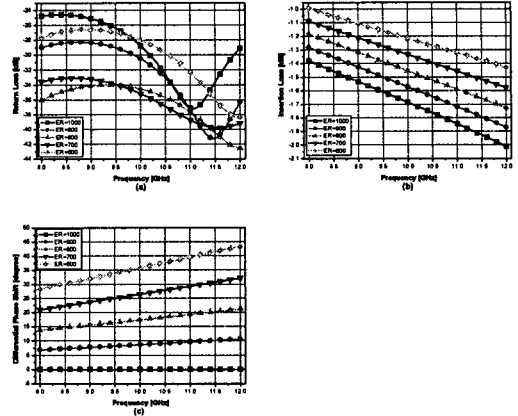


그림 4. BST 유전율을 1000에서 600으로 변화함에 따른 소자의 시뮬레이션 결과 (a) 반사 손실 (b) 삽입 손실 (c) 차동 위상 변위 각도

시뮬레이션 결과로부터 10 GHz에서 반사 손실은 -25 dB 이하를 유지하며 삽입 손실은 -1.7 dB에서 -1.2 dB로 변화하면서 36°의 차동 위상 변위 각도를 보였다. 시뮬레이션으로 예측한 결과를 확인하기 위해 앞에서 설명한 방법으로 소자를 제작, 측정하였다. 분포 정수형 아날로그 위상변위기의 초고주파 특성 측정은 HP8510C 벡터망 분석기와 pico-probe를 이용하였다. 인가 전압을 0 V에서 40 V로 변화 시킴에 따른 측정 결과는 그림 5에 나타내었다.

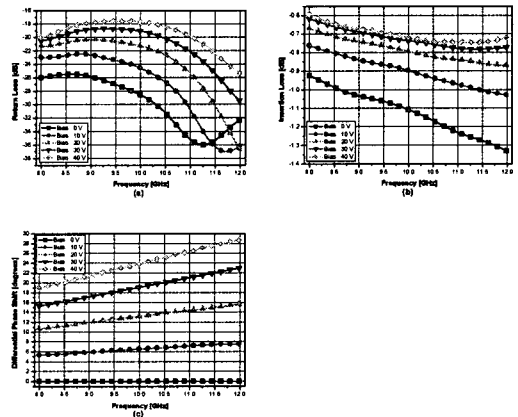


그림 5. 인가 전압을 0 에서 40 V로 변화에 따른 소자의 측정 결과 (a) 반사 손실 (b) 삽입 손실 (c) 차동 위상 변위 각도

표 1. 분포정수형 아날로그 위상변위기의 시뮬레이션 결과 및 측정 결과.

10 GHz에서의 시뮬레이션 결과				10 GHz에서의 측정 결과			
BST 유전율	반사 손실 [dB]	삽입 손실 [dB]	차동 위상 변위 각도 [°]	인가 전압 [V]	반사 손실 [dB]	삽입 손실 [dB]	차동 위상 변위 각도 [°]
1000	-29	-1.7	0	0	-29	-1.1	0
900	-30	-1.6	8.7	10	-25	-0.9	6.5
800	-35	-1.5	17	20	-21	-0.8	13
700	-35	-1.3	26	30	-19	-0.7	19
600	-28	-1.2	36	40	-18	-0.7	24

측정 반사 손실은 전 대역에서 -17 dB이하를 나타내면서 10 GHz에서 삽입 손실은 -1.1 dB에서 -0.7dB로 변화하였다. 이때 차동 위상 변위 각도는 24° 였다. 이러한 결과는 BST의 유전율을 1000에서 700으로 변화시켰을 때의 시뮬레이션 결과와 일치하였다. 단지 측정된 삽입 손실이 시뮬레이션 결과의 삽입 손실보다 작았다. 이는 시뮬레이션시 최악의 상황을 고려하여 BST의 loss tangent를 0.1의 높은 값으로 고정하였기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 X 대역 위상 배열 안테나에 사용할 분포 정수형 아날로그 위상 변위기를 설계, 제작하였다. 이 회로는 높은 특성 임피던스를 가지는 CPW(coplanar waveguide)와 주기적으로 연결된 전압 제어 IDC(interdigitated capacitor)로 구성되어 있다. 시뮬레이션 및 측정 결과를 표 1에 정리 비교하였다. 부분적으로 식각된 BST 박막을 이용한 분포 정수형 아날로그 위상변위기는 10 GHz에서 인가 전압을 0에서 40 V로 변화시킴에 따라 최대 -1.1dB의 삽입 손실을 가지고 차동 위상 변위 각도는 24°를 나타내었다. 또한, BST 박막의 부분 식각 공정을 통하여 BST 박막을 이용한 가변 초고주파 소자 설계의 정확성과 소자의 전체 삽입 손실을 줄일 수 있음을 확인하였다.

#### 참고 문헌

[1]. M. J. Lancaster, J. Powell, and A. Porch, *Supercond. Sci. Technol.* **11**, 1323 (1998).  
 [2]. S. J. Lee, S. E. Moon, M. H. Kwak, H. C. Ryu, Y. T. Kim, and S. K. Han, *Integr.*

*Ferroelectr.* **49**, 151 (2002).

[3]. S. J. Lee, S. E. Moon, H. C. Ryu, M. H. Kwak, and Y. T. Kim, *Appl. Phys. Lett.* **82** (2002) (to be published).  
 [4]. W. J. Kim, W. Chang, S. B. Qadri, J. M. Pond, W. W. Kirchoefer, D. B. Chrisey, and J. S. Horwitz, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 1185 (2002)  
 [5]. Y. Liu, B. Acikel, A. S. Nagra, T. R. Taylor, P. J. Hansen, J. S. Speck, and R. A. York, *Integr. Ferroelectr.* **39**, 313 (2001).  
 [6]. O. G. Vendik, M. A. Nikol'ski, and S. P. Zubko, *Integr. Ferroelectr.* **49**, 141 (2002).  
 [7]. J. Serraiocco, B. Acikel, P. Hansen, T. Taylor, H. Xu, J. S. Speck, and R. A. York, *Integr. Ferroelectr.* **49**, 161 (2002).  
 [8]. S. Gevorgian, E. Carlsson, S. Rudner, L. D. Wernlund, X. Wang, and U. Helmersson, *IEE Proc. Microw. Ant. Propag.*, **143**, 397 (1996).  
 [9]. A. S. Nagra, and R. A. York, *IEEE Trans MTT*, **47**, 1705 (1999).  
 [10]. E. K. Kim, S. E. Moon, S. J. Lee, S. K. Han, K. Y. Kang, and W. J. Kim, *Ferroelectrics* **272**, 333 (2002).  
 [11]. S. E. Moon, E. K. Kim, S. J. Lee, S. K. Han, K. Y. Kang and W. J. Kim, *Ferroelectrics* **272**, 333 (2002).