

## 강유전체 위상 변위기를 위한 Reactive Circuit 설계 및 구현

김영태\*, 문승언\*\*, 이수재\*\*, 김선형\*, 박준석\*\*\*, 조홍구\*\*\*  
 순천향대학교 정보기술공학부\*, 전자통신연구원\*\*, 국민대학교 전자정보 통신공학부\*\*\*

### Design and Implementation of Reactive Circuit for Ferroelectric Phase Shifter

Young-Tae Kim, Seung-Eon Moon, Su-Jae Lee, Sun-Hyeong Kim,  
 Jun-Seok Park and Hong-Goo Cho  
 Soonchunhyang University, ETRI, Kookmin University

**Abstract** - In this paper, in order to obtain a large differential phase shift with a little change in applied voltage, a ferroelectric reflective load circuit has been designed on top of barium strontium titanate (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> [BST] thin film. The design of the ferroelectric reflection-type phase shifter is based on a reflection theory of terminating circuit, which has a reflection-type analogue phase shifter with two ports terminated in symmetric phase-controllable reflective networks. To achieve large amounts of phase shift in low bias-voltage range, the effects of change of capacitance and transmission line connected with two coupled ports of a 3-dB 90° branch-line hybrid coupler have been investigated. A large phase shift with a small capacitance change in the parallel terminating circuit has been demonstrated in the paper.

찾을 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1 반사형 구조의 위상 변위기 이론

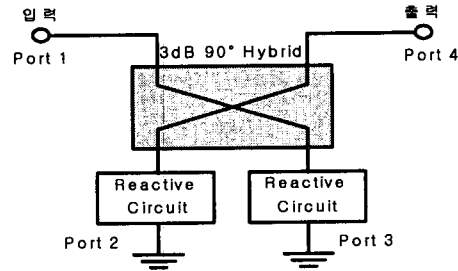


그림. 1 3-dB 90° 하이브리드 구조의 위상 변위기

## 1. 서 론

마이크로파 시스템의 구성요소로서 위상 변위기는 레이더 시스템, 각종 마이크로파 계측기와 측정 장비에 사용되고 있다. 일반적으로 위상 변위기는 페라이트 소자[1]를 이용하거나 반도체 소자[2]를 이용한 위상변위기가 쓰이고 있으나 페라이트 소자를 이용한 위상 변위기는 제어신호에 대한 응답이 느리기 때문에 빠른 빔 스캐닝 (beam scanning)이 요구되는 시스템에서는 사용하기가 힘들고 반도체 위상 변위기는 응답 속도는 빠르나 마이크로파 및 밀리미터 파 대역에서 손실이 크며 파워 수용능력이 떨어지는 단점이 있다. 위에서 언급한 이러한 단점들을 보완하기 위해서 최근에는 인가전압에 따른 유전율이 변화하는 강유전체를 이용한 위상 변위기[3]가 많이 연구되고 있다. 본 논문에서는 3-dB 90° 하이브리드와 종단된 reactive circuit으로 구성된 반사형 구조의 강유전체 위상 변위기 설계를 위한 reactive circuit의 효율적 적용을 위해서 다양한 형태의 reactive circuit 구조에서 위상 변위특성을 검토하였다. 그 결과 캐패시터 변화에 의한 인터디지털 (interdigital) 캐패시터와 단락 선로의 병렬연결에서 가장 적합한 위상 변위 특성을 확인 할 수 있었다. 본 구조에서 낮은 인가전압, 즉 강유전체 캐패시터의 작은 변화에서도 큰 위상 변위를 갖기 위해서 가장 큰 위상 변위의 중앙점을 찾는 개념을 적용하였으며 그 결과 작동 주파수에서 캐패시턴스와 선로의 전기적 길이를 조절함으로써 위상 변위의 최적점을

반사 구조를 이용한 3-dB 90° 하이브리드 위상 변위기의 가장 일반적인 구조는 종단된 두 개의 대칭 포트가 리액턴스의 변화에 의해 위상을 조절할 수 있는 구조이다. 3-dB 90° 하이브리드 구조의 위상 변위기는 그림 1과 같다. 그림 1과 같은 구조에서 위상변화의 원리를 살펴보면 포트 2와 3의 리액턴스 값을 같다고 가정하고 2, 3번 포트에 대한 반사계수 ( $\Gamma$ )를 구하면

$$\Gamma = e^{j\phi} = \frac{jX - Z_0}{jX + Z_0} = \frac{X^2 - Z_0^2 + j2Z_0X}{X^2 + Z_0^2} \quad (1)$$

와 같이 표현할 수 있다. 포트 2와 3에서의 위상 변화는 다음과 같다.

$$\angle \phi = \tan^{-1} \left( \frac{2Z_0X}{X^2 - Z_0^2} \right) \quad (2)$$

위에서 설명한 반사원리에 의해 포트 4에 출력되는 위상의 변화는 하이브리드 종단의 캐패시터와 선로의 길이에 따라 변하게 된다.

본 논문에서는 위에서 설명한 반사위상 개념을 바탕으로 강유전체 캐패시터와 선로의 조합으로 구성된 가장 적합한 구조의 reactive circuit을 찾기 위해서 각기 다른 여러 구조의 캐패시터와 선로의 구조에 따른 위상 변위를 확인하였다.

## 2.2 Reactive circuit 구조에 따른 위상 변위기 특성

강유전체 박막 구조를 갖는 reactive circuit에서 가장 적합한 구조를 찾기 위해서 그림 2에서 보는 바와 같이 구현 가능한 여러 형태의 reactive circuit에서의 위상 변위 특성을 확인하였다.

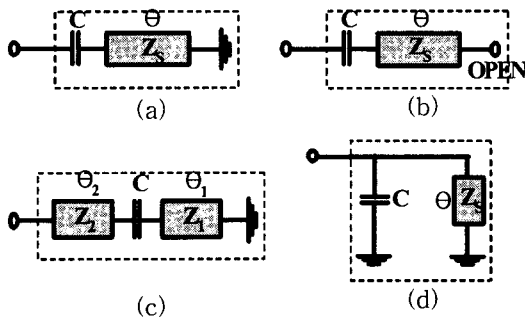
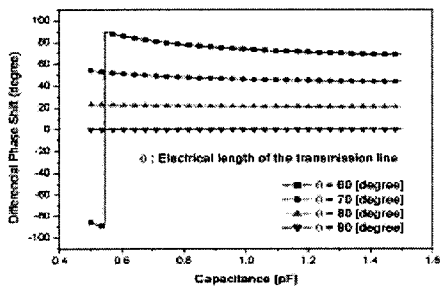
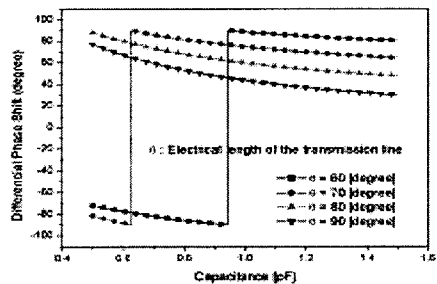


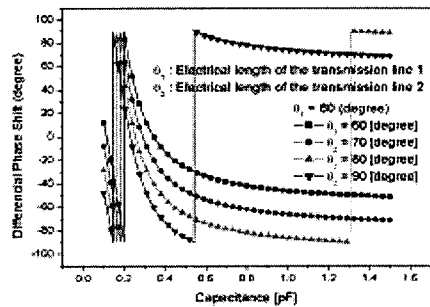
그림 2 다양한 형태의 Reactive circuits (a) 캐패시터와 단락 선로의 직렬 연결 (b) 캐패시터와 개방 선로의 직렬 연결 (c) 캐패시터, 전송선로와 단락 선로의 직렬 연결 (d) 단락 캐패시터와 선로의 병렬 연결



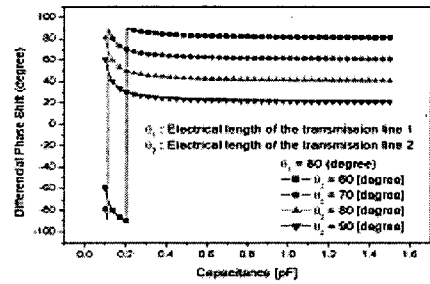
(a)



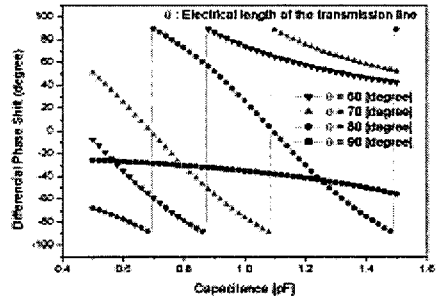
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 3 Reactive circuit의 구조에 따른 위상 변위 특성 (a) 그림 2a에서의 위상 변위 특성 (b) 그림 2b에서의 위상 변위 특성 (c),(d) 그림 2c에서의 위상 변위 특성 (e) 그림 2d에서의 위상 변위 특성

그림 3은 작동 주파수 8GHz와 선로 임피던스 50 Ω에서 그림 2의 reactive circuit에서의 위상 변위 특성을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 캐패시터와 단락선로의 직렬연결에서의 위상 변위 특성으로 캐패시턴스 변위 ( $C=0.5\sim 1.5\text{pF}$ )와 단락된 선로의 전기적 길이 ( $\theta=60\sim 90^\circ$ )의 변화에 따른 위상 변위는 각 캐패시턴스의 변화에 따른 위상 변위가 거의 없으므로 강유전체 위상 변위기를 위한 reactive circuit에는 적합하지 않음을 확인할 수 있다. 캐패시터와 개방선로의 직렬 연결로 구성된 그림2(b) 구조에서의 위상 변위 특성인 그림 3(b)에서도 그림 3(a)에 같은 조건에서 위상의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 그림 3(c)와 (d)에서는 선로 임피던스가  $Z_1$ 이 각각  $60^\circ$ 와  $50^\circ$ 일 경우 캐패시턴스 변위 ( $C=0.1\sim 1.5\text{pF}$ )와 단락된 선로의 전기적 길이 ( $\theta=60\sim 90^\circ$ )의 변화에 따른 위상 변위를 나타낸 결과이다. 그림 3(c)에서는 캐패시턴스의 변화가 0.1pF에서 0.3pF에서 큰 위상 변위를 확인할 수 있었으나 강유전체 구조를 이용한 인터디지털 캐패시터의 구현 시 너무 낮은 캐패시터를 갖기 때문에 구현상 매우 힘들다는 단점이 있다. 본 논문에서는 실제 강유전체를 이용한 인터디지털 구조에서 구현 가능한 캐패시터의 범위에서 가장 큰 위상 변위를 갖는 구조를 찾기 위해서 캐패시터와 단락 선로가 병렬로 구성된 그림 2(d)의 구조에서 그림 3(e)에서 보는 바와 같이 다른 구조와 달리 캐패시터의 변화에 따라 위상이 가장 많이 변함을 확인할 수 있었다.

### 2.3 반사위상 최적점 설계

그림 2(d)의 경우 전체 어드미턴스( $Y$ )는  $j(\omega C - Y_L \cot \theta)$ 와 같으며 입력 임피던스는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_{in} = \frac{1}{Y} = \frac{1}{j(\omega C - Y_L \cot \theta)} \quad (3)$$

식(3)을 이용하여 반사계수와 전파가 반사되는 위상을 구할 수 있다. 캐패시턴스의 작은 변화에 따라 큰 위상 변위를 위해 각각의 캐패시턴스에서 위상의 변화율이 가장 극심한 부분의 중심이 되는 지점을 식(3)에 의해 다음과 같이 위상 변위 최적점을 알 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{1}{Z_0 Y C} \right) \quad (4)$$

표 1. 제안된 Reactive Circuit의 설계 파라미터

캐패시턴스 [pF]	전송선로의 전기적 길이 [degree]
C=0.6	33.55017
C=0.7	29.61436
C=0.8	26.44388
C=0.9	23.85008
C=1.0	21.69698

표 1은 동작 주파수가 8GHz이고 특성 임피던스가 50Ω일 경우 병렬 캐패시턴스가 0.6pF부터 1.0pF일 경우 식(4)을 사용하여 위상변화의 최적점인 선로의 길이를 계산한 결과이다. 그림 4은 표. 1에 의해서 구해진 선로의 길이에서 캐패시턴스 변화에 따른 위상의 변화를 나타내고 있으며 각각의 캐패시턴스에 대한 위상변화의 최적점 즉 위상이 0°가 되는 점을 정확히 계산할 수 있다. 낮은 캐패시터 변화에 의해서도 위상이 180° 이상 크게 변화는 것을 확인할 수 있었다.

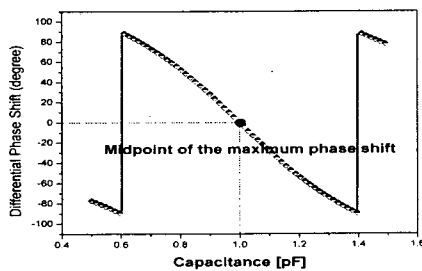


그림 4 최적 위상 변위 개념을 사용한 위상 변위 최적점

### 2.4 Reactive circuit의 설계 및 구현

동작 주파수 8GHz에서 위상 변위 최적점을 계산한 결과 캐패시턴스 1pF과 전기적 선로 길이 21.69698°인 구조를 박막형 구조를 이용하여 직접 제작하였다. 기판은 MgO (유전율 9.8)을 사용하였으며 박막형 강유전체 박막증착을 위해서 PLD(pulsed laser deposition)방법을 이용하여 강유전체를 0.4μm의 두께로 증착하였으며 그림 5에서 보는 바와 같이 손실을 줄이기 위해서 인터디지털 캐패시터에서만 강유전체 적용하기 위해 인터디지털 부분을 제외한 나머지 부분을 RF Ion Milling을 이

용해서 식각하고 다시 Au를 2μm 두께로 증착한 후 RF Ion Milling로 다시 식각하여 reactive circuit 회로를 그림 5와 같이 구현하였다. 그 결과 그림 6에서 보는 바와 같이 8.2GHz에서 150°의 위상 변위를 확인할 수 있었다.

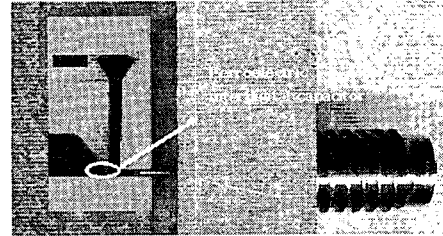


그림 5. 강유전체 reactive circuit 형상

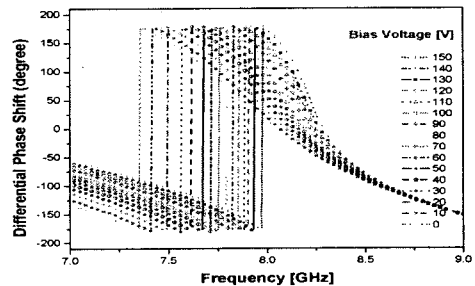


그림 6. 전압 인가에 따른 강유전체 reactive circuit 위상 변위 특성

### 3. 결 론

본 논문에서는 3-dB, 90° 하이브리드 구조를 이용한 강유전체 위상 변위기를 위한 reactive circuit를 설계하였다. 강유전체를 이용하는데 있어서 가장 적합한 구조의 reactive circuit를 구현하기 위해서 캐패시터와 선로의 다양한 구조에서 위상 변위를 검토하였으며 그 결과 단락선로와 캐패시터의 병렬 구조에서 가장 적합한 위상 변위 특성을 확인할 수 있었다. 박막형 강유전체를 가장 효율적으로 활용하기 위해서 위상 최적개념을 이용하여 낮은 강유전체 변화에서도 큰 위상 변위를 갖는 reactive circuit를 설계하고 직접 제작하여 위상 변위를 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제시한 reactive circuit은 반사형 구조의 강유전체 위상 변위기 설계 시 효율적으로 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] G.T. Roome and H.A. Hair, "Thin Ferrite Devices for Microwave Integrated Circuits", IEEE Trans on Microwave Theory and Tech., vol MTT-16, pp. 411-420, 1968
- [2] C.L. Chen, "A Low-Loss Ku-Band Monolithic Analog Phase Shifter", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., vol, MTT-35, pp. 315-320, 1987
- [3] D.F. Franco, N.G. Alexopoulos, "Planar Microwave Integrated Phase-Shifter Design with High Purity Ferroelectric Material", IEEE Trans on Microwave Theory and Tech., vol. MTT-35, pp.315-320, 1987