

강유전체를 이용한 DGS 구조의 위상 변위기 설계 및 구현

김영주*, 박준석*, 김영태**, 김선형**, 김형석***

국민대학교 전기전자공학과, 순천향대학교 전기전자공학부, 중앙대학교 전자공학과

Phase shifter design and implementation of DGS using ferroelectric materials

Kim Young-Ju*, Park Jun-Seok*, Kim Young-Tae**, Kim Sun-Hyeong** and, Kim Hyeong-Seok***

School of Electrical Engineering, Kookmin University.*,

School of Electrical and Electronics Engineering, Soon Chun Hyang Univ**,

School of Electrical and Electronics Engineering, Chung Ang Univ***

Abstract - In order to obtain a low-loss ferroelectric phase shifter, the reflection-type phase shifter with ferroelectric defected ground structure (DGS) resonators has been designed in this paper. The proposed phase shifter is consist of a 3-dB 90° branch-line hybrid coupler and terminated reflective circuit with tunable ferroelectric DGS resonator. The ferroelectric DGS unit structure can provide high Q resonator characteristic at high frequencies. The design parameters of equivalent circuit for the tunable DGS resonator are derived by using simple circuit analysis method and three-dimensional full wave finite element method. The fabricated phase shifter has an insertion loss of better than 3.4dB at 13.5GHz.

구성하는데 있어서 공정 조건에 따라 BST 박막의 유전율이 민감하게 변화기 때문에 커패시터를 정확히 설계치에 맞추는 것이 매우 힘들다는 단점을 갖고 있다. 이러한 설계 시 문제점을 보완하기 위해서 반사형 구조의 위상 변위기의 Reflective load를 구성하는데 있어서 그림 1과 같이 DGS(defected ground structure) 구조를 이용하였다. 일반적으로 DGS 구조는 전송선로 아래의 접지면에 아령 모양의 패턴을 형성하여 인덕터와 커패시터를 구현하는 구조로서 기존의 소자와는 달리 크기를 줄일 수 있으며 하모닉(harmonic) 성분을 억제할 수 있는 장점을 갖고 있으며 최근에는 RF 소자 설계에 다양한 구조의 수동 및 능동소자 설계 시 활발히 연구되어지고 있는 구조이다.

1. 서 론

강유전체 위상변위기는 인가된 전기장의 세기에 따라 유전율이 변화하는 강유전체의 특성을 이용하여 위상을 조절하는 소자이다. 일반적으로 가장 널리 쓰이는 반도체 소자 위상 변위기 예는 강유전체 위상변위기에 비교되는 MMIC에 빠른 운용속도와 호환성의 이점을 가진다. 그러나 일반적인 반도체 소자 위상 변위기는 사용주파수가 고주파로 갈수록 낮은 Q값으로 인해 사용상의 제약이 따른다. 따라서 고주파에서 반도체소자 위상 변위기의 삽입 손실은 급격하게 증가한다. 이러한 이유로 고주파에서 강유전체가 가장 좋은 선택이라 할 수 있다. 본 논문에서는, 강유전체 위상변위기의 낮은 손실특성을 위해 반사형 위상변위기에 기초를 둔 하이브리드 결합기의 종단된 두 포트에 (Ba,Sr)TiO₃ 박막을 이용한 DGS를 적용하여 위상 변위기를 설계 하였다. DGS는 마이크로스트립 선로 아래의 접지면에 두개의 식각된 면이 좁은 틈을 통해 연결되어 있는 구조이다. 낮은 손실의 특성을 얻을 수 있는 반사형 강유전체 위상 변위기는 DGS와 개방된 마이크로스트립 선로를 사용한 3-dB 90° 하이브리드 결합기를 이용 하였다. 개방된 마이크로스트립선로 사이의 평면에는 조절 가능한 BST커패시터를 삽입하였다.

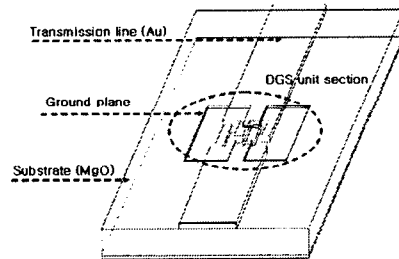


그림 1. 반사형 강유전체 위상 변위기 적용을 위한 DGS 구조

2.2 설계이론

본 논문에서는 BST 박막을 이용해서 높은 Q값을 갖는 가변 공진기를 구성하기 위해서 DGS 구조를 이용하였다. 가변 특성을 갖는 공진기를 구현하기 위해서 기존의 DGS 구조와는 달리 그림 1에서 보는 바와 같이 전송선로 아래에 BST 박막을 증착하고 그 위에 IDT 구조로 전송선로를 구성함으로써 가변 커패시터를 구현하였다. 전송선로와 접지면에 아령 모양의 구성된 일반적인 DGS 구조에서는 인덕터와 커패시터의 병렬연결로 등가회로를 구성할 수 있으며 저역통과 필터 및 대역통과 필터 및 오실레이터등과 같은 소자 설계 시 응용되고 있다. 본 논문에서 응용된 DGS 구조는 위에서 설명한 구조와는 달리 BST 가변 커패시터를 이용하기 위해서 전송선로에 인터디지널 구조로 구성되어지기 때문에 기존의 DGS와는 달리 다음과 같은 등가회로로 구성된다. 접지면의 DGS 패턴 중 사각형 패턴은 인덕터는 L_m 로 정의되며 얇은 선로 패턴은 커패시터는 C_0 로 정의되며 BST 박막을 이용한 IDT 형태의 커패시터는 C_m 로 표시 될 수 있다.

2. 본 론

2.1 DGS 구조의 등가회로 및 공진 특성

반사형 위상 변위기를 설계 및 구현하는데 있어서 가장 큰 문제점이 되는 것이 마이크로파 손실이다. 앞장에서는 최적화된 위상 변위 이론을 이용하여 단락된 커패시터와 전송 선로가 병렬연결로 구성된 Reflective load 구조의 설계 및 구현에 관하여 설명하였다. 하지만 본 구조는 커패시터와 전송선로의 병렬 연결 시 불연속 구조를 갖게 되는 구조적인 문제와 BST 박막의 손실로 인하여 실제 구현 시 마이크로파 손실이 커짐을 확인할 수 있었다. 박막형 구조의 IDT 구조로 커패시터를

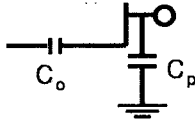


그림. 2 DGS 구조의 강유전체 공진기의 등가회로

본 등가회로는 현재 단말기용뿐만 아니라 마이크로파 시스템에서 가장 널리 쓰이는 SAW 필터와 FBAR와 매우 유사한 형태이며 DGS 구조는 높은 Q값을 갖는 공진 특성과 Anti 공진 특성을 동시에 갖는다. 그림 2에서 리액턴스는 식(1)과 같이 표현할 수 있으며

$$jX_r = j \frac{\omega^2 L_m C_m - 1}{\omega C_m - \omega C_o (\omega^2 L_m C_m - 1)} \quad (1)$$

두개의 공진 특성을 갖는 공진기의 특성을 파악하기 위해서 리액턴스 성분이 $X_r = 0$ 가 되는 조건을 구하게 되면 식(2)와 같은 특성을 확인 할 수 있으며 Anti 공진 특성을 갖기 위해서는 리액턴스 성분이 $X_r = \infty$ 가 되는 조건은 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$X_r = 0: \omega_0^2 = \frac{1}{C_m L_m}, L_m = C_o \frac{1}{\omega_0^2 C_m} \quad (2)$$

$$X_r = \infty: \omega_h = \omega_0^2 \left(\frac{C_m}{C_o} + 1 \right), C_m = C_o \left(\frac{\omega_0^2}{\omega_h^2} + 1 \right) \quad (3)$$

2.3 DGS 구조의 위상 변위기 설계 및 구현

그림 3은 DGS 구조의 등가회로를 이용하여 회로 시뮬레이션 한 결과이다. 앞 장에서 설명한 바와 같이 높은 Q값을 갖는 공진 특성과 Anti 공진 특성을 동시에 갖는다. DGS 공진기의 등가회로에서 살펴 본 바와 같이 BST 박막에 전압을 인가할 경우 등가회로에서 커패시턴스 C_m 가 바뀌게 되며 그 결과 위상 변위를 가져오게 할 수 있다. DGS 구조를 갖는 공진기는 반사형 구조의 위상 변위기 적용을 위한 Reflective-load의 구조로서 활용되기 때문에 실제적으로는 2포트 시뮬레이션이 적용되는 것이 아니라 한쪽이 단락된 형태로 구성된다. 그림 4는 DGS 공진기의 한 포트를 단락한 형태로 커패시터

C_o 를 0.5pF에서 1.0pF까지 변화시켰을 경우의 회로 시뮬레이션을 통한 위상 변위 특성이다. 그림에서 볼 수 있듯이 13GHz에 13.5GHz 범위에서 약 150°의 위상 변위를 확인 할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 결과를 이용하여 강유전체 BST 박막을 이용한 DGS 구조의 Reflective-load를 설계하였다.

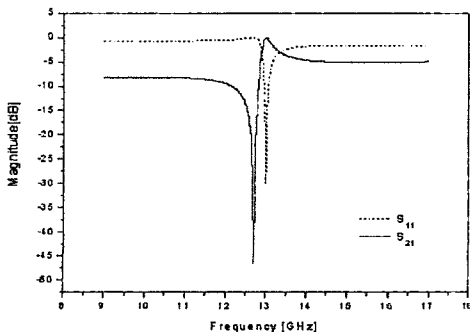


그림. 3 DGS 공진기의 시뮬레이션 결과

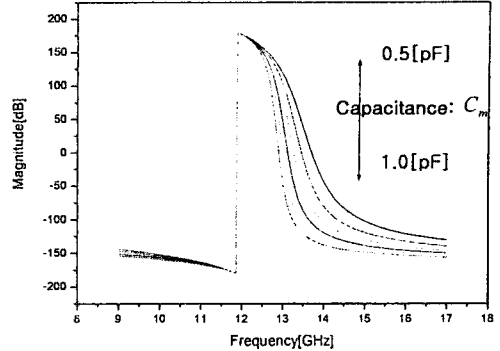


그림. 4 Reflective-load 구조를 위한 가변 DGS 공진기의 위상 변위 시뮬레이션 결과

앞 장에서 언급하였지만 실제 박막형 구조의 소자를 3차원 전자장 시뮬레이션 하는데는 여러 가지 제약들이 많이 따르기는 하지만 앞장에서 설명한 구조보다는 불연속 연결이 필요하지 않으며 접지면에 DGS 패턴이 형성되는 하지만 박막 형상이 추가되는 것을 제외하고는 매우 간단한 형상이기 때문에 정확한 전자장 시뮬레이션은 쉽다. 실험을 위한 초기 시뮬레이션 가능하였다. 표 1에서는 강유전체 박막을 이용한 DGS 공진기의 시뮬레이션 한 수치이다.

표. 1 DGS 구조의 설계 파라미터 계산치 및 수치

DGS 설계 파라미터	수치
Lm [nH]	0.4
Cm [pF]	1.0
Co [pF]	0.6
Cp [pF]	0.1
DGS 사각형 패턴 [mm]	1
DGS 겹 패턴 [mm]	0.01
IDT 핑거(finger) 개수	6
IDT 핑거 겹 [um]	6

앞 장에서 설명한 위상 변위기 제작 과정과는 달리 DGS 구조의 공진기 제작 과정은 접지면에 패턴 작업을 해야 하므로 공정상의 차이를 갖는다. 그림 5는 BST 박막의 DGS 공진기 제작 과정을 나타낸 그림이다. 먼저 MgO 기판위에 PLD 공정을 이용하여 BST 박막을 증착하게 되고 BST 박막이 증착된 반대면, 즉 접지면에 DC Sputtering 작업을 통해 Au/Cr을 증착한다. 그 후 접지면의 패턴 작업을 위해 PR을 코팅하며 마스크 정렬기를 통하여 자외선 투과 및 Develop 작업을 한다. DGS 패턴 형상을 Ion-milling 작업을 통해 Au/Cr을 식각하게 된다. 이 과정을 거치게 되면 접지면에 DGS 패턴 작업이 완성된다. 다음 과정으로 BST 박막면에 위와 동일한 방법으로 패턴 작업을 하게 되며 이 과정에서 특히 주의할 요하는 것은 DGS 패턴과 BST 박막의 IDT 패턴이 같은 위치에 정렬되어야 하므로 패턴 작업에 주의를 기울여야 한다. BST 박막을 실제 필요한 IDT 커패시터 부분만을 제외한 나머지 부분은 식각하게 되며 본 과정을 거친 후 다시 Au/Cr 증착 작업을 다시 하여 최종적으로 선로 패턴 작업을 완성하게 된다. 그림 6은 설명한 제작 공정을 거친 반사형 구조의 강유전체 위상 변위기 형상이다. 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 3-dB 90° 하이브리드 구조를 갖는 반사형 강유전체 위상 변위기 형상이며 그림 6(b)는 접지면의 DGS 패턴 형상이다.

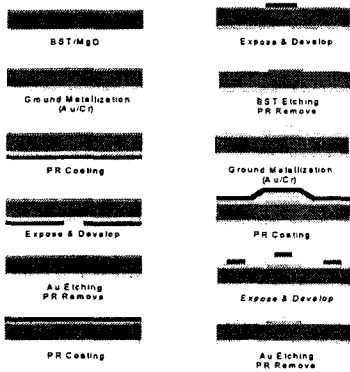
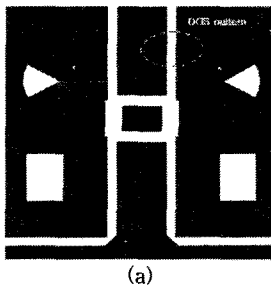


그림 5. DGS 구조의 가변 공진기 제작 공정



(a)



(b)

그림 6. DGS 형태의 강유전체 반사 위상 변위기 실제 형상

최종적으로 제작된 DGS 형태의 반사형 위상 변위기는 Wiltron사의 Universal-kit을 이용하여 마이크로파 특성 및 위상 변위 특성을 측정하였다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 앞 장에서 설계된 강유전체 위상 변위기의 마이크로파 특성과는 달리 삽입손실 및 반사손실 특성이 매우 많이 향상된 것을 확인할 수 있다. 작동 주파수 13.5GHz에서 2.5dB의 삽입손실 특성을 가지며 주변 주파수에 비해 삽입 손실이 큰 것은 강유전체 DGS 공진기의 특성 때문인 것이며 그 결과 DGS 공진기 특성이 실제 설계한 주파수와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

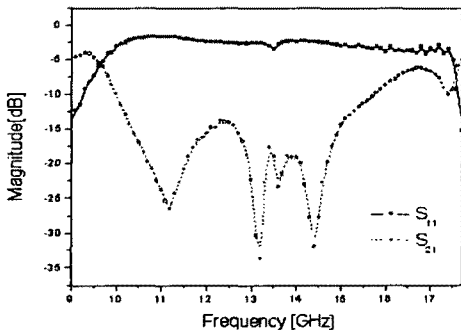


그림 7. DGS 형태의 강유전체 반사 위상 변위기의 마이크로파 특성

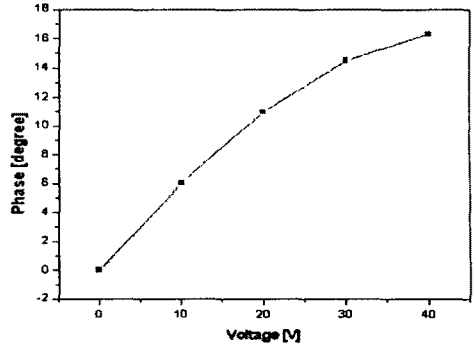


그림 8. DGS 형태의 강유전체 반사 위상 변위기의 위상 변위 특성

그림 8은 DGS 형태의 강유전체 반사 위상 변위기의 위상 변위 특성을 나타낸 것이다. 인가전압을 0[V]에서 40[V]까지 인가하였을 경우 위상 변위는 16° 변함을 확인할 수 있었다. 위상 변위 특성이 설계치보다 미흡한 것은 앞에서 말한 것처럼 박막 형태의 소자들에서의 부정확한 시뮬레이션 계산과 강유전체 박막 공정에 최적화 문제로 인한 것으로 생각된다. 앞으로 이러한 문제점을 해결하기 위해서 전자장 시뮬레이션과 최적화된 박막 공정을 데이터화 하게 되면 위상 변위 특성을 개선할 수 있을 것으로 생각된다.

3. 결 론

강유전체 위상변위기는 인가된 전기장의 세기에 따라 유전율이 변화하는 강유전체의 특성을 이용하여 위상을 조절하는 소자이다. 본 논문에서는, 일반적인 반도체 소자형 위상변위기의 높은 삽입손실 특성을 개선하여, 낮은 삽입 손실을 가지는 위상 변위기를 설계하기 위해 반사형 위상변위기에 기초를 둔 하이브리드 결합기의 종단된 두 포트에 (Ba,Sr)TiO₃ 박막을 이용한 DGS를 적용하여 강유전체 위상 변위기를 설계 하였다. 낮은 손실의 특성을 얻을 수 있는 반사형 강유전체 위상 변위기는 DGS와 개방된 마이크로스트립 선로를 사용한 3-dB 90° 하이브리드 결합기를 이용 하였다. 개방된 마이크로스트립선로 사이의 평면에는 조절 가능한 BST커패시터를 삽입하였다. 설계된 강유전체 위상 변위기의 마이크로파 특성과는 달리 삽입손실 및 반사손실 특성이 매우 많이 향상된 것을 확인할 수 있다. 그러나 인가전압을 40[V]까지 인가하였으나 위상 변위는 16°만 변함을 확인할 수 있었다. 이는 박막 형태의 소자들에서의 부정확한 시뮬레이션 계산과 강유전체 박막 공정에 최적화 문제로 인한 것으로 생각된다. 앞으로 이러한 문제점을 해결하기 위해서 전자장 시뮬레이션과 최적화된 박막 공정을 데이터화 하게 되면 위상 변위 특성을 개선할 수 있을 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.S. Kim, J.S. Park, D. Ahn, and J. B. Lim, *IEEE Microwave Guided Letter*, vol. 10, pp. 131-1333, Apr. 2000.
- [2] Dal. Ahn, J.S. Park, C.S. Kim, J.O. Kim, Yongxi, Qian, and Tatsuo Itoh, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 49, pp. 86-93, no.1, Jan. 2001.
- [3] M. S. Jong, J. O. Kim, J. S. Park, J. B. Lim, and H.G. Cho., *European Microwave Conference*. (2003)
- [4] J. S. Park, J-S. Yun, and D. Ahn, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 50, pp. 2037-2042, no.9, Sep. 2002.
- [5] J. S. Park, *Microwave Journal*, Nov. (2003)