

Special

Thema

HFSS를 이용한 Microwave Ferroelectric Phase Shifter 설계

강 종윤 선임연구원
(KIST 박막재료연구센터)

1. 서론

무선 단말기 등 무선 통신 응용 분야가 다양해지고 대중화 되면서 초고속, 대용량의 Data 전송을 필요로 하는 현대 사회의 요구에 따라 이동통신 시스템은 고성능, 고주파화, 이중 또는 다중 대역화 등으로 발전되어 가고 있다. 이와 같은 요구에 따라 강유전체를 이용한 Tunable 마이크로파 디바이스에 대한 연구가 각광을 받기 시작하고 있다[1-3]. 강유전체의 마이크로파 응용은 강유전체의 전계에 대한 유전 상수의 변화 특성을 이용하는 것으로, 이 특성을 이용한 응용 분야로는 Variable Capacitor, Tunable Resonator, Phase Shifter, Frequency-agile Filter, Variable Voltage Divider, Variable Voltage Oscillator 등으로 매우 다양하며 핵심적이다. 또한, 이와 같은 부품을 이용한 새로운 통신 및 레이더 시스템의 개발이 가능하다. 즉, 가변 Phase Shifter를 이용하여 Beam Scanning이 가능한 Array 안테나 개발이 가능하다.

본 고에서는, HFSS를 이용하여 강유전체 박막 구조의 Coplanar Waveguide Phase Shifter를 설계 분석하고자 한다. Coplanar waveguide는 신호선과 접지선이 동일한 평면에 존재하고, 설계에 다양성이 우수한 특징을 갖는다[4]. 박막층이 존재하는 마이크로파 소자의 HFSS 해석은 전체 구조에 비해 너무 얇은 박막(수십 또는 수백 nm 두께)층에 의해 Mesh의 크기가 너무 작아져서 해석에 너무 오랜 시간이 걸리고, 또한 그 해석 결과의 신뢰도가 매우 낮다. 본 고에서는 박막층 해석에 적합한 HFSS 모델을 제시하고자 하며, Tunability가 향상된 10 GHz대 강유전체 박막 Coplanar Waveguide(CPW) Phase Shifter 모델을 소개하고자 한다.

High Frequency Structure Simulator(HFSS)는 1990년 안소프트에서 개발되어 전 세계적으로 가장 많은 사용자로부터 다양한 어플리케이션에 대해 적용되어 왔다. 안테나, 전송선로, 커넥터, 여파기, 결합기, 분배기와 같은 3차원 구조나 칩 형태의 부품과 패키지 또는 PCB, 다중적층기판, LTCC 회로 등의 복잡한 구조에 대해 고주파적인 전자기 특성을 해석하여 기존에 측정을 통해서만 얻을 수 있는 결과들을 바로 플롯해볼 수 있도록 해주며 이를 설계 단계에 적용하여 실제 제작과 측정에서 소요되는 시

간과 비용을 절약할 수 있게 하여준다. 특히 오랫동안 축적된 기술력을 바탕으로 개발되어진 고유의 유한 요소법(FEM)은 가장 정확한 결과를 도출하여 주며, 최근에 개발된 새로운 윈도우 환경의 HFSS Ver. 9는 최고의 정확도에 더해 설계자가 친숙하고 사용하기 편한 기능들을 제공하므로 자동화된 설계 프로세스를 실현 가능하게 하여준다.

2. HFSS 해석을 위한 강유전체 CPW phase shifter 모델

Phased Array Antenna의 위상 조절을 위해 필수적인 Phase Shifter는 RF 신호의 위상을 바꾸어 주는 2단자 회로로서 최소한의 손실로 입력 신호의 위상을 바꾸는 역할을 한다. Phase Shifter는 크게 기계식[5,6]과 전자식으로 나눌 수 있으며, 또한, 전자식 Phase Shifter는 Ferrite Phase Shifter[7], 반도체 Phase Shifter[8] 등이 있다. 최근에는 강유전체를 이용한 Phase Shifter에 그 관심이 높아지고 있는데[9], 이는 강유전체 Phase Shifter가 보다 빠른 응답 속도를 가지며, 저가격화가 가능하고, 소비 전력이 낮으며, 반도체 Phase Shifter에 비해 고주파 손실 특성이 우수하기 때문이다.

강유전체 Coplanar Waveguide(CPW) Phase Shifter는 기본적으로 그림1과 같은 구조로 구성되어 있다. MgO 기판위에 강유전체 BST 박막이 증착되어 있고, 그 위에 CPW용 전극 패턴이 형성된 구조로 설계된 CPW의 구조 및 형태는 그림1과 같다. 이 때, MgO 기판의 유전율은 9.6이며, BST 박막의 유전율은 500이다. 이와 같은 강유전체 CPW Phase Shifter의 HFSS 해석을 위해 그림2와 같이 모델링을 하였다. CPW Phase Shifter 외곽을 Air Box로 설정하였으며, 신호선을 중심으로 접지선의 일부를 포함하는 Waveguide Port를 설정하여 Excitation하여 해석하였다. 또한, 전극은 Perfect Conductor로 가정하여 전극에 의한 손실은 무시하여 해석하였다.

강유전체 Phase Shifter는 강유전체 박막에 DC Bias를 인가함에 따라 그 유전율이 변화하는 특징을 이용하여 전송선의 위상차를 제공하는 소자로서, 유전율 변화에 따른 위상차는 식1과 같다.

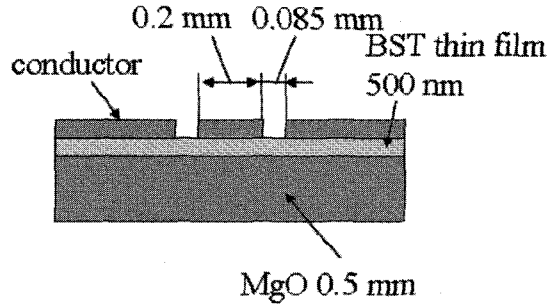


그림 1. Coplanar waveguide 구조.

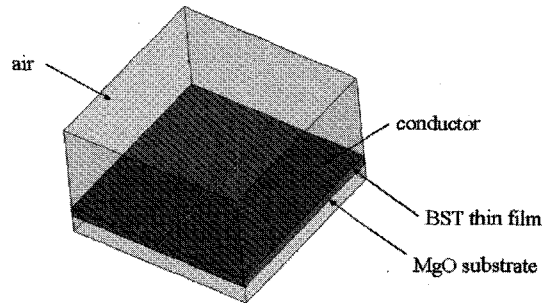


그림 2. Coplanar waveguide의 HFSS 모델링.

$$\Delta\Phi = \Phi_0 - \Phi_1 = \frac{2\pi}{c_0} \int_0^L (\sqrt{\epsilon_{r,eff}(0)} - \sqrt{\epsilon_{r,eff}(E_1)}) L \quad (1)$$

여기서, c_0 = 자유공간에서 빛의 속도,
 L = 전송선의 물리적 길이이다.

HFSS 상에서 강유전체의 물성은 제공되지 않는다. 따라서, DC Bias에 따른 강유전체의 유전율 변화에 관한 해석은 불가능하므로, 인위적으로 강유전체 박막의 유전율을 변화시킴으로써, 그 효과를 해석하였다. 강유전체 CPW의 강유전체 BST 박막의 유전율이 400에서 500으로 20% 변화하였다고 가정함에 따른 S-parameter의 변화는 그림3과 같다. 약 20 dB 이상의 반사손실을 나타내었다. 그림4는 강유전체 박막의 유전율 변화에 따른 전송선의 위상을 나타낸다. 강유전체 박막의 유전율이 400에서 500으로 변

회함에 따라, 10 GHz에서 약 11°의 위상차를 나타내었다.

이와 같은 강유전체 박막을 포함하는 구조에 대한 HFSS 해석은 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 매우 오랜 시간이 걸린다. 이는 전체 소자의 크기에 비해 매우 얇은 박막의 두께(수십 또는 수백 nm의 경우) 때문에 HFSS상에 매우 작은 크기의 Mesh가 생성되고, 구조내의 Mesh 크기의 큰 차이가 해석의 오차를 늘리고, 이를 줄이기 위해 대부분의 구조가 작은 Mesh로 생성되어야 하며, 이로 인해 해석 시간이 길어지기 때문이다. 이와 같은 문제를 해결하고자 본 해석에서 식2를 이용하여 강유전체의 박막의 두께를 높이는 대신 그 유전율을 비례적으로 줄여 강유전체 박막을 포함하는 CPW 구조를 보다 쉽게 해석하도록 하였다.

$$\epsilon_{r1} \cdot t_1 = \epsilon_{r2} \cdot t_2 \quad (2)$$

보다 빠르고, 신뢰성 있는 HFSS 해석을 위해 본 고에서는 표1과 같이, 유전율 500, 두께 500 nm의 BST 박막을 유전율 25, 두께 10 μm의 Layer로 설정하였고, 또한 유전율이 400으로 변한 경우, 마찬가지로 20%의 변화를 고려하여 유전율 20으로 설정하였다. 이와 같은 설정을 검증하기 위해 HFSS를 이용하여 그림5와 같이 CPW의 주파수에 대한 위상 변화를 살펴보았다. 8 GHz에서 12 GHz까지의 위상 변화를 살펴 본 결과 두께를 높이고, 유전율을 감소시킨 가상 등가 Layer가 포함된 전송선의 결과와 강유전체 BST 박막을 포함한 해석 결과가 매우 유사한 것으로 나타남에 따라, 이와 같은 등가 Layer를 이용하여 BST 박막을 대체하는 것에 무리가 없을 것으로 판단되었다.

표 1. BST 박막과 설정 Layer의 특성.

	BST 박막(t=500 nm) 유전율(εr)	설정 Layer(t=10 μm) 유전율(εr)
1	500	25
2	400	20

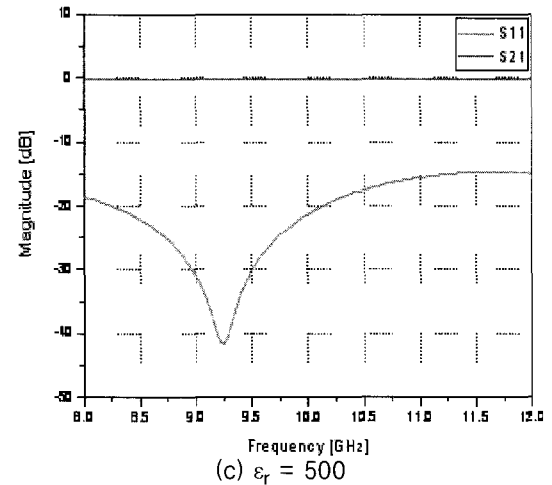
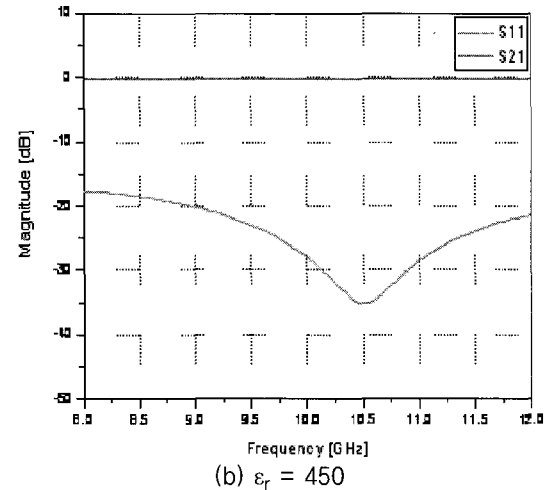
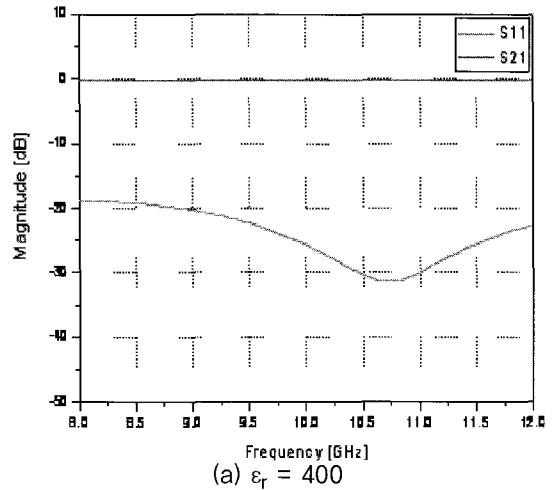


그림 3. 강유전체 CPW의 S Parameter 특성.

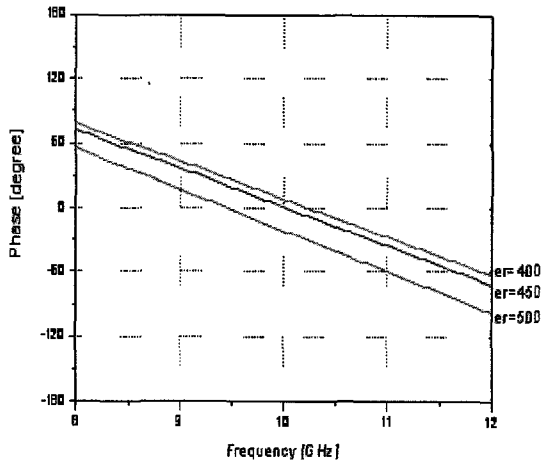


그림 4. 유전율 변화에 따른 강유전체 CPW의 위상차.

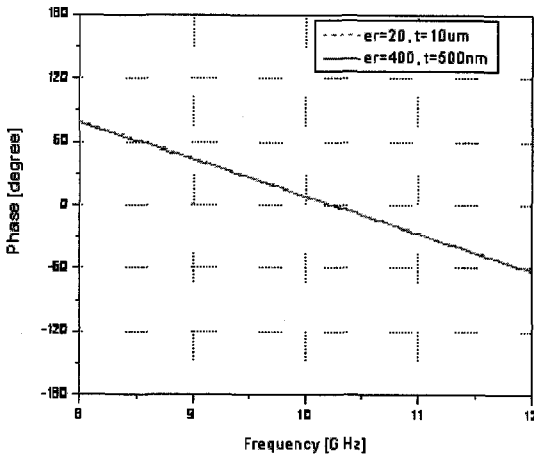
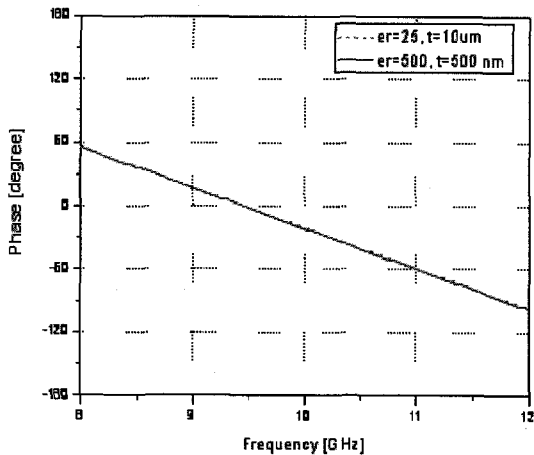


그림 5. 가상 Layer와 BST 박막의 CPW 위상 특성 비교.

3. Loaded CPW Tunable Phase Shifter의 HFSS 해석

강유전체 박막을 이용한 CPW Tunable Phase Shifter의 특성을 향상시키기 위해 Loaded Transmission Line 구조를 제안했다. 이는 그림6과 같이 Uniform한 전송선 내에 작은 Reactance를 Load시킨 구조로서, 이 경우, 위상 변화는 Normalized된 Susceptance $b = B/Y$ 에 의해 좌우되며, 입력단과 출력단 사이의 위상차는 식(3)과 같다.

$$\Delta\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{b}{2}\right) \quad (3)$$

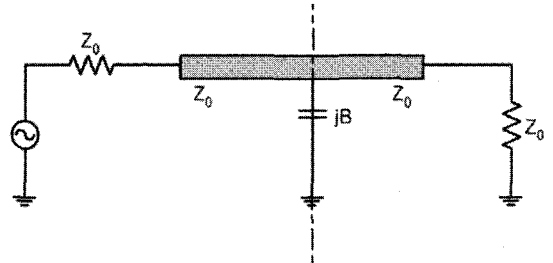
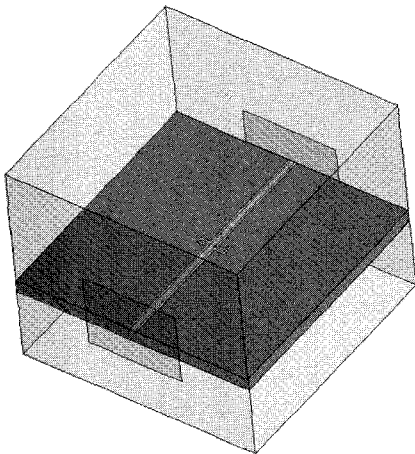


그림 6. Loaded Transmission Line.

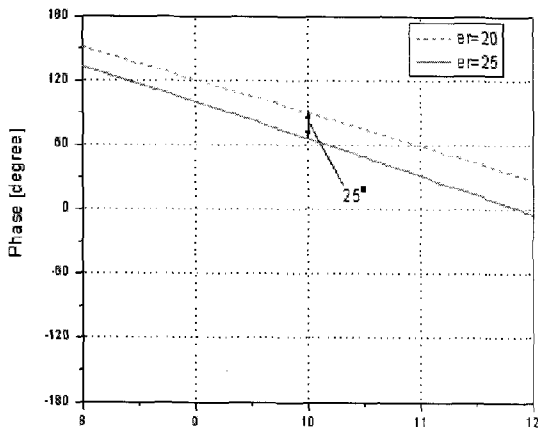
그림7(a)는 전송선의 반파장 위치에 캐패시턴스를 포함한 $\lambda/2$ Loaded CPW Tunable Phase Shifter의 구조를 나타내며, 그림7(b)는 HFSS 해석을 통해 얻은 위상 결과이다. 이 때 강유전체 박막은 앞에서 제시한 가상 등가 Layer를 이용하여 해석하여, 실제 BST 강유전 박막의 유전율이 500에서 400으로 변하는 경우에 대해 그 효과를 살펴보았다. 10 GHz에서 강유전 박막의 유전율이 변화에 따라 $\lambda/2$ Loaded CPW Tunable Phase Shifter의 위상차는 25° 로 앞에서 구한 일반적 CPW Phase Shifter의 위상차 11° 에 비해 향상됨을 알 수 있었다. 그림8(a)는 전송선의 각 $\lambda/4$ 마다 캐패시턴스가 위치한 $\lambda/4$ Loaded CPW Tunable Phase Shifter의 구조를 나타내며, 강유전체 박막의 유전율 변화에 따른 위상차는 그림8(b)와 같다. 약 40° 의 위상차를 얻으므로, 보다 향상된 위

상 변화를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 마찬가지로 방법으로 $\lambda/8$ Loaded CPW Tunable Phase Shifter의 구조에 대해서도 HFSS 해석을 해보았다. 그림9는 $\lambda/8$ Loaded CPW Tunable Phase Shifter의 S Parameter 특성과 Phase Shifter의 강유전체 박막의 유전율이 변함에 따라 발생하는 위상차 결과를 나타낸다. $\lambda/8$ Loaded CPW Tunable Phase Shifter의 반사 손실 S11 특성은 일반적 CPW Phase Shifter에 비해 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 반면 위상차는 약 47° 로 보다 향상됨을 알 수 있다. 그림 10은 그림 9와 같은 λ

$/8$ Loaded CPW Tunable Phase Shifter에 보다 큰 캐패시터를 위치시켰을 경우에 얻어진 S Parameter 및 위상차 특성을 나타낸다. 보다 큰 캐패시터를 만들기 위해 캐패시터에 해당하는 구조의 길이를 길게 하였는데, 이 경우 캐패시터의 증가로 보다 큰 위상차를 얻을 수 있으나, 반사 손실 특성이 크게 나빠짐을 알 수 있으며, 또한 이 캐패시터는 Stub 또는 다른 모드의 공진기 역할을 하는 것으로 판단된다.

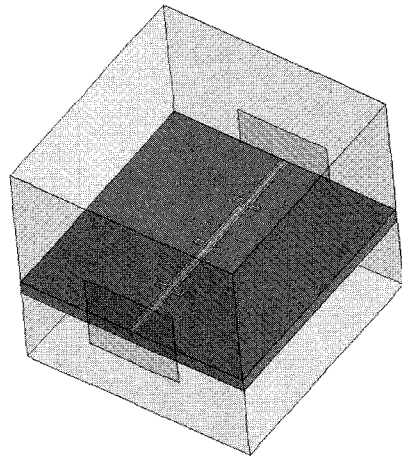


(a) 구조

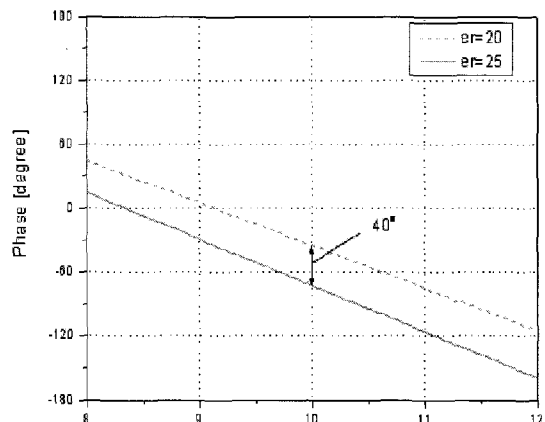


(b) 위상 특성

그림 7. $\lambda/2$ Loaded CPW Tunable Phase Shifter.

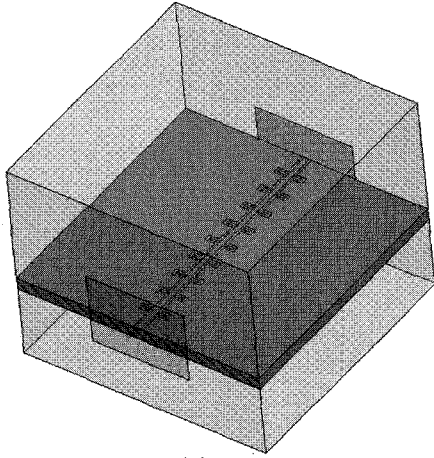


(a) 구조

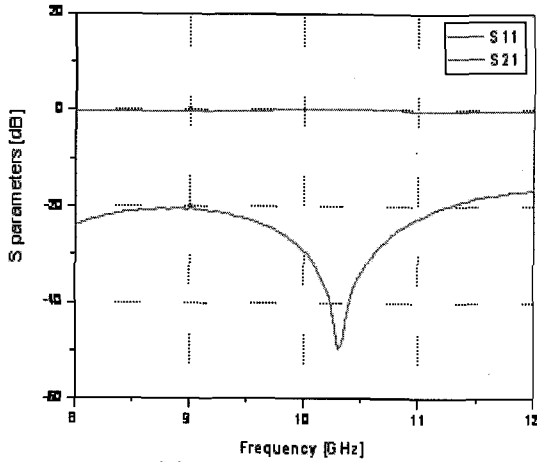


(b) 위상 특성

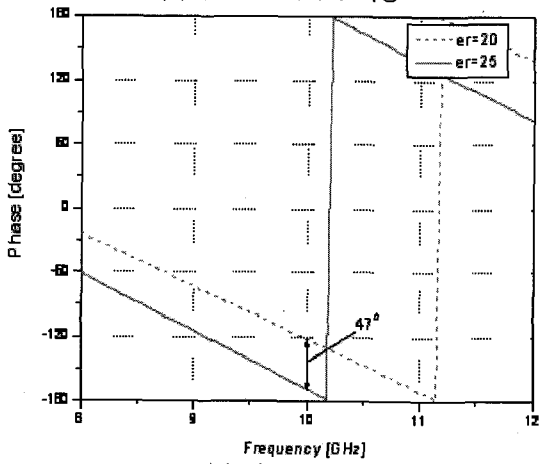
그림 8. $\lambda/4$ Loaded CPW Tunable Phase Shifter.



(a) 구조

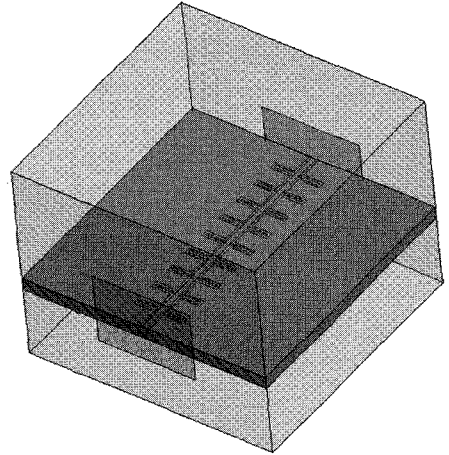


(b) S Parameters 특성

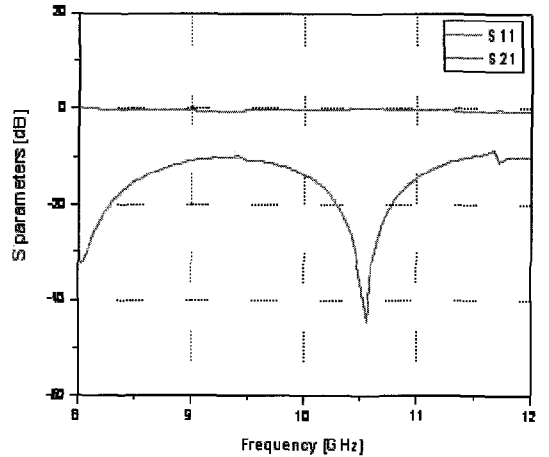


(c) 위상 특성

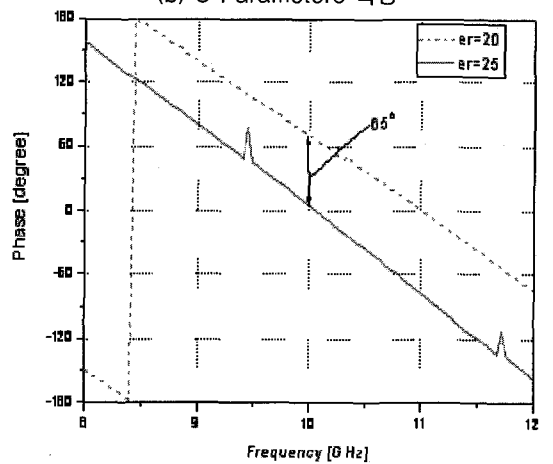
그림 9. $\lambda/8$ Loaded CPW Tunable Phase Shifter-I.



(a) 구조



(b) S Parameters 특성



(c) 위상 특성

그림 10. $\lambda/8$ Loaded CPW Tunable Phase Shifter-II.

4. 결론

강유전체 박막 CPW Tunable Phase Shifter 구조는 수 백 nm 두께의 박막을 포함하고 있기 때문에, HFSS를 이용한 해석에 많은 시간이 소요되며, 그 결과의 신뢰성이 다소 낮다. 이를 해결하기 위해 강유전체 박막에 해당하는 보다 두꺼운 가상 등가 Layer를 고려하여 해석함으로써 보다 빠른 시간에 신뢰성 있는 해석 결과를 얻을 수 있다. 또한, 일반적 CPW Tunable Phase Shifter에 비해 Tunability가 향상된 Loaded CPW Tunable Phase Shifter의 구조 제안하고, 이를 HFSS를 이용하여 해석하여 그 결과의 응용 가능성을 타진해 보았다. 이 경우, 강유전체 박막의 유전율이 변함에 따른 위상차는 부하 캐패시턴스의 수에 좌우됨을 알 수 있었다. 또한, 부하 캐패시턴스의 크기를 적절히 조절해야지만, 전송 특성을 저하시키지 않고, Tunability를 향상시킬 수 있다.

참고 문헌

[1] V.N. Keis, A.B. Kozyrev, M.L. Khazov, J. Sok and J.S. Lee, "20 GHz tunable filter based on ferroelectric (Ba,Sr)TiO₃ film varactors", ELECTRONIC LETTERS, Vol. 34, No. 11, p. 1107, 1998.

[2] F.A. Miranda, G. Subramanyam, F.W. Van Keuls, R.R. Romanofsky, J.D. Warner, C.H. Mueller, "Design and Development of Ferroelectric Tunable Microwave Components for Ku- and K-Band Satellite Communication Systems", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 48, No. 7, p. 1181, 2000.

[3] I. Vendik, O. Vendik, V. Pleskachev, and M. Nikol'ski, "Tunable Microwave Filters Using Ferroelectric Materials," IEEE Trans. Appl. Superconduct., Vol. 13, No. 2, p. 716, 2003.

[4] C. P. Wen, "Coplanar waveguide: A surface strip transmission line suitable for non-reciprocal gyromagnetic device application," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 17, p. 1087, 1969.

[5] A. G. Fox, "An Adjustable Waveguide Phase Changer," Proc. IRE. 35, p. 1489, 1947.

[6] Shiban K. Koul, and Bharathi Bhat, "Microwave

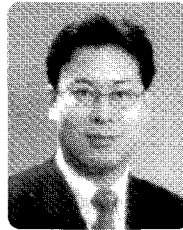
and Millimeter Wave Phase Shifters," Artech House, 1991.

[7] F. Reggia and E. G. Spencer, "A New Technique in Ferrite Phase Shifting for Beam Scanning of Microwave Antennas," Proc. IRE 45, p. 1510, 1957.

[8] J. F. White, "Review of Semiconductor Microwave Phase shifter," Proc. IEEE(Special Issue. on Electronic Scanning), Vol. 56, No. 11, p. 1924, 1968.

[9] B. Acikel, T. Taylor, P. J. Hansen, J. S. Speck, and R. A. York. "A New High Performance Phase Shifter using BaSr_{1-x}TiO₃ Thin Films," IEEE Microwave and wireless components letters, Vol. 12, No. 7, p. 237, 2002.

저자약력



성명 : 강 종윤

◆ 학력

- 1993년 연세대 전기공학과 공학사
- 1995년 연세대 대학원 전기공학과 공학석사
- 2000년 연세대 대학원 전기컴퓨터 공학과 공학박사

◆ 경력

- 2000년 - 현재 The Univ. of Birmingham, Post-doc.
- 2002년 - 2004년 KIST 박막재료연구센터 선임연구원