

BST 박막 구조의 슬릿 인덕터 위상 변위기

준회원 윤태순*, 김기병*, 김일두**, 임미화**,
정회원 김호기**, 김종헌*, 이병제*, 김남영*, 이종철*

A Phase Shifter Using the Slit Inductor with BST Thin Film

Tae-Soon Yun*, Ki-Byoung Kim*, Il-Doo Kim**, Mi-Hwa Lim** Associate Members

Ho-Gi Kim**, Jong-Heon Kim*, Byoungje Lee*, Nam-Young Kim*, and Jong-Chul Lee*
Regular Members

요 약

최근 초고주파 가변 소자로 BST와 같은 강유전체를 이용하는 연구가 활발히 진행 중이다. 본 논문에서는 BST 박막 위에 코플래너 웨이브가이드 형태로 가변 위상 변위기를 설계하였다. CPW 구조의 전송 선로는 특성 임피던스에 최적화시켰고, 설계된 위상 변위기는 CPW 전송 선로 형태로 슬릿(slot)을 삽입하여 위상 변위를 향상시켰다. 슬릿을 갖는 코플래너 웨이브가이드 위상 변위기는 설계 주파수 16~18 GHz에서 30 V까지 인가했을 때, 삽입 손실 2.4 dB 이하와, 10.6°의 위상 변위 특성을 보인다.

ABSTRACT

A ferroelectric of BST has created a new class of electrically tunable microwave components. In this paper, a tunable phase shifter with epitaxial BST thin film with Coplanar Waveguide configuration is studied. Dimensional configuration of the phase shifter with CPW structure is optimized for impedance matching at 50 ohm. The phase shifter is designed with CPW transmission line and inserted slit to improve phase shift effect. The CPW phase shifter with slit shows the insertion loss of about 2.4 dB with the phase shift of about 10.6°.

1. 서 론

최근 초고주파 소자 연구는 여러 가지 신기술의 도입으로 새로운 국면을 맞고 있다. 그 예로써 미세 가공기술(MEMS, micro electro-mechanical system), 강자성체 및 강유전체를 이용한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 연구는 현대 사회의 다양한 요구 즉, 크기는 작으면서 우수한 특성의 소자를 제작하려는 시도를 포함하고 있다.

특히, SrTiO₃ (STO), BaxSr1-xTiO₃ (BST)와 같은 강유전체 물질은 초고주파 소자 분야에서 가변 소자로서 응용하고자 하는 연구가 활발히 수행중에 있으며, 가변 공진기, 가변 위상 변위기, 가변 대역

통과 여파기, 가변 마이크로스트립 링 공진기, 국부 발진기 등에 대한 연구 결과가 발표되고 있다^[1-3]. 이것은 강유전체가 외부의 전압 인가에 의해 그 유전율이 변하는 특성을 가지고 있기 때문이다.

코플래너 웨이브가이드 구조는 마이크로스트립 선로에 비해 적은 분산(dispersion)을 나타내며, 비아홀(via-hole) 없이 소자의 직렬 및 병렬 연결이 용이하다는 장점이 있다. 또한, 코플래너 웨이브가이드 선로의 슬롯(slot) 부분에 불연속을 주어 등가적으로 인덕터 및 커패시터를 구현할 수 있다^[4]. 본 논문에서는 코플래너 웨이브 구조로 인덕터를 구현하여 위상 변위기의 위상 특성을 개선하였다.

* 광운대학교 RFIC 센터/미선테크놀로지 연구센터(easteryun@gwu.ac.kr),
논문번호 : 020197-0426, 접수일자 : 2002년 4월 26일

** 한국과학기술원 재료공학과

II. 유효 유전율

본 논문에서는 박막 구조의 마이크로파 소자를 설계하기 앞서 코플래너 웨이브가이드 공진기를 설계, 측정함으로써 유효 유전율을 계산하였다. 이는 공진 주파수와 유효 유전율의 관계를 이용한 것으로, 공진기와 선로 간의 간격을 넓혀 줌으로써 간격에 의한 공진 주파수의 영향을 최소화하여 설계하였다. 여기에 사용된 에피택셜 $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST) 박막은 Ba:Sr:Ti:O의 비율을 0.5:0.5:1:3으로 초고주파 특성이 우수한 단결정의 MgO 기판 위에 약 0.5 μm 의 두께로 증착되었다. 그 위에 Au를 약 1 μm 두께로 리프트오프(lift-off) 공정을 이용하여 증착하였다. 다음 그림 1은 실험에 앞서 동일한 조성비를 갖는 BST 박막의 유전율 변화 특성과 Loss tangent 값을 나타낸다.

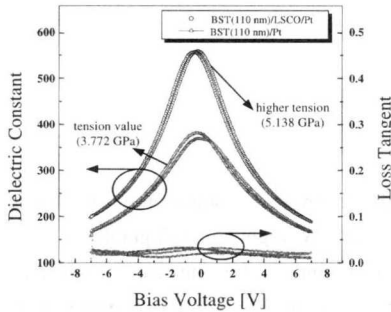


그림 1. 인가 전압에 따른 유전율과 Loss tangent 변화

제작된 공진기에 전압을 0 V에서 30 V까지 인가했을 때, 공진 주파수가 증가하는 것을 확인하였다. 그림 2은 전압 인가에 따른 공진 주파수의 변화를 나타내고 있다.

그림 2에서 얻어진 공진 주파수를 이용하여 계산된 유효 유전율은 전압이 인가되지 않았을 경우 평

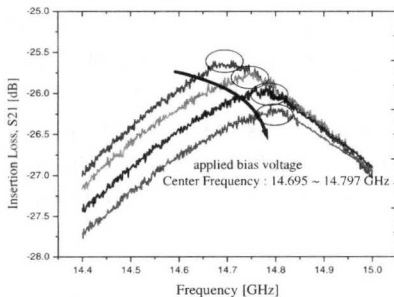


그림 2. 외부전압에 따른 공진 주파수 변화

균 7.601이었다. 이 유효 유전율은 전압을 인가함에 따라 점차 감소하여 7.496까지 변하는 것을 확인하였다. 계산된 코플래너 웨이브가이드 구조의 유효 유전율은 표 1과 같다.

표 1. 전압 인가에 따른 공진 주파수 및 유효 유전율

Bias Voltage	Frequency	Effective Dielectric Constant
0 V	14.695 GHz	7.601
10 V	14.750 GHz	7.544
20 V	14.777 GHz	7.517
30 V	14.797 GHz	7.496

III. 슬릿 인덕터

코플래너 웨이브가이드 구조는 접지면과의 연결이 없이 개방 및 단락 스텐브를 구현할 수 있다. 이를 이용하여 집중 소자(L, C)를 형성시킬 수 있는데, 본 논문에서는 슬롯 부분에 슬릿(slot)을 삽입하여 등가적인 직렬 인덕터를 구현하였다. 그 구조 및 등가 회로는 그림 3와 같다.

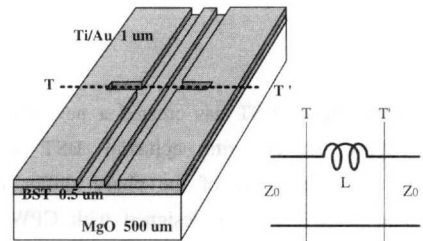


그림 3. 슬릿 인덕터의 구조 및 등가회로

슬릿 인덕터의 유도용량은 슬릿을 포함하는 코플래너 웨이브가이드 공진기의 공진 주파수를 구함으로써 계산될 수 있다. 즉, 공진 주파수는 정전용량 및 유도용량으로 나타낼 수 있다^[5].

$$f_o = 1/2\alpha\sqrt{[(L+L_s) \cdot C]} \tag{1}$$

위 식에서 L_s 는 슬릿의 유도용량을 나타내고, L 과 C 는 코플래너 웨이브가이드 구조에서의 정전용량 및 유도용량을 나타내며, 상수 d 는 $d=l+w$ 로 공진기의 길이 (l)와 전송 선로 폭(w)의 합으로 주어진다. 식 1을 이용하기 위해 앞서 추출한 유효 유전율을 사용하여 정전용량 및 유도용량을 구하면, 정전용량은 0.1966 nF/m을 얻을 수 있으며, 길이 3 mm를 갖는 공진기의 공진 주파수가 17.43 GHz 임을 이용하여 유도용량 427.1552 nH/m를 추출할 수 있다.

공진기에 10 μm 의 폭을 갖는 슬릿을 삽입하여 슬릿 유도용량을 구한 값을 아래 그림에 나타내었다. 여기에 사용된 공진기는 앞서 추출한 유효 유전율을 사용하여 선로 폭은 120 μm , 접지면과의 간격은 70 μm 로 특성 임피던스에 맞추어 설계하였다.

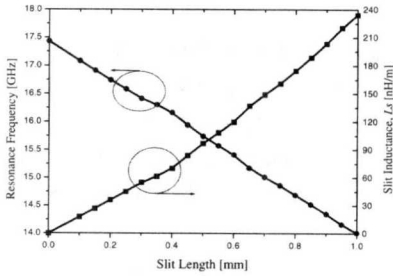


그림 4. 슬릿의 길이에 따른 공진 주파수 및 슬릿 유도용량

그림 4는 슬릿의 길이에 따라 공진 주파수가 점차 감소함을 나타내고 있다. 이는 슬릿의 삽입으로 인해 유도용량이 증가하여 파장이 길어졌음을 의미한다.

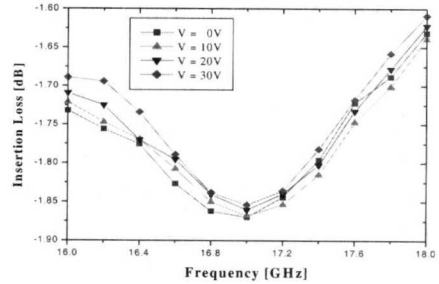
이 변화된 공진 주파수에 의해 식 1을 이용하여 계산된 슬릿 유도용량은 그림에 나타나듯이 슬릿 길이에 따라 거의 선형적인 증가 현상을 나타낸다. 또, 슬릿의 길이가 길어짐에 따라 코플래너 웨이브 가이드 구조의 불연속이 커짐으로 인해 삽입손실이 증가하게 되는데, 위에서 나타난 공진기에서는 슬릿이 없는 경우 삽입 손실이 6.38 dB에서 슬릿의 길이가 1 mm 인 경우에 11.02 dB로 증가하는 것을 확인하였다.

IV. 위상 변위기 설계 및 결과

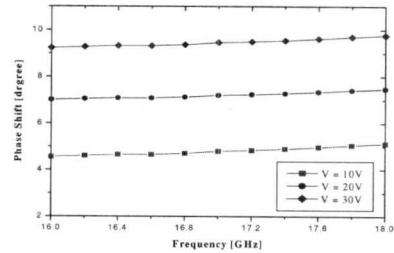
위상 변위기의 종류에는 여러 가지가 있으나, BST 박막의 특성을 이용하기 위해서 본 논문에서는 전송 선로 형태를 이용하여 설계를 하였다. 전송 선로는 계산된 유효 유전율을 이용하여 특성 임피던스에 맞추어 전송 선로의 폭을 120 μm 로 하고 선로와 접지면 사이의 간격을 70 μm 로 하였다. 이와 같은 구조는 입사되는 파가 전송 선로를 통과하면서 발생하는 시간 지연을 이용하는 것으로, BST 박막의 전압 인가에 따른 유전율 변화 특성을 이용하여 제어하는 방식이다.

이러한 한정된 구조에서 위상 변위를 크게 하기 위해 굴곡을 줌으로써 전송 선로의 총 길이를 20 mm로 하여 Zeland 사의 IE3D를 사용하여 설계하였을 때, 16~18 GHz 범위에서 손실은 0.6 dB 이

하를 나타내며, 위상 변위는 최대 10°를 나타내었다. 반면, 실제 제작 후 측정을 한 결과 위상 변위는 설계값과 유사한 것에 비해 손실이 1.9 dB 이하를 나타내었는데, 이는 BST 박막의 손실을 계산하지 못한 것이 주요한 원인으로 파악된다. 또한, 공정에서 선로의 폭, 접지면과의 간격 등이 설계와 일치하지 않음이 오차로 나타났다. 그림 5는 이러한 위상 변위기의 결과를 나타내고 있다.



(a)



(b)

그림 5. 위상 변위기의 측정 결과
(a) 전압 인가에 따른 삽입 손실 및
(b) 위상 변위 특성

전송 선로 형태로 설계된 위상 변위기의 위상 특성을 향상시키기 위해 본 논문에서는 슬릿을 삽입하여 슬릿 인덕터를 구현 하였다. 이 때, 슬릿 부분에서 발생하는 불연속을 최소화하기 위해서는 전송 선로의 폭에 비해 상대적으로 슬릿의 폭은 매우 가져야 하므로, 슬릿의 폭을 10 μm 로 설정하여 설계를 하였다.

슬릿의 길이는 길수록 위상 특성이 향상됨을 확인하였으나, 이웃하는 선로에 최소한의 영향을 주도록 하기 위해 0.87 mm로 하였고, 삽입 손실을 1 dB 이하로 설계하기 위해 슬릿을 세 번 삽입하여 설계를 하였다. 슬릿의 위치는 이웃하는 슬릿과의 영향을 줄이고자 전송 선로의 가운데에 위치하도록 하여, 최대 위상 변위 특성은 11°를 나타내었다. 슬릿을 통해 위상 변위를 향상시킨 위상 변위기는 그림 6과 같다.

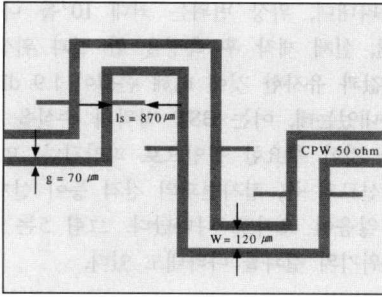
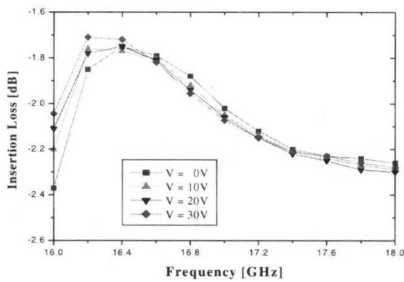


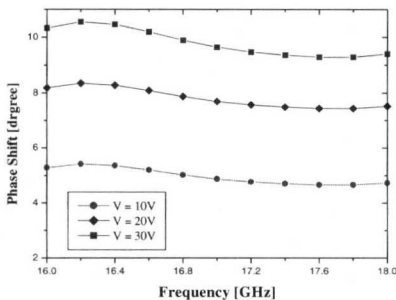
그림 6. 슬릿을 삽입한 코플래너 웨이브가이드 위상 변위기 구조

위 구조의 위상 변위기는 $8 \times 10 \text{ mm}^2$ 의 크기를 갖는데, 이와 같이 슬릿을 삽입하여 위상차를 향상시킨 위상 변위기는 삽입 손실 1 dB 이하를 갖으며, 위상 변위는 최대 11° 로 설계되었다. HP사의 bias-tee를 이용 전압을 인가하여 8510C Vector Network Analyzer로 측정된 결과는 슬릿을 삽입하지 않은 경우와 같이 위상 변위에는 큰 차이가 없으나, 손실이 2.4 dB 이하로 앞의 결과와 유사하게 나타났다.

다음의 그림 7는 슬릿으로 위상을 향상시킨 위상 변위기의 전압 인가에 따른 삽입손실 및 위상의 측정 값을 나타내고 있다.



(a)



(b)

그림 7. 슬릿이 삽입된 위상 변위기의 측정 결과
(a) 전압 인가에 따른 삽입 손실 및
(b) 위상 변위 특성

슬릿을 삽입하지 않은 경우에 비해 슬릿을 삽입하였을 경우 위상 변위는 최대 9.8° 에서 10.6° 로 0.8° 의 향상을 확인하였고, 이에 반해 손실은 1.9 dB에서 2.4 dB로 0.5 dB 증가하였다.

V. 결론

본 논문에서는 $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BST) 박막을 이용한 코플래너 웨이브가이드(CPW) 구조의 위상 변위기를 설계하였다. 본 논문에서 설계한 위상 변위기의 크기는 $8 \times 10 \text{ mm}^2$ 이고, 유전체 MgO , BST 박막, 증착된 금속의 두께는 각각 $500 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$ 이다.

위상 변위기의 설계에 앞서 공진기를 제작함으로써 BST 박막 구조의 유효 유전율 7.602를 구하여 설계에 이용하였다. 위상 변위기는 CPW 구조로 등가 유전율을 통해 전송 선로 폭 $120 \mu\text{m}$, 접지면과의 간격 $70 \mu\text{m}$ 로 특성 임피던스를 구하여 설계하였으며, 전압 인가에 따라 BST 박막의 유전율이 감소하는 특성을 이용하여 위상 변위가 발생하도록 하였다. 그리고, 이러한 위상 변위기의 접지면에 슬릿을 삽입하여 등가적으로 직렬 인덕터를 구현함으로써 위상 변위를 향상하였다.

최초 설계된 위상 변위기는 삽입 손실이 설계주파수 $16 \sim 18 \text{ GHz}$ 내에서 1.9 dB이하의 특성을 가지며, 최대 위상차는 9.8° 로 나타났고, 슬릿으로 위상 변위를 향상시킨 위상 변위기는 삽입 손실이 2.4 dB 이하를 가지며, 최대 위상차는 10.6° 의 결과를 얻어 위상 특성에 있어 0.8° 의 개선 효과를 보였다.

참고 문헌

- [1] G. Subramanyam, "A K-band-frequency agile microstrip bandpass filter using a thin-film HTS/Ferroelectric/Dielectric-Multilayer configuration," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, pp. 525-530, April 2000.
- [2] F. A. Miranda, "Design and Development of Ferroelectric Tunable Microwave Components for Ku- and K-Band Satellite Communication Systems," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, pp. 1181-1189, July 2000.
- [3] B. J. Kim and S. Baik, "Epitaxial $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ Thin Films for Microwave Phase Shifters," *Proc. APMC*, pp.934-937, 2000.

[4] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, Artech House, 1996.

[5] A. Gorgur and C. Karpuz, "Influence of narrow transverse slit in CPW resonator on its resonance characteristics," *Electron Lett.*, vol. 36, pp.49-50, Jan. 2000.

[6] N. I. Dib and M. Gupta, "Characterization of asymmetric coplanar waveguide discontinuities," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 41, pp. 1549-1558, 1993.

[7] M. J. Lancaster, *Passive Microwave Device Applications of High Temperature Superconductors*, Cambridge University Press, 1997.

[8] Z. Y. Shen, *High-Temperature Superconducting Microwave Circuits*, Artech House, 1994.

2002년 9월~현재 : KAIST 전자세라믹연구소
<주관심 분야> RF MEMS, Ferroelectric Device

임 미 화(Mi-Hwa Lim)

준회원



2000년 2월 : KAIST
재료공학과 졸업
2002년 2월 : KAIST
재료공학과 석사
2002년 3월~현재 : KAIST
재료공학과 박사과정

<주관심 분야> RF MEMS, Ferroelectric Device

김 호 기(Ho-Gi Kim)

정회원



1968년 2월 : 한양대학교
요업공학과 졸업
1974년 2월 : 독일 Erlangen
Univ. 석사
1980년 2월 : 독일 Erlangen
Univ. 박사

1981년~1983년 : Firmengruppe Roederstein
연구개발 본부장

1983년 : KAIST 재료공학과 부교수

1989년 : KAIST 재료공학과 정교수

<주관심 분야> Ferroelectric Device, Electro-Ceramics, RF MEMS

윤 태 순(Tae-Soon Yun)

준회원



2000년 2월 : 국민대학교
전자공학과 졸업
2002년 2월 : 광운대학교
전파공학과 석사
2002년 3월~현재 : 광운대학교
전파공학과 박사과정

<주관심 분야> RF MEMS, Ferroelectric Device

김 기 병(Ki-Byoung Kim)

준회원



2000년 2월 : 순천향대학교
정보통신공학과 졸업
2002년 2월 : 광운대학교
전파공학과 석사
2002년 3월~현재 : 광운대학교
전파공학과 박사과정

<주관심 분야> Ferroelectric Device, RF MEMS

김 종 헌(Jong-Heon Kim)

정회원



1984년 2월 : 광운대학교
전자통신공학과 졸업
1990년 6월 : 독일 Ruhr Univ.
전자공학과 석사
1994년 8월 : 독일 Dortmund
Univ. 전자공학과 박사

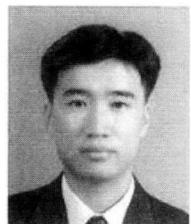
1995년 4월 : 광운대학교 전파공학과 조교수

1999년 4월~현재 : 광운대학교 전파공학과 부교수

<주관심 분야> RF Linearization Techniques, RF Power Amplifier, EMC

김 일 두(Il-Doo Kim)

준회원



1997년 2월 : 한양대학교
무기재료공학과 졸업
1999년 2월 : KAIST
재료공학과 석사
2002년 8월 : KAIST
재료공학과 박사

이 병 제(Byoungje Lee)

정회원

1988년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업

1993년 12월 : 미국 Southern Illinois Univ. 전자공학과 석사



1997년 5월 : 미국 Southern Illinois Univ.
전자공학과 박사
2000년 4월~현재 : 광운대학교
전파공학과 조교수
<주관심 분야> 마이크로스트립 안테나

김 남 영(Nam-Young Kim)

정회원



1987년 2월 : 광운대학교
전자공학과 졸업
1991년 2월 : New York 주립대
전자공학과 석사
1994년 2월 : New York 주립대
전자공학과 박사

1994년 9월 : 광운대학교 전자공학과 조교수
2000년 2월~현재 : 광운대학교 전자공학과 부교수
<주관심 분야> 초고주파 집적회로, MMIC, ASIC

이 중 철(Jong-Chul Lee)

정회원



1983년 2월 : 한양대학교
전자공학과 졸업
1985년 2월 : 한양대학교
전자공학과 석사
1989년 12월 : 미국 Arizona State Univ.
전자공학 석사

1994년 5월 : 미국 Texas A&M Univ. 전자공학 박사
1998년 4월 : 광운대학교 전파공학과 조교수
2002년 4월~현재 : 광운대학교 전파공학과 부교수
<주관심 분야> 초고주파 및 광전자 공학, RF MEMS, 밀리미터파 능동 및 수동소자