

재구성 RF 회로 응용을 위한 다층유전체 박막을 이용한 고-가변형 커패시터

High-Tunable Capacitor Using a Multi-Layer Dielectric Thin Film for Reconfigurable RF Circuit Applications

이영철*, 이백주**, 고경현**

Young-Chul Lee*, Baek-Ju Lee**, and Kyung-Hyun Ko**

요 약

본 연구에서는 재구성 RF 회로 설계 응용을 위해 BZN/BST/BZN 다층 유전체를 이용한 고-가변 커패시터를 설계 및 그 특성을 측정하였다. 고-가변 특성의 BST계 강유전체와 저-손실 특성의 BZN계 상유전체를 이용하여 47%의 가변성과 0.005의 $\tan\delta$ 값을 갖는 저-손실 고-가변 BZN/BST/BZN 다층 유전체를 제작하였다. 이 다층 유전체를 이용하여 quartz 기판 위에 $327 \times 642 \mu\text{m}^2$ 크기로 제작된 가변 커패시터 칩은 15 V의 인가전압과 800 MHz 주파수에서 Q-factor가 10이고 60 %의 가변율을 달성하였다.

Abstract

In this work, a high tunable capacitor using a multi-layer dielectric of BZN/BST/BZN is designed and characterized for reconfigurable RF applications. By utilizing a high tunable BST ferroelectric and a low-loss BZN paraelectric thin film, a multi-layer dielectric of BZN/BST/BZN obtained a tunability of 47 % and $\tan\delta$ of 0.005. The fabricated tunable capacitor on a quartz wafer using this multi-layer dielectric achieved a Q-factor of 10 and tunability of 60 % at 800 MHz and 15 V. Its size is $327 \times 642 \mu\text{m}^2$.

Key words : ferroelectric, paraelectric, tunable capacitor, multi-layer dielectric

I. 서 론

이동통신 단말기는 끊임없이 진화를 거듭하여 단순한 음성 통신에서 시작하여 영상, 메일, 인터넷 등 지금은 수많은 기능들이 내재된 스마트폰 단말기의 등장처럼 끊임없이 발전해오고 있다. 새로운 이동통신 방식의 출현 및 기존 방식과의 호환성, 그리고 WLAN (wireless local area network), WPAN (wireless

personal area network)과의 융합 등을 실현하고 global roaming을 위한 다중 주파수 대역, 다중 모드로의 진화가 급속히 이루어지고 있다. 하나의 단일 단말기를 이용하여 이동통신과 다양한 무선통신을 사용할 수 있는 핵심 기술이 재구성 RF (reconfigurable RF) 기술이다 [1]. 재구성 RF 단말기에서 RF 부분이 융-복합되면 RF 시스템이 커지게 되므로 SoC (system-on-chip)와 더불어 SoP (system-on-package)를

* 목포해양대학교 전자공학과(Department of Electronics, Mokpo National Maritime University)

** 아주대학교 재료공학과(Department of Materials Science and Engineering, Ajou University)

· 제1저자 (First Author) : 이영철 (Young-Chul Lee, Tel : +82-10-2279-6377, e-mail: leeyc@mmu.ac.kr)

· 투고일자 : 2012년 10월 18일

· 심사(수정)일자 : 2012년 10월 18일 (수정일자 : 2012년 12월 20일)

· 게재일자 : 2012년 12월 30일

통한 RF 집적화가 핵심 관건이며, 따라서 차세대 다중 이동단말기의 RF는 reconfigurability, 저전력 소모, 고집적화가 요구된다.

재구성 RF 기술은 주로 크게 세 가지로, micro electro mechanical system (MEMS) 스위치, 다이오드, 그리고 강유전체 (ferroelectric)를 이용하여 다양한 회로와 부품이 개발되어오고 있다. MEMS 기술의 상당한 진보에도 불구하고 비교적 높은 동작 전압과 신뢰성 문제는 여전히 개선해야 할 과제로 남아 있다 [2]. PIN 다이오드나 varactor 다이오드의 경우 높은 가변성 (tunability)에도 불구하고 전력소모를 발생하는 단점이 있다 [3]. 강유전체[4-5]는 인가된 전기장에 의해 유전체 재료의 유전특성이 변화하여 커패시터의 용량 (capacitance)을 변화시켜 회로의 가변성을 나타내는 기술이다. 가변성이 크고, 소모 전력이 거의 없고, 제작 가격이 저렴한 장점이 있고 더구나 박막 (thin film) 구조로 제작이 가능하여 RF CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) 기술로 구현되는 RF SOC에 집적이 용이하다. 전압 가변 박막형 유전체의 개발은 10여 년 전부터 꾸준히 진행되어 왔으나 고주파 대역 보다는 주로 1 MHz대역에서의 유전특성을 기준으로 많은 연구가 진행되어왔으며 최근에 GHz 대역으로 그 연구가 확장 중에 있다. 가변 유전체 재료에 기초한 가변 커패시터를 이용해 phase shifter [6], matching network [7], 그리고 재구성 (reconfigurable) 안테나 [5]에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 현재 상업적으로 주로 사용되는 강유전체는 유전상수(ϵ_r)와 가변성이 큰 $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ (barium strontium titanate, BST)계 강유전체가 개발되어 이용되어오고 있으나 1 GHz 이상의 대역으로 갈수록 강유전체 고유의 손실이 증가하여 현실적인 적용이 점점 어려워지고 있다. 이에 반해 $Bi_2O_3-ZnO-Nb_2O_5$ (bismuth zinc niobate, BZN)계 상유전체는 가변성은 강유전체에 비해 작지만 손실특성($\tan\delta$)은 5×10^{-4} 의 양호한 특성이 있다 [8].

본 연구에서는 고가변성, 고손실 강유전체 재료인 BST 박막의 단점을 보완하기 위해, BST 박막을 중간에 두고 저손실, 저가변성 상유전체인 BZN 박막을 서로 교대로 증착시킨 BZN/BST/BZN 다층 유전체 박막을 이용하여 가변 커패시터를 설계 및 제작하여 그

특성을 측정하였다.

II. 다층 박막을 이용한 커패시터 설계 및 제작

2-1 다층박막의 제작 및 유전체 특성

BST, BZN, 그리고 BZN/BST/BZN 다층 유전체 박막을 반도체 공정을 이용하여 제작 및 그 특성을 측정하였다. 우선, 하부 전극 겸 기판 재료로 4 inch Si wafer에 Si/SiO₂(3000Å)/TiO₂(200Å)/Pt(111) (1500Å) 구조로 제작된 wafer를 사용하였다. 박막을 제조하기 위해 RF magnetron sputtering system을 사용하였고, 증착 power는 BST와 BZN gun 모두 150W 고정하였고 Ar의 flow rate는 20 SCCM으로 고정하였으며 O₂의 flow rate를 조절하여 O₂/Ar분압 비를 10% O₂로 고정하였으며, sputter target과 기판과의 거리는 13cm로 유지하였다. BST와 BZN의 단일박막의 경우 10mTorr의 동작압력 하에서 sputtering gun power를 150W로 고정하고, 기판온도를 500°C를 유지하였다. 후 열처리 (post annealing)는 600°C에서 3 시간 시행하였다. BZN/BST/BZN의 다층 유전체의 경우 기판온도와 후 열처리 온도 외 조건은 단일박막 제조 조건과 동일하고 기판 온도는 500°C로 고정하였고 후 열처리는 600°C에서 1시간 시행하였다. 박막 증착은 다층 유전체의 경우 2개의 sputter gun을 이용하여 번갈아 사용하여 3층의 BZN/BST/BZN 다층 박막을 제작하였다.

박막의 유전 특성을 측정하기 위해, metal-insulator-metal (MIM) 수직 구조의 커패시터를 제작하고 상부 전극으로는 지름 250 μ m의 Ag dot를 shadow mask를 이용하여 thermal evaporation법으로 두께는 약 5 μ m으로 증착하여 사용하였다. 박막의 유전 특성은 Agilent 4294A precision impedance analyzer를 이용하여 0.1~10 MHz의 frequency 범위에서 측정하였다. 이렇게 측정된 용량을 이용하여 상부 전극의 면적과 박막의 두께로 유전상수를 계산하였다 [9]. 인가전압에 따른 용량의 가변성 (Tunability, T)은 다음의 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 박막의 특성을 측정을

위해 1MHz에서 최대 DC 전압을 30V로 인가하였을 때와 전압을 인가하지 않았을 때 용량을 측정하여 계산하였다.

$$Tunability(T) = \frac{C_{max} - C_{min}}{C_{max}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

표 1. BST와 BZN 가변 유전체 및 다층 유전체의 특성.
Table 1. Characteristics of BST and BZN tunable dielectrics and multi-layer one

Dielectric Thin Films	ϵ_r	$\tan\delta$	Tunability
BST (4,000 Å)	250	0.028	48 %
BZN (4,000 Å)	165	0.003	18 %
BZN/BST/BZN (1,000 Å / 2,000 Å / 1,000 Å)	225	0.005	47 %

측정된 BST와 BZN의 단일 가변 유전체 및 다층 유전체의 비유전율, 손실, 그리고 가변성을 표 1에 나타내었다. 두께가 4,000 Å로 증착된 단일 유전체 박막 BST는 BZN에 비해 손실이 심하고 가변성이 큰 특성이 있음을 확인하였고, 1,000Å/2,000/ 1,000Å의 두께로 증착된 BZN/BST/BZN 다층박막은 손실 면에서 BST 단일 유전체 박막에 비해 78% 개선되었고, 가변성은 BZN에 비해 29% 향상되었다.

2-2 다층박막을 이용한 가변 커패시터 설계 및 제작

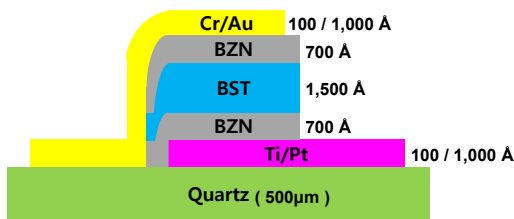


그림 1. 다층유전체 박막을 이용한 가변 커패시터의 수직 구조.

Fig. 1. The vertical structure of the tunable capacitor using a multi-layer dielectric thin film.

고 가변 저 손실특성의 BZN/BST/BZN 다층 박막을 이용하여 그림 1과 같은 구조로 가변 커패시터 칩을 설계 및 제작하였다. 고주파에서 기판 손실을 고려하여 si wafer 대신 quartz wafer를 사용하였으며, 기판 위에 Ti(100 Å)/Pt(1,000 Å)을 하부 전극으로 증착하고 photo-lithography와 dry-etching 공정으로 하부전극의 pattern을 형성하였다. BZN, BST, 그리고 다시 BZN 박막을 700, 1,500, 그리고 700 Å으로 각각 증착, photo-lithography, 식각 공정을 사용하여 하부 전극위에 유전체 박막 층을 형성하였다. Au를 상부전극으로 사용하기 위해 BZN 박막과 접착성을 위해 Cr을 100 Å 증착하고 Au를 1,000 Å 증착하였다. Lift-off 공정을 이용하여 상부전극을 형성하였다.

그림 2는 제작 되어진 가변 커패시터 칩이다. 측정을 용이하게 하기 위해 CPW 구조로 설계되어 있으며, 전체의 칩의 크기는 327 x 642 µm²이고 중앙의 가변 커패시터는 20 x 10 µm²이다.

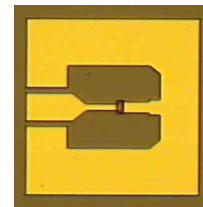


그림 2. BZN/BST/BZN 다층유전체 박막을 이용하여 제작한 가변 커패시터 칩.

Fig. 2. The fabricated tunable capacitor using a multi-layer dielectric thin film(BZN/BST/BZN).

III. 가변 커패시터의 측정 결과

제작된 가변 커패시터의 유효용량 (effective capacitance, C_{eff})은 복소 반사계수 (S_{11})를 측정하여 분석하였다. Probing station에서 vector network analyzer (VNA) (HP8510C)를 사용하여 가변 커패시터의 S_{11} 을 측정하여 total impedance (Z_{11})를 계산하고, 다음의 식 (2)를 이용하여 C_{eff} 를 계산하였다.

$$C_{eff} = \frac{1}{2\pi \cdot freq. \cdot Im(Z_{11})} [F] \quad (2)$$

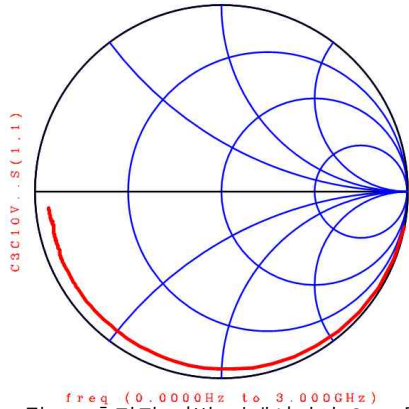


그림 3. 측정된 가변 커패시터의 S11 특성.

Fig. 3. The measured S11 characteristic of the tunable capacitor.

그림 3은 제작된 가변 커패시터의 S11 특성을 Smith chart에 나타낸 것으로, 측정 주파수는 0 ~ 3GHz이고 인가전압은 0이다. Smith chart에서 자기공진 주파수 (self resonance frequency, SRF)가 3GHz 이상으로 나타났으며, 주파수가 1GHz 이상으로 증가함에 따라 상하부 전극의 두께가 얇아 약간의 손실이 발생함을 알 수 있다.

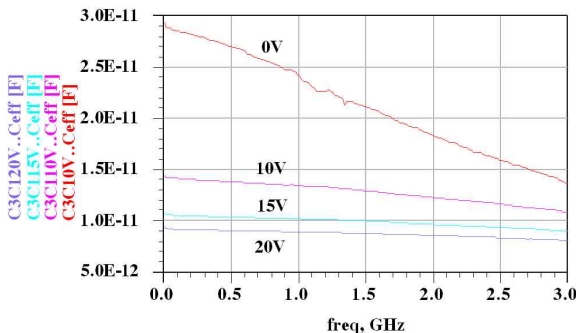


그림 4. 제작된 커패시터의 인가된 DC 전압에 따른 유효 커패시턴스 특성 .

Fig. 4. The effective capacitance characteristics with different DC bias voltages of the fabricated tunable capacitor.

그림 4는 제작된 가변 커패시터에 인가한 전압에 대해 주파수 변화에 따른 Ceff 특성을 나타내고 있다. 주파수가 증가하고 인가한 전압 (전계)가 증가함에 따라 감소하는 특성을 보여주고 있고, 감소 정도도 높은 주파수에서 작다.

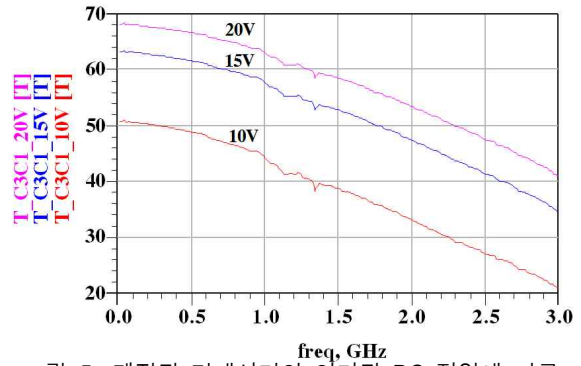


그림 5. 제작된 커패시터의 인가된 DC 전압에 따른 가변성 (T) 특성.

Fig. 5. The tunability (T) characteristics with different DC bias voltages of the fabricated tunable capacitor.

그림 5는 측정된 Ceff 특성을 이용하여 인가전압에 따른 가변율 특성을 나타내고 있다. 1 GHz에서 10, 15, 그리고 20 V 인가전압에서 각각 45, 58, 그리고 64 %의 양호한 가변율을 달성하였다. 회로의 종류나 구조에 따라 차이는 있겠지만, 다양한 제구성 RF 회로에 사용되기 위해서는 가변율이 40~50% 이상 되어야 용량변화가 회로 특성의 변화를 유도할 수 있는데, 따라서 제작된 가변 커패시터는 최대 1.3 GHz까지 사용이 가능할 것으로 판단된다. 높은 주파수에서 가변율이 감소하는 것은 유전체 물질의 물리적인 결정 구조에 발생하는 것으로 아직까지 명확하게 설명되지 않고 있다.

가변율 뿐만 아니라 소자의 Q-factor (품질계수) 또한 고려해야할 중요한 특성이다. 그림. 6은 인가전압에 따른 Q-factor 특성을 나타내고 있다. 0.5GHz 이하의 저주파에서는 Q-factor가 20~50으로 높은 특성을 나타내고 있으나 1 GHz 이상에서는 급격히 감소하는 특성을 나타내고 있다. 대부분의 손실은 가변 유전체에서 발생한 것이 아니라, 상하부 전극의 두께가 약 1,000 Å으로 얇아 전극의 ohmic 손실에 의한 것으로, 이는 전극의 두께를 1 μm 이상으로 증가시키면 개선될 것으로 판단된다. 보통 RFIC 설계에서 요구되는 Q-factor가 10 이상인 것을 고려하면, 10V 인가전압 하에 500MHz와 1GHz에서 Q-factor가 각각 12와 7이다. 15V의 경우, 약 800 MHz에서 Q-factor가 10이고 가변율은 그림 5에서와 같이 약 60% 이다. 따라서 본 연구에서 제작된 가변 커패시터는 800 MHz에서 안정적으로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

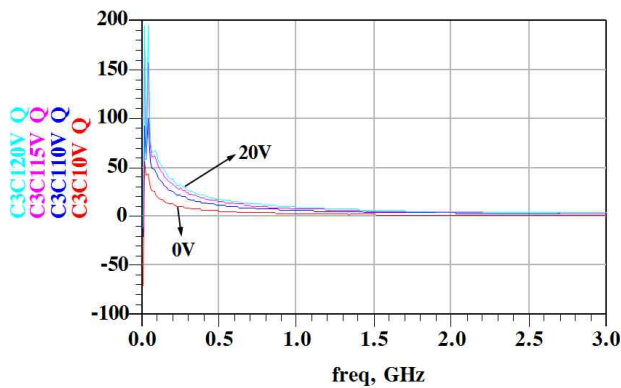


그림 6. 제작된 커패시터의 인가된 DC 전압에 따른 Q-factor 특성.

Fig. 6. The Q-factor characteristics with different DC bias voltages of the fabricated tunable capacitor.

IV. 결 론

본 연구에서는 재구성 RF 회로 설계 응용을 위해 고-가변 커패시터를 설계 및 그 특성을 측정하였다. 고-가변 특성의 BST계 강유전체를 중심에 두고 저-손실 특성을 가진 BZN계 상유전체를 상하로 증착한 47%의 가변성과 0.005의 $\tan\delta$ 값을 갖는 저-손실 고-가변 BZN/BST/BZN 다층 유전체를 제작하였고, 이를 이용하여 quartz 기판 위에 가변 커패시터를 설계 및 제작하였다. $327 \times 642 \mu\text{m}^2$ 크기로 제작된 가변 커패시터 칩은 15 V의 인가전압과 800 MHz에서 Q-factor가 10이고 60%의 가변율을 달성하였다.

감사의 글

본 논문은 2008년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (KRF-2008-D00393).

Reference

[1] Georg Boeck, Dariusz Pienkowski, Radu Circa,

Marius Otte, Benjamin Heyne, Piotr Rykaczewski, Reimund Wittmann, and Ralf Kakerow, "RF Front-End Technology for Reconfigurable Mobile Systems," *IEEE Microwave and Optoelectronics Conference 2003*, Vol. 2, pp. 863 - 868, 2003.

[2] Guoan Wang, et al., "A High Performance Tunable RF MEMS Switch Using Barium Strontium Titanate (BST) Dielectrics for Reconfigurable Antenna and Phase Arrays" *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters*, vol.4, pp.217-220, 2005.

[3] Giuseppe Ruvio, et al., "Wideband Reconfigurable Rolled Planar Monopole Antenna" *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol.55, No.6, pp.1760-1767, 2007.

[4] Hai Jiang, et al., "Frequency Tunable Microstrip Patch Antenna Using Ferroelectric Thin Film Varactor", *Proceedings of the IEEE 2009 National Aerospace & Electronics Conference (NAECON)*, pp. 248 - 250, 2009.

[5] Mohsen Sazegar, et al., "Reconfigurable Unit Cell for Reflectarray Antenna Based on Barium-Strontium-Titanate Thick-Film Ceramic", *Proceedings of the 39th European Microwave Conference*, pp. 598-601, 2009.

[6] Judy, D.C. et al. "Reflection-type continuously-tunable phase shifter using PZT thin-film capacitors" *Electronics Letters*, vol.45, pp.171 - 173, 2009.

[7] L.-Y. Vicki Chen, et al., "Analog Tunable Matching Network Using Integrated Thin-Film BST Capacitors" *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp.261-264, 2004.

[8] Jiwei Lu, Susanne Stemmer, "Low-loss, tunable bismuth zinc niobate films deposited by rf magnetron sputtering" *Applied Physics Letters*, vol. 83, pp.2411-2413, 2003.

[9] Ma, Zhengxiang, Becker, A. J., Polakos, P., Huggins, H., Pastalan, J., Wu, Hui, Watts, K., Wong, Y. H., Mankiewich, P., "RF measurement technique for characterizing thin dielectric films", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 45, issue 8, pp. 1811-1816, 1998.

이 영 철 (李永鐵)



1995년 2월 : 영남대학교 전자공학과 (공학사)

1997년 8월 : 영남대학교 전자공학과 (공학석사)

2005년 2월 : 한국과학기술원 공학과 (공학박사)

2005년 3월~2007년 3월 : 목포해양대학교 해양전자통신공학부 전임강사

2007년 4월~2011년 3월 : 목포해양대학교 해양전자통신공학부 조교수

2011년 3월~현재 : 목포해양대학교 전자공학과 부 교수

2006년 3월~현재 : PIER & JEMWA 논문 심사위원

관심분야 : 초고주파 시스템 집적, System-on-Package (SoP), 밀리미터파 시스템 및 회로 설계

이 백 주 (李白朱)



2010년 2월 : 아주대학교 재료공학과 (공학석사)

2012년 8월 : 아주대학교 재료공학과 (공학박사)

관심분야 : high-k and capacitor

고 경 현 (高景現)

1980년 2월 : 서울대학교 금속공학과(공학사)

1982년 2월 : KASIT 재료공학과(공학석사)

1988년 9월 : MIT 재료공학과(공학박사)

1989년 10월 ~ 1989년 6월 : MIT Postdoc

1990년 3월 ~ 현재 : 아주대 신소재공학과 교수