

Tunable RF 기기 적용을 위한 ALD-HfO₂의 마이크로파 대역 강유전체 특성 고찰

Study on the Ferroelectric Properties of ALD-HfO₂ in Microwave Band for Tunable RF Apparatus

한 상우*, 이 창현*, 이 정해*, 차 호영*

Sang-Woo Han*, Chang-Hyun Lee*, Jeong-Hae Lee*, Ho-Young Cha*

Abstract

In this work, We investigated the frequency-dependent capacitance tunability of a metal-ferroelectric-metal variable capacitor fabricated using ALD HfO₂ ferroelectric material. The capacitance of the MFM capacitor could be tuned as a function of the bias voltage, up to the microwave frequency range. We observed a capacitance tuning range of ~3 % up to 2.5 GHz, proving the feasibility of the use of ALD HfO₂ in the microwave frequency band.

요 약

본 논문에서는 tunable RF 기기에 적용이 가능한 HfO₂ 강유전체를 활용하여 metal-ferroelectric-metal (MFM) 커패시터를 구현하였으며 마이크로파 대역주파수 까지 전압에 따른 커패시턴스 tunability 특성을 고찰 하였다. 1kHz부터 5GHz 대역에 이르기까지 광범위한 범위의 커패시턴스-전압 특성을 분석하였으며 커패시턴스 tunability는 500 MHz 이상의 주파수에서 2.5 GHz 대역까지 ~3 %의 tunability가 유지되는 것을 확인 하여 마이크로파 주파수 대역에서 ALD HfO₂기반 전자 제어 가변 커패시터의 사용 가능성을 입증하였다.

Key words : variable capacitor, frequency-dependent capacitance, ferroelectric material, HfO₂, MFM capacitor

1. 서론

공진주파수 조절이 가능함으로 인해 제공되는 향상된 편의성은 tunable RF 디바이스의 요구를 증가시키고 있다. 특히, 전자 제어 가변 커패시터 (electrically controlled variable capacitor) 기술이

적용된 주파수 선택표면(frequency selective surface, FSS) 또는 tunable 메타표면(tunable metasurface)은 feed 특성을 변화시키지 않고 표면에서 빔 조향을 수행 할 수 있는 송신어레이 및 반사어레이 안테나의 설계를 가능하게 하는 장점을 가진다 [1]. 기존의 전자 제어 가변 커패시터 기술은 PN 다이

* School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

★ E-mail : hcha@hongik.ac.kr, Tel : +82-2-320-3062

※ Acknowledgment

S.-W. Han and C.-H. Lee contributed equally to this work. This work was supported by NRF of Korea under Grant 2015R1A6A1A03031833 and 2016R1D1A1B03935445 and civil-military technology cooperation program (No. 17-CM-MA-03).

Manuscript received Sep. 7, 2018; revised Sep. 20, 2018; accepted Sep. 21, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

오드의 공핍영역 변화특성을 활용한 버랙터(varactor) 기술이 사용되어 왔으나 복잡한 에피택시 및 제조 공정을 필요로 하며 오직 역 바이어스에서만 동작하는 특성으로 인해 복잡한 구동회로 설계를 요구하게 되는 문제점을 가지고 있다 [2]. 이를 개선하기 위해 최근에는 MEMS 스위치[3], 페라이트 [4], 액정 [5], 강유전체 [6]기술을 적용한 차세대 전자 제어 가변 커패시터 기술개발이 활발히 진행되고 있는 실정이다.

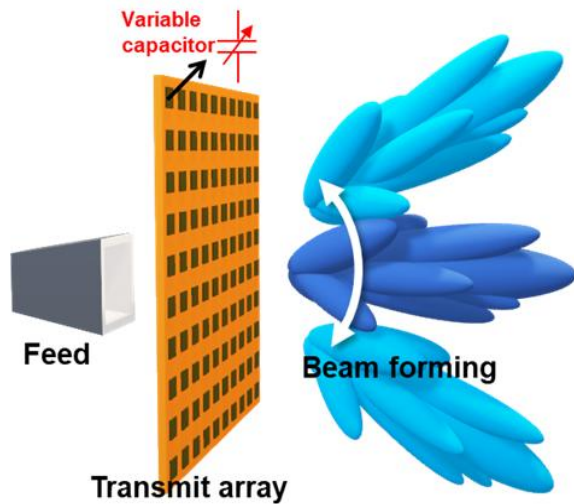


Fig. 1. The beam steering schematic with variable capacitor technology.

그림 1. Variable capacitor기술이 적용된 빔조향 모식도

강유전체 가변 커패시터(ferroelectric variable capacitor) 기술은 인가된 전계에 의해 변화하는 강유전체의 쌍극자(dipole)를 통해 유전율을 조절하는 기술로 기존 다이오드 varactor 기술에 비해 간단한 공정으로 구현이 가능하고 양방향 전압 동작으로 인해 수반되는 구동회로를 간소화 할 수 있는 장점을 가진다. 2000년 Modelski에 의해 강유전체 기술을 적용한 마이크로 스트립 패치 안테나가 처음 발표된 이후 BaTiO₃, Pb(Zr-Ti)O₃ (PZT), barium strontium titanate (BST) 등의 다양한 강유전체 기반의 가변 커패시터 기술이 적용된 논문이 발표되고 있는 실정이다. 그 중 HfO₂ 박막은 최근 새로이 발견된 강유전성 특성으로 인해 다시 주목을 받고 있으며 원자층 증착법을 포함한 잘 정립된 기술을 사용함으로써 얇고 고품질의 절연막이 증착 가능한 장점이 있다.

한편 강유전체의 분극 전하는 유한한 이완 시간

(finite relaxation time)을 가짐으로 인해 동작 주파수가 증가함에 따라 강유전체 재료의 유전율 tunability가 감소하는데 이에 따라 RF 응용분야에 적용하기 위해서 주파수의 함수로서 주어진 재료의 전기 유전율을 분석하는 것이 필수적이다. 몇몇의 강유전체 물질의 주파수 의존 특성에 대한 연구가 발표되어 왔으나, 일반적으로 10 MHz 이하의 동작 주파수 범위에서 수행되어 높은 주파수 범위의 주파수에 따른 분석은 미미한 실정이다 [7], [8]. 본 논문에서는 고품질의 undoped-HfO₂ 강유전체를 활용하여 metal-ferroelectric-metal (MFM) 커패시터를 구현하였으며 극초단파 주파수 범위까지의 극성 전환 특성을 처음으로 조사하였다.

II. 본론

1. ALD 증착법을 활용한 HfO₂ 강유전체 기반 MFM 커패시터

HfO₂ 박막은 현대 반도체 기술에서 높은 유전율(κ)을 가진 게이트 절연막 물질로 사용하기 위해 광범위하게 연구되어 왔으나 최근에 새로 발견된 강유전성 특성으로 인해 다시 주목을 받고 있다. 발표된 연구에 따르면, HfO₂의 강유전성을 유도하기 위해서는 Si, Al, Y, Gd 또는 Zr의 양이온 도핑이 필요하며 양이온 도핑으로 인해 형성되는 HfO₂의 $Pca2_1$ 사방 정계 격자구조는 강유전성 형성에 기인한다고 보고되고 있다.

도핑된 HfO₂ 막은 종래의 페로브스카이트 강유전체에 비해 증착 및 강유전성 특성 변이가 용이하지만, 다중 양이온 산화물의 강유전성 특성을 정확하게 제어하는 것은 강유전성 특성이 화학적 또는 물리적 변화에 크게 영향을 받기 때문에 쉬운 일이 아니다. 추가적인 어려움은 도핑된 HfO₂로부터 강유전성을 구현하기 위한 적절한 도펀트 농도 범위가 매우 좁아서 엄격한 공정 제어가 필요하다는 것이다. 따라서 기술적인 관점에서 도핑되지 않은 HfO₂로부터의 강유전성 성능을 달성하는 것이 바람직하다 [9].

본 논문에서는 원자층 증착 동안 증착 온도 제어를 통해 도핑되지 않은 HfO₂에서 강유전성을 구현했다. HfO₂ MFM 커패시터 공정과정은 아래와 같다. 먼저 200 nm 두께의 고품질 TiN를 RF 스

퍼터링 기법을 통해 석영기판 위에 증착하였다. 이때 증착 된 TiN 저항률은 170 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 이었으며 TiN 증착을 통해 하부 전극과 ground-signal-ground (GSG) pad를 같이 형성하였다. 10 nm 두께의 HfO₂ 박막은 원자층 증착법을 통해 하부 전극 위에 증착되었다. 이때 증착 온도는 220 $^{\circ}\text{C}$ 이었으며 Hf[N(C₂H₅)CH₃]₄ (TEMA-Hf)와 170gm⁻³ 농도의 O₃을 각각 Hf precursor 와 oxygen source로 사용하였다 해당하는 펄스 기간은 각각 0.5 초와 1 초 이었다. TiN/HfO₂/TiN 구조를 형성하기 위해 100 nm 두께의 상부 TiN 전극을 RF 스퍼터링을 통해 증착하였다. 최종적으로 HfO₂ 막은 강유전성 결정화를 위해 N₂ 대기조건과 600 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 1 분 동안 후열처리 되었다.

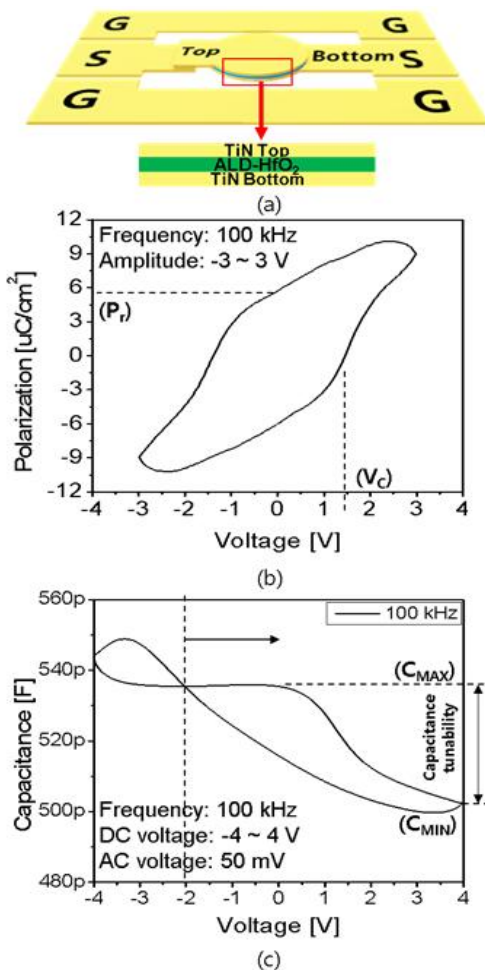


Fig. 2. (a) The schematic, (b) C-V, and (c) P-V characteristics of the fabricated HfO₂ MFM capacitor.

그림 2. (a) 제작된 HfO₂ MFM 커패시터의 모식도, (b) P-V, (c) C-V 특성

그림 2(a)는 제작된 지름 200 μm 를 가지는 HfO₂ MFM 커패시터의 모식도를 나타내며 그림 2(b)는 해당하는 MFM 커패시터의 분극-전압 (P-V) 히스테리시스 특성을 나타낸다. 제작된 10 nm 두께의 HfO₂ MFM 커패시터는 100 kHz의 주파수에서 각각 5.84 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 의 잔류분극 특성과 1.45 V의 보자 전압 (coercive voltage) 특성을 보였다. 그림 2(c)는 HfO₂ MFM 커패시터의 커패시턴스-전압 (C-V) 특성으로 커패시터의 강유전성을 뒷받침 한다. 강유전체 기반 커패시터의 경우, 양전극에 인가된 전압에 따른 격자구조의 쌍극자 모멘트가 butterfly 형상의 C-V 특성을 띄게 된다. 본 실험에서 제작된 HfO₂ MFM 커패시터의 경우 일반적인 강유전체 커패시터에서 보여 지는 대칭형 butterfly 형상이 아닌 비대칭 butterfly 형상이 추출되었고 이는 HfO₂의 강유전상인 *Pca*₂₁ 사방 정계 격자구조 상변화 공정의 추가적인 최적화를 통해 개선이 가능할 것으로 판단된다. 본 실험에서는 커패시턴스 tunability의 정확한 기준을 정립하기 위해 커패시턴스 교차점을 기준으로 오른쪽방향에서의 최대값 지점인 0 V 지점과 최소값 지점인 -4 V 지점에서 각각 커패시턴스 최대값(C_{MAX})과 최소값(C_{MIN})을 추출하였고 이를 통한 커패시턴스의 제어 범위는 100 kHz 주파수에서 538~500 pF 였다.

2. 주파수에 따른 강유전체 가변 커패시터의 커패시턴스 특성 분석

본 실험에서는 제작된 10 nm 두께를 가진 HfO₂ MFM 커패시터의 동작 주파수에 따른 커패시턴스 tunability를 분석하기 위해 그림 3(a)와 같이 낮은 동작 주파수영역인 1 kHz부터 1 MHz 까지는 반도체 파라미터 분석기 (B1500A)를 사용하여 C-V 특성을 추출하였으며 그림 3(b)와 같이 높은 동작 주파수 영역인 100MHz 부터 5GHz 까지는 네트워크 분석기 (E8361C)를 통해 s-parameter를 측정하였다. MFM 커패시터 구조는 직렬 커패시터와 같기 때문에 네트워크 분석기를 사용하여 측정 된 s-parameter는 ABCD 파라미터로 변환 후 아래와 같은 식을 통해 커패시턴스를 추출하였다.

$$Capacitance = \frac{1}{j\omega \times \text{imag}(B)} \tag{1}$$

$$, \text{ where } B = Z_0 \frac{(1+S_{11})(1+S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}}$$

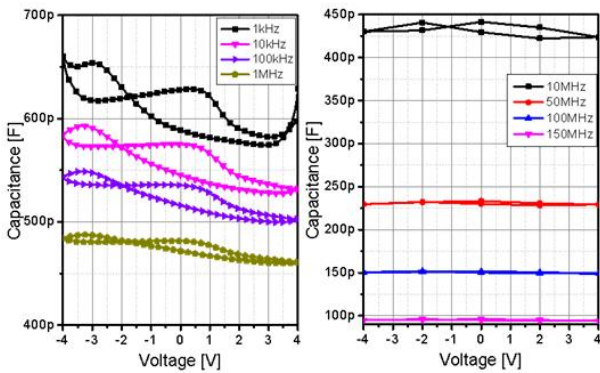


Fig. 3. (a) C-V characteristics of HfO₂ MFM capacitors depending on operation frequencies using a semiconductor parameter analyzer (1 kHz ~ 1 MHz) and (b) using a network analyzer (100 MHz ~ 5 GHz).

그림 3. 반도체 파라미터 분석기를 통해 추출된 1 kHz ~ 1 MHz 범위와 (b) 네트워크 분석기를 통해 추출된 100 MHz ~ 5 GHz 범위에서의 주파수에 따른 HfO₂ MFM 커패시터의 C-V 특성

그림 4(a)는 동작 주파수에 따른 HfO₂ MFM 커패시터의 최대 커패시턴스(C_{MAX})와 최소 커패시턴스(C_{MIN})값을 나타내며 $(C_{MAX} - C_{MIN})/C_{MIN}$ 으로 계산된 커패시턴스 tunability는 각각 그림 4(b)와 4(c)에서 log 및 linear 스케일로 나타내었다.

분석 결과, 50 kHz의 동작 주파수에서 최대 ~ 8.5 %의 커패시턴스 tunability는 이론과 같이 동작 주파수가 증가함에 따라 500 MHz 동작주파수에서 ~3%까지 감소하였으며 500 MHz 이상의 주파수에서 약 2.5 GHz 대역까지 tunability가 유지되었다. 커패시턴스 tunability가 동작 주파수 증가에 따라 ~3%까지 감소하였지만 발표된 문헌에 따르면 500 MHz 이상의 주파수에서 2~3 %의 tunability는 RF 응용분야에 적용되어 활용 할 수 있는 범위임을 확인하였다 [1], [10].

더 높은 주파수에서 감소된 커패시턴스 값과 tunability는 교류 전기장에서 relaxation time (τ)에 관련된 자유 쌍극자 진동에 기인 할 수 있다. 비교적 낮은 동작 주파수에서 강유전체의 쌍극자 운동은 전기장의 변화를 따를 수 있다. 그러나 특성 주파수 ($f = 1/\tau$)를 넘어서는 쌍극자 운동은 전기장의 변화에 뒤처지기 시작하고 고주파수 ($f \gg 1/\tau$)에서는 쌍극자가 전계의 반응을 따라갈 수 없다 [7], [8].

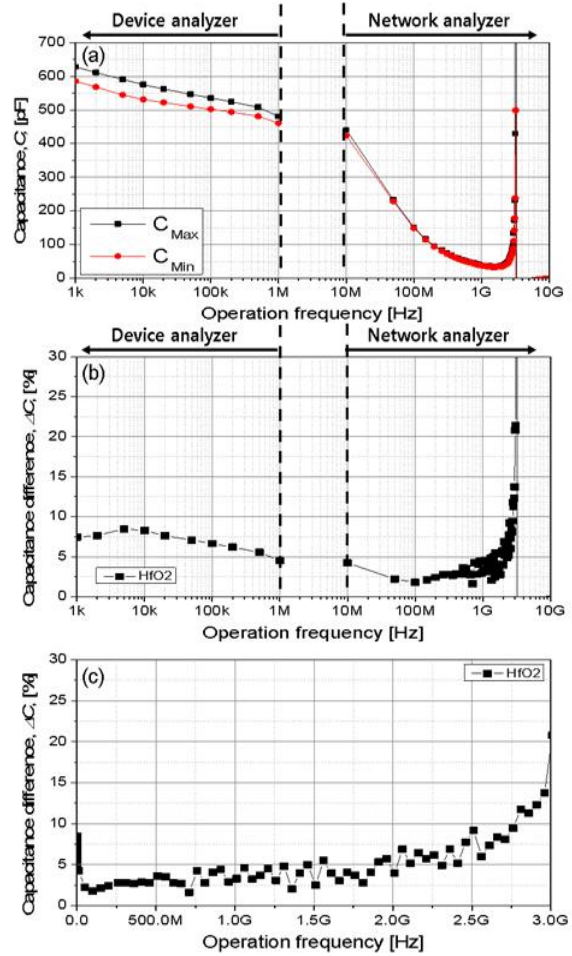


Fig. 4. (a) The maximum capacitance and minimum capacitance of HfO₂ MFM capacitors according to frequency. (b) The capacitance tunability in logarithmic frequency scales and (c) in linear frequency scales.

그림 4. (a) 주파수에 따른 HfO₂ MFM 커패시터의 최대 커패시턴스 및 최소 커패시턴스, (b) log 스케일의 커패시턴스 tunability, (c) linear 스케일의 커패시턴스 tunability

III. 결론

본 논문에서는 ALD-HfO₂ 강유전체 기반의 전자 제어 가변 커패시터의 주파수 의존적인 커패시턴스와 tunability를 마이크로파 주파수 범위까지 처음으로 분석하였다. 커패시턴스 tunability는 2.5 GHz 동작 주파수까지 ~ 3%의 tunability를 유지하여 tunable RF 디바이스에 적용하기 위한 HfO₂ 강유전체 전자 제어 가변 커패시터의 실현 가능성을 입증하였다. 커패시턴스 값 및 tunability는 tunable RF 디바이스를 설계 할 때 중요한데, 이는 선택 가능한 주파수 범위는 물론 디바이스의 전송 및 반사

계수를 결정하기 때문이다. 따라서 이 논문은 HfO₂ 강유전체 기반의 tunable RF 디바이스를 설계 할 때 중요한 참고가 될 것이다.

References

- [1] M. Sazegar et al., "Beam steering transmitarray using tunable frequency selective surface with integrated ferroelectric varactors," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.60, no.12, pp.5690 - 5699, 2012.
DOI:10.1109/TAP.2012.2213057
- [2] R. a York, "Tunable Dielectrics for RF Circuits," in Multifunctional Adaptive Microwave Circuits and Systems, SciTech Pub., 2009.
- [3] S. P. Antenna et al., "MEMS-Switched , Frequency-Tunable Hybrid Slot/PIFA Antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.8, pp.311 - 314, 2009.
DOI:10.1109/LAWP.2009.2015346
- [4] L. R. Tan, R. X. Wu, C. Y. Wang, and Y. Poo, "Magnetically tunable ferrite loaded SIW antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.12, pp.273 - 275, 2013.
DOI:10.1109/LAWP.2013.2248113
- [5] A. C. Polycarpou, M. A. Christou, and N. C. Papanicolaou, "Tunable patch antenna printed on a biased nematic liquid crystal cell," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.62, no.10, pp.4980 - 4987, 2014.
DOI:10.1109/TAP.2014.2344099
- [6] H. Y. Li, C. T. Yeh, J. J. Huang, C. W. Chang, C. T. Yu, and J. S. Fu, "CPW-fed frequency-reconfigurable slot-loop antenna with a tunable matching network based on ferroelectric varactors," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.14, pp.614 - 617, 2015.
DOI:10.1109/LAWP.2014.2375334
- [7] A. a Saif, Z. Azhar, Z. Jamal, Z. Sauli, and P. Poopalan, "Frequency Dependent Electrical Properties of Ferroelectric Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃ Thin Film," *MATERIALS SCIENCE*, vol.17, no.2, pp.0-4, 2011. DOI:10.5755/j01.ms.17.2.490
- [8] T. V. kumar, "Dielectric Relaxation, Ionic Conduction and Complex Impedance Studies on NaNO₃ Fast Ion Conductor," *International Journal of Materials Science and Applications*, vol.2, no.6, pp.173, 2013.
- [9] K. D. Kim et al., "Ferroelectricity in undoped-HfO₂ thin films induced by deposition temperature control during atomic layer deposition," *J. Mater. Chem. C*, vol.4, no.28, pp.6864 - 6872, 2016.
DOI:10.1039/C6TC02003H
- [10] Y. Ren, Z.-H. Huang, and L.-F. Guo, "A ELECTRICALLY TUNABLE PATCH ANTENNA WITH P(VDF-TRFE) THIN FILM," in *Material Engineering and Mechanical Engineering (MEME 2015)*, pp.239-245, 2015.
DOI:10.1142/9789814759687_0029

BIOGRAPHY

Sang-Woo Han⁴ (Member)

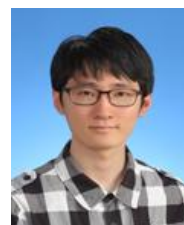


2013 : BS degree in Electronic and Electrical Engineering, Hongik University.

2015 : MS degree in Electronic, Information & Communications Engineering, Hongik University.

2018 : PhD degree in Electronic, Information & Communications Engineering, Hongik University.

Chang-Hyun Lee (Member)



2013 : BS degree in Electronic and Electrical Engineering, Hongik University.

2015 : MS degree in Electronic, Information & Communications Engineering, Hongik University.

Jeong-Hae Lee (Member)

1985 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
1988 : MS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

1993 : PhD degree in Electrical Engineering, University of California, Los Angeles.

1993~1996 : Visiting Scientist, General Atomics.

1996~ : 2007~ : Professor in the School of Electronic and Electrical Engineering.

Ho-Young Cha (Member)

1996 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
1999 : MS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.
2004 : PhD degree in Electrical and Computer Engineering, Cornell University.

2004~2005 : Postdoctoral Researcher, Cornell University.

2005~2007 : Research Engineer, General Electric Global Research Center.

2007~ : Professor in the School of Electronic and Electrical Engineering