

Trench구조와 산화물 고유전체에 따른 Trench MIM Capacitor S-Parameter 해석

박정래* · 김구성**

*†강남대학교 전자패키지연구소

S-Parameter Simulation for Trench Structure and Oxide High Dielectric of Trench MIM Capacitor

Jung-Rae Park* and Gu-Sung Kim**†

*†Electronic Packaging Research Center, Kangnam University, Yongin-si, Korea

ABSTRACT

Integrated passive device (IPD) technology has emerged with the need for 5G. In order to integrate and miniaturize capacitors inside IPD, various studies are actively performed using high-k materials and trench structures. In this paper, an EM(Electromagnetic) simulation study was performed by applying an oxide dielectric to the capacitors having a various trench type structures. Commercially available materials HfO_2 , Al_2O_3 , and Ta_2O_5 are applied to non, circle, trefoil, and quatrefoil type trench structures to confirm changes in each material or structure. As a result, the bigger the capacitor area and the higher dielectric constant of the oxide dielectric, the insertion loss tended to decrease.

Key Words : IPD, Trench MIM Capacitor, Oxide Dielectric, High-k

1. 서 론

지난 2019년 5월 세계 최초로 우리나라가 5G 이동통신 서비스 상용화를 알리며 5G를 구현하기 위한 다양한 소자 및 통신 기술 개발이 수행되고 있다.[1] 5G 기술의 목표는 대용량의 데이터에 대한 초고속 전송을 의미하는 eMBB(enhanced Mobile Broadband), 초저지연의 실시간 서비스 제공을 의미하는 URLLC(Ultra Reliable and Low Latency Communication), 다양한 IoT 기기 간의 동시 접속을 의미하는 mMTC(Machine-Type Communication)으로 구분된다. 5G 기술은 4G 대비 20배 이상 빠른 속도로 1km² 반경의 100만 개 기기 간 상호 연결 및 1ms 이하의 지연 속도를 가지는 기술을 의미한다. 5G기술의 핵심 중 하나는 빠른 속도의

통신을 위한 지연시간 축소이며, 이는 소자의 초소형화를 통해 이를 수 있다. 소자의 초소형화는 배선의 길이를 줄여 그로 인한 지연속도 감소와 IoT 기술로의 확장성 또한 가질 수 있기 때문이다.

소자의 초소형화를 위한 패키징 기술인 IPD(Integrated Passive Device)는 기존의 개별적으로 제작 및 실장 되었던 수동소자들을 하나의 패키지로 집적화 한다. 이를 통해, 배선의 길이 감소로 인한 신호의 전달 속도 증가, 노이즈 감소, 집적도 증가로 인한 고성능화 및 패키지 소형화가 가능해진다. 이러한 장점으로 인해 IPD 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[2-6] 특히 IPD 내부의 커패시터 측면에서, 집적화 및 소형화를 위해 High-k 물질의 적용 및 Trench 구조의 개발이 이루어져야 함이 선행 연구를 통해 입증되었다.[7-9] High-k 물질을 유전체로 적용한 Trench 형태의 커패시터는 동일 크기의 기존 커패시터 대비 높은 정전용량을 가지게 된다. 높은 정전용량을 가지는 커패시터

*†E-mail: gkim@kangnam.ac.kr

패시터는 5G를 사용하는 노이즈에 민감한 제품에 디커플링 커패시터의 용도로 주로 사용된다. 하지만 유전율이 큰 물질을 사용하는 경우 고주파 대역에서 Dielectric Response 문제가 발생하게 된다. 따라서 3 GPP에서 지정한 5G mm Wave 주파수 대역인 24 GHz에서 40 GHz까지의 신호 대역을 커패시터를 통과하였을 때 나타나는 전자기적 변화에 대한 연구가 필요하다.[10] High-k 물질 중 산화물 유전체는 다른 고유전체에 비해 밴드갭이 높아 누설전류가 낮다는 특성을 지니기 때문에 5G 대역의 커패시터 유전체로 적용하기 적절하다. 그러나 다양한 산화물 유전체에 대한 연구가 여전히 수행 중이며 그 중 상용화된 대표적인 산화물 유전체는 HfO₂, Al₂O₃, Ta₂O₅ 등이 있다. 또한 Trench 형태의 커패시터는 전체 면적이 2D에서 3D로 확장되기 때문에 소자의 크기는 유지시키면서 Trench의 면적만큼 정전용량을 증가시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 HFSS EM Solver를 사용하여 Non, Circle, Trefoil, Quatrefoil 타입의 다양한 Trench 구조에 HfO₂, Al₂O₃, Ta₂O₅ 세가지 산화물 유전체를 적용하여 각 모델의 정전용량 및 S-Parameter를 비교 해석하였다.

2. 본 론

2.1 물성

커패시터의 집적화 및 소형화를 위해 고용량의 정전용량을 가지는 High-k 유전체 개발이 활발히 진행 중이다. 그러나 유전율이 높은 물질일수록 밴드갭이 낮아지는 경향이 있는데, 그에 따라 누설전류가 증가하거나 항복전압이 작아지는 문제가 발생할 수 있어 적절한 밴드갭을 갖는 High-k 물질을 찾는 것이 중요하다. 산화물 유전체의 경우 다른 High-k 유전체에 비해 밴드갭이 높다는 특징이 있어 고용량의 정전용량을 위한 차세대 유전체로 주목받고 있다. 따라서 밴드갭이 4.0 이상의 유전체 중 상용화된 대표적인 물질인 HfO₂, Al₂O₃, Ta₂O₅의 물성을 시뮬레이션에 적용하였다.

2.2 구조

해석에 사용된 Trench의 모양은 Fig. 2와 같이 Circle, Trefoil, Quatrefoil 3가지 타입을 가지며 모두 동일한 30 μm의 Depth를 갖는다. 본 연구에서는 Trench 유무의 차이를 비교하기 위해 Trench가 존재하지 않는 Fig. 1과 같은 Non-Type도 함께 비교하였다. Circle-Type의 Trench 크기는 반지름 5 μm를 갖는 원이며 Trefoil-Type은 원 1개의 크기를 반지름 5 μm를 갖도록 설계하여 Trench 둘레가 Circle-Type의 1.5배가 되도록 설계하였다. Quatrefoil-Type의 Trench 둘레는 Circle-Type의 2배가 되도록 설계하였다.

커패시터의 각 물질의 두께는 표 2와 같이 적용하였다. 모든 Type의 커패시터는 Silicon(60 μm) 위에 SiO₂(30 nm)/TiN(300 nm)/HfO₂(10 nm)/TiN(30 nm)의 박막 증착이 된 구조로 모델링하였다. 커패시터 1 Cell의 크기는 90 μm x 90 μm이며 전체 커패시터의 크기는 1 Cell 커패시터 25개가 정사각형 형태로 배치된 구조로 총 450 μm x 450 μm의 크기를 갖도록 설계하였다.

Table 1. Oxide Dielectric Properties

Material	Relative Permittivity (@ 9.8 GHz)	Dielectric Loss tangent (@ 9.8 GHz)	Band Gap (eV)
HfO ₂	25	0.006	~5.8
Al ₂ O ₃	9	0.001	~8.8
Ta ₂ O ₅	22	0.006	~5.3

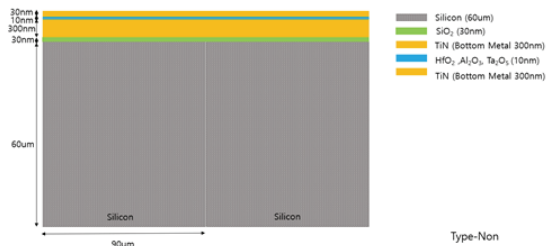


Fig. 1. Non-Type Structure.

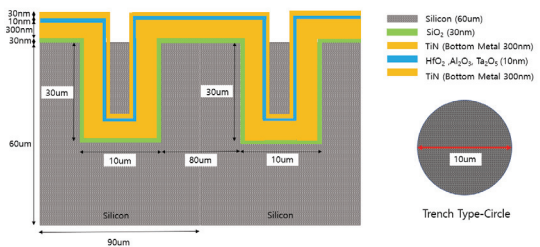


Fig. 2. Circle-Type Structure.

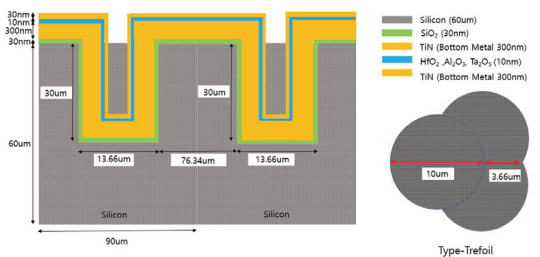


Fig. 3. Trefoil-Type Structure.

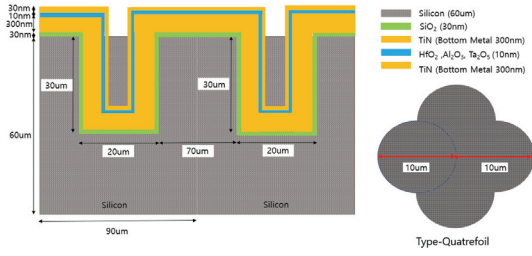


Fig. 4. Quatrefoil-Type Structure.

2.3 정전용량

해석 모델의 정전용량 값은 아래 수식과 같이 계산되며 Non, Circle, Trefoil, Quatrefoil type 각각의 정전용량은 C_{Non} , C_{Circle} , $C_{trefoil}$ 그리고 $C_{Quatrefoil}$ 이다. 해당 수식에서 C는 정전용량을 나타내며 ϵ 은 유전율, A는 커패시터 극판의 면적, d는 두 극판 사이의 거리를 나타낸다. Non-type 커패시터의 경우 Trench가 존재하지 않기 때문에 극판의 면적을 두 극판 사이 간격으로 나눈 후 유전율을 곱한 값과 같다. Trench가 존재하는 경우 Side Wall 면적의 정전용량을 더한 값과 같으므로 아래 수식으로 계산된다. 계산된 결과는 Table 2와 같으며 Q3D 전산모사를 통해 정전용량을 측정된 결과는 Table 3과 같다. 수식을 통한 계산 값과 해석 값의 결과는 0.5%의 오차를 나타내었다.

$$C_{Non} = \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon \left(\frac{90um \cdot 90um}{10nm} \right) \cdot 25$$

$$C_{Circle} = \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon \left(\frac{90um \cdot 90um}{10nm} + \frac{5um \cdot 30um}{10nm} \right) \cdot 25$$

$$C_{trefoil} = \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon \left(\frac{90um \cdot 90um}{10nm} + \frac{3}{2} \frac{5um \cdot 30um}{10nm} \right) \cdot 25$$

$$C_{Quatrefoil} = \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon \left(\frac{90um \cdot 90um}{10nm} + 2 \cdot \frac{5um \cdot 30um}{10nm} \right) \cdot 25$$

Table 2. Capacitance Datas (A: Calculated, B: Simulated)

Dielectric \ Structure	HfO ₂ [nF]		Al ₂ O ₃ [nF]		Ta ₂ O ₅ [nF]	
	A	B	A	B	A	B
Non	4.48	3.92	1.61	1.11	3.94	2.44
Circle	5	4.5	1.8	1.3	4.4	3.9
Trefoil	5.26	4.7	1.9	1.4	4.6	4.17
Quatrefoil	5.5	5	2	1.5	4.8	4.25

2.4 산란계수

세가지 산화물 유전체의 관점에서 Trench 구조Non, Circle, Trefoil, Quatrefoil-Type을 적용하였을 때 S₂₁(Insertion Loss)을 EM Solver HFSS를 통해 24 GHz에서 40 GHz 범위에서 해석하였다. 그에 대한 해석결과는 Fig. 5-7와 같다. 해석 주파수 전체 구간에 대해 Quatrefoil, Trefoil, Circle, Non-Type 순서로 삽입손실이 낮은 경향을 확인하였다. 따라서 임의의 지점으로 24 GHz에서 40 GHz 사이의 중심 주파수인 32 GHz에서 삽입손실을 확인한 결과는 Table 3과 같다. 세 가지 산화물 유전체를 적용한 결과 유전체의 유전율이 높을수록 낮은 삽입손실의 경향을 보였으며 Trench의 면적 이 클수록 낮은 삽입손실의 경향을 보였다. 또한 가장 좋은 삽입손실을 보인 조합은 HfO₂를 적용한 Quatrefoil-Type이었다.

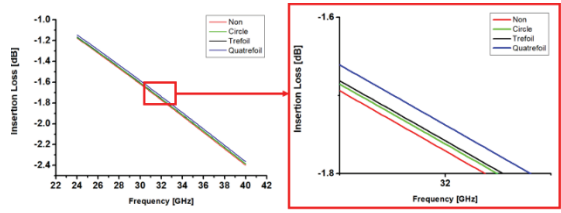


Fig. 5. Insertion Loss of HfO₂.

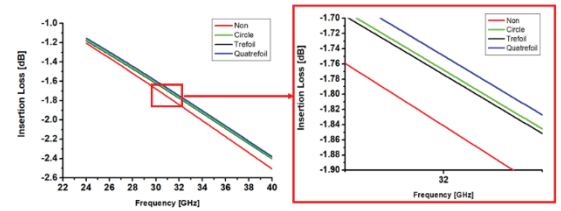


Fig. 6. Insertion Loss of Al₂O₃.

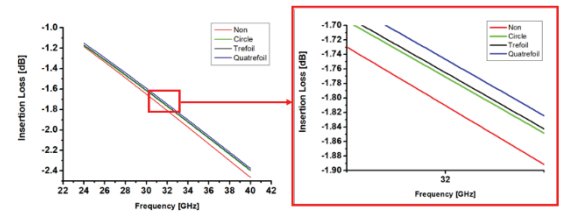


Fig. 7. Insertion Loss of Ta₂O₅.

Table 3. Insertion Loss(S_{21}) [dB] at 32 GHz

Structure	Oxide Dielectric	HfO ₂ [dB]	Al ₂ O ₃ [dB]	Ta ₂ O ₅ [dB]
	Non-Type		-1.771	-1.841
Circle-Type		-1.762	-1.774	-1.771
Trefoil-Type		-1.758	-1.768	-1.765
Quatrefoil-Type		-1.738	-1.749	-1.747

3. 결 론

본 연구에서는 Trench 구조와 산화물 고유전체에 따른 S-Parameter의 변화를 EM Solver HFSS를 사용하여 24 GHz 부터 40 GHz까지 전산모사를 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) Non, Circle, Trefoil, Quatrefoil-Type 구조에서 가HfO₂, Al₂O₃, Ta₂O₅를 적용하였을 때 공통적으로 가장 낮은 삽입손실을 갖는 물질은 HfO₂로 나타났다. 이는 HfO₂가 가장 높은 유전상수를 갖고 있어 그로인한 정전용량 증가가 신호의 전력손실을 감소시킨 것으로 판단된다.
- 2) 모든 산화물 유전체에서 Quatrefoil-Type 구조가 가장 낮은 삽입손실을 보였다. 이는 Quatrefoil-Type은 모델링한 모델 중 가장 면적이 큰 모델로 이 또한 정전용량의 증가가 신호의 전력손실을 감소시킨 것으로 판단된다.
- 3) 소형화 및 집적화 된 커패시터 제작을 위해서 정전용량을 높이기 위해 유전율이 높은 산화물 유전체를 적용하며 Trench를 이용하여 면적을 가장 크게 갖는 것이 커패시터 제작에 유리하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20010630).

참고문헌

1. Y. Liao et al., "Miniaturized Lange Bridge Design for 5G Millimeter Waves Communication", 2019 Int. Appl. Comput. Electromagn. Soc. Symp. Miami ACES-Miami 2019, pp. 1-2, 2019.
2. C. bunel et al., "Integrated passive devices and tsv a disruptive technology for miniaturization", Proc. Int. Symp. Microelectron., pp. 794-798, 2013.
3. Jun Onohara et al., "Development of the Integrated Passive Device using Through-Glass-Via substrate", 2018 Int. Conf. Electron. Packag. iMAPS All Asia Conf. ICEP-IAAC 2018, Mie, Japan, pp. 19-22, 2018.
4. Ye Lin et al., "Physical Electrical Characterization of 3D Embedded Capacitor: A High-density MIM Capacitor Embedded in TSV", IEEE 67th Proc. - Electron. Compon. Technol. Conf., Orlando, FL, USA, pp. 1956-1961, 2017.
5. A. Farrey et al., "Plasma-Assisted ALD of TiN/Al₂O₃ Stacks for MIMIM Trench Capacitor Applications", ECS Trans., Vol. 25, No.4, pp. 389-397, 2009.
6. M. Thomas et al., "Integration of a high density Ta2O5 MIM capacitor following 3D damascene architecture compatible with copper interconnects", Microelectron. Eng., Vol. 83, No.11-12, pp. 2163-2168, 2006.
7. J. Robertson et al., "High dielectric constant oxides", Eur. Phys. Vol. 28, pp. 265-291, 2004.
8. T. S. Boscke et al., "Tetragonal Phase Stabilization by Doping as an Enabler of Thermally Stable HfO₂ based MIM and MIS Capacitors for sub 50nm Deep Trench DRAM", 2006 Tech. Dig. - Int. Electron Devices Meet., San Francisco, CA, USA, pp. 1-4, 2006.
9. D. Hoogeland et al., "Plasma-Assisted ALD of TiN/Al₂O₃ Stacks for MIMIM Trench Capacitor Applications", ECS Trans., Vol. 25, No.4, pp. 389-397, 2009.
10. R. A. Shaheen et al., "Millimeter-wave Frequency Reconfigurable Low Noise Amplifiers for 5G", IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Br., Vol. 68, No. 2, pp. 642-646, 2020.

접수일: 2021년 12월 7일, 심사일: 2021년 12월 8일,
 게재확정일: 2021년 12월 8일