

YSZ/Al₂O₃/YSZ 적층복합 구조를 적용한 DRAM Capacitor 설계

소속대학

명지대학교 신소재공학과

지도교수

김동훈 교수님

설계팀원

홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민

캡스톤 디자인 2

신소재공학과
20학년도 2학기 K-pop, K-high조
(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)



DRAM 소자 특성 향상 = Refresh 향상

Refresh 성능을 높이는 방법은?

Refresh 동작을 위한 Sense Amplifier 전압

$$\Delta V = \frac{C_C * V_{dd}}{2(C_C + C_{BL})}$$

C_C : Cell Capacitance
 C_{BL} : BL의 기생 Capacitance
 V_{dd} : 메모리 작동 전압

- 1) Refresh 동작을 위한 Sense Amplifier의 동작 전압인 ΔV 값이 높을수록 효율적인 Refresh가 가능하다
- 2) V_{dd} 를 높이면 메모리 작동 전압이 높아져 발열 및 전력소모가 높아진다.

따라서 **Cell Capacitance**인 C_C 를 높여야 한다.

Capacitance 향상

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

신소재공학과
 20학년도 2학기 K-pop, K-high조
 (홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)



(1) 과거의 Capacitor 연구 - 단일재료

	Al_2O_3	HfO_2	ZrO_2
Bandgap	7.6 eV	5.8 ~ 6.0 eV	5.0 ~ 5.75 eV
Dielectric constant	8 ~ 11.5	25	29, 37, 47
Leakage current	높은 밴드갭으로 인해 10^{-8} A/cm ² 일정 유지	적당한 밴드갭으로 인해 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ A/cm ²	낮은 밴드갭으로 인해 큰 Leakage current
한계점	낮은 유전상수로 인해 정전용량 확보 어려움	등가 산화막 두께를 낮추기 어려워 미세공정, 집적화 한계	5~10 nm 두께로 형성할 경우 Leakage current 급격히 증가

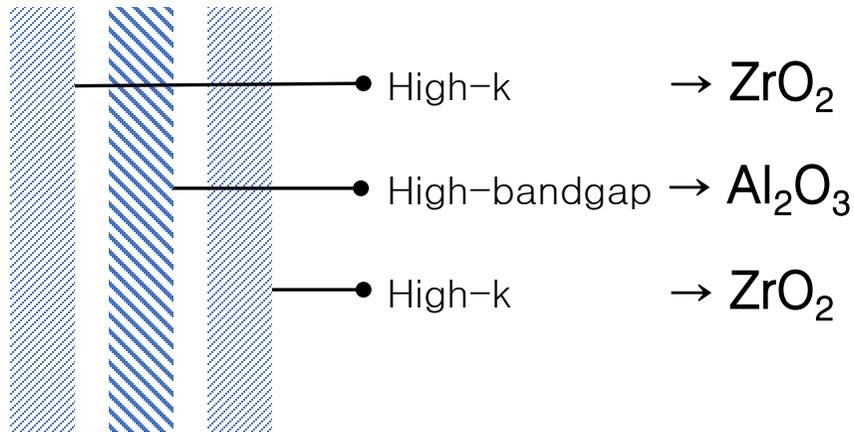
신소재공학과

20학년도 2학기 K-pop, K-high조

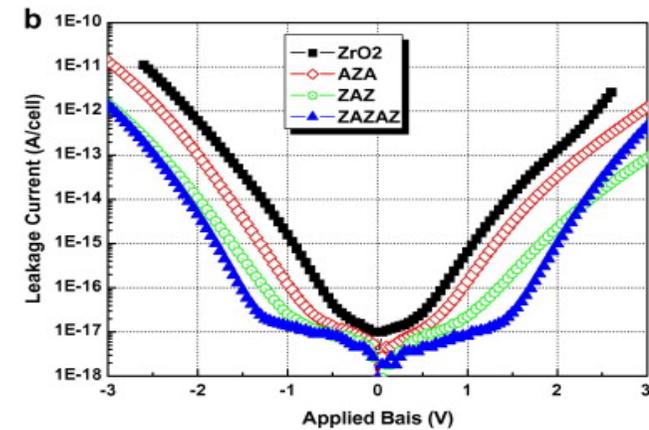
(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)



(2) 과거의 Capacitor 연구 - 복합적층 구조 등장



High-k 사이에 비정질 High-bandgap을 추가하여 High-k 재료의 Boundary layer를 통해 발생하는 누설전류 감소



ZrO₂ 박막의 높은 누설 전류의 특성 개선 (약 30% 감소)

신소재공학과

20학년도 2학기 K-pop, K-high조

(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)



(3) 과거의 Capacitor 연구 - 복합적층 구조

	ZAZ	ZSZ	ZYZ	ZAT
Dielectric constant	18	19	25 ~ 33	25
Leakage current	$4 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$	$5 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$	$10^{-5} \sim 10^{-9} \text{ A/cm}^2$	$10^{-2} \sim 10^{-8} \text{ A/cm}^2$
한계점	ZrO ₂ 단일막보다 유전을 감소	전체 공정 복잡	ZAZ 대비 Leakage current 특성이 조금 나쁨	열처리 후 Leakage current 급격히 증가

신소재공학과

20학년도 2학기 K-pop, K-high조

(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)



(5) 과거의 Capacitor 연구 - 복합적층 구조

지속적으로 연구 중인 복합적층 구조에 대한 새로운 솔루션,
고체 산화물 전지에서 사용 중인 YSZ를 착안

내구성, 절연특성이 입증된 YSZ를 적용한
DRAM Capacitor 설계를 제안하다.

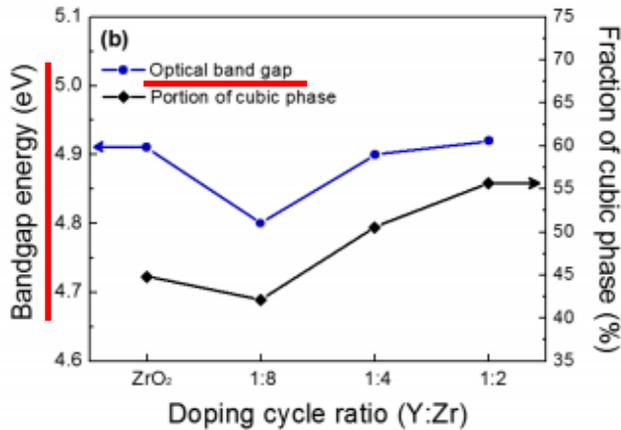
	ZAZ	ZAZ	ZAZ	ZAT
Dielectric constant	18	19	25 ~ 33	25
Leakage current	10^{-9} A/cm ²		$10^{-5} \sim 10^{-9}$ A/cm ²	$10^{-2} \sim 10^{-8}$ A/cm ²
한계점	ZrO2 단일막보다 유전을 감소	전체 공정 복잡	ZAZ 대비 Leakage current 특성이 조금 나쁨	열처리 후 Leakage current 급격히 증가

신소재공학과
20학년도 2학기 K-pop, K-high조
(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)



새로운 설계 재료, YSZ의 등장

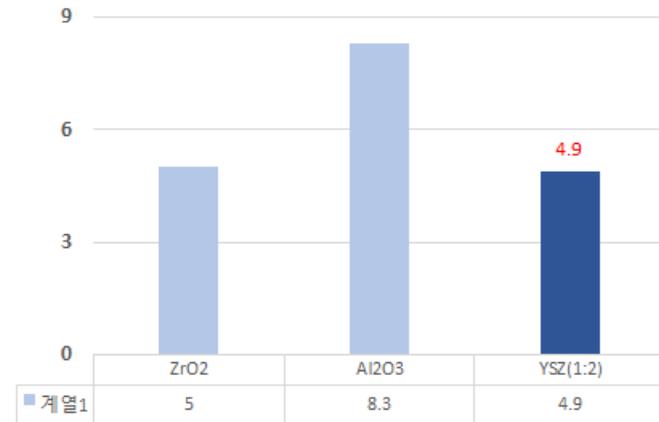
1. Band Gap 특성



▲ relationship between bandgap energy and the fraction of cubic phase in films

- Y doping으로 안정화가 되면서 monoclinic에서 cubic 상전이
- cubic 상 함유량이 증가함에 따라 *bandgap* 증가

BAND GAP



- 기존에 사용되고 있는 ZrO₂와 비슷한 Band gap

신소재공학과

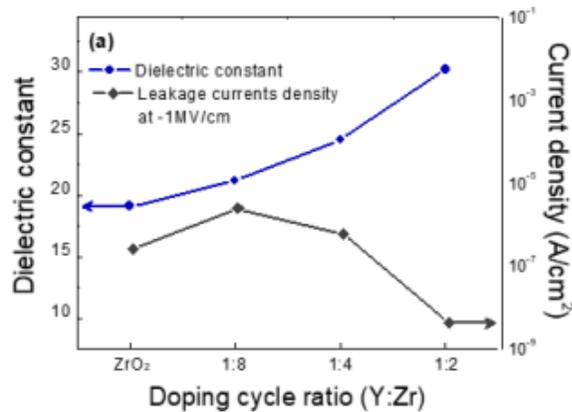
20학년도 2학기 K-pop, K-high조

(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)



새로운 설계 재료, YSZ의 등장

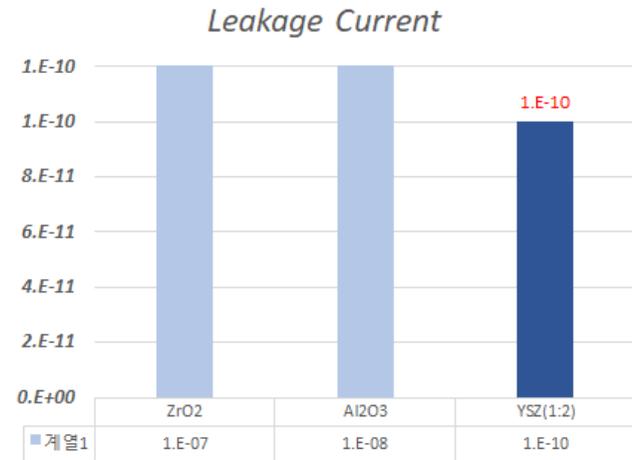
2. Leakage Current 특성



▲ Comparison of electrical properties of MIM capacitors using 10 nm-thick ALD ZrO₂ and Y-doped ZrO₂

- Y doping은 yttrium의 큰 이온 반지름과 작은 전기음성도로 large atomic relaxation을 유도
- Oxygen vacancy의 charge state를 conduction band로 이동시켜 leakage current 특성 개선

신소재공학과
20학년도 2학기 K-pop, K-high조
(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)

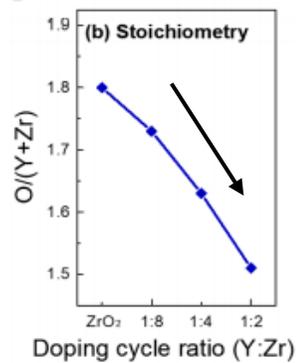


- Y도핑으로 Grain 사이를 치밀하게 막아 Y:Zr(1:2)비율에서 낮은 누설전류 특성을 보인다.
- 결론적으로 YSZ 복합적층 구조가 ZAZ보다 누설전류 특성이 좋을 것으로 예측 가능하다.

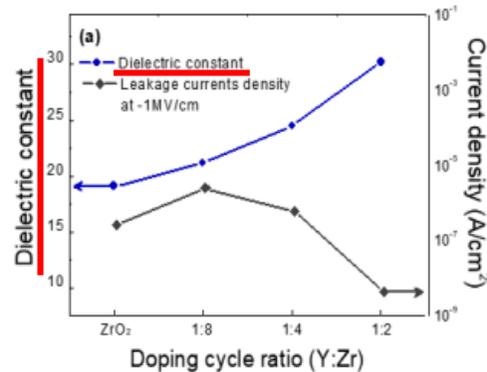


새로운 설계 재료, YSZ의 등장

3. Dielectric Constant 특성

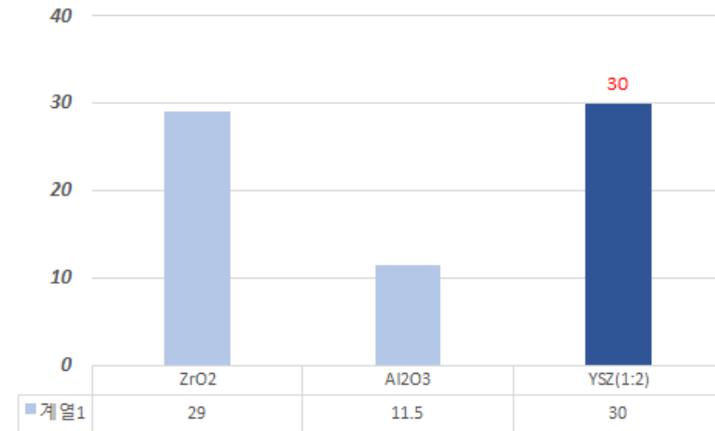


▲ stoichiometry of 10 nm-thick ALD ZrO₂, as functions of the doping cycle ratio, Y: Zr



▲ Comparison of electrical properties of MIM capacitors using 10 nm-thick ALD ZrO₂ and Y-doped ZrO₂

Dielectric Constant



- Y doping으로 인해 oxygen vacancy density 증가
- Oxygen vacancy 주변의 원자들이 재배열 하며 결정도가 안정화

- 비슷한 유전상수 값이지만, YSZ의 누설 특성이 더 좋기 때문에 YAY 유리할 것으로 예측 가능

신소재공학과
20학년도 2학기 K-pop, K-high조
(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)

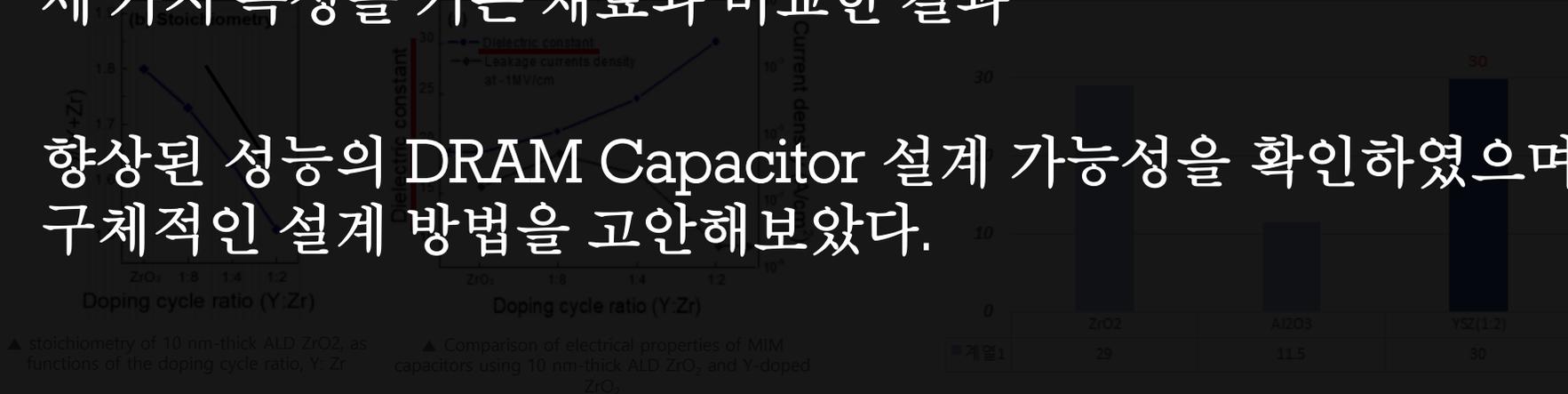


(6) 새로운 설계 재료, YSZ의 등장

1. Dielectric Constant 특성

YSZ의 Band gap, Leakage Current, Dielectric Constant 세 가지 특성을 기존 재료와 비교한 결과

향상된 성능의 DRAM Capacitor 설계 가능성을 확인하였으며, 구체적인 설계 방법을 고안해보았다.



▲ stoichiometry of 10 nm-thick ALD ZrO₂, as functions of the doping cycle ratio, Y: Zr

▲ Comparison of electrical properties of MIM capacitors using 10 nm-thick ALD ZrO₂, and Y-doped ZrO₂

- Y doping으로 인해 oxygen vacancy density 증가
- Oxygen vacancy 주변의 원자들이 재배열 하며 결정도가 안정화

- 비슷한 유전상수 값이지만, YSZ의 누설 특성이 더 좋기 때문에 YAY 유리할 것으로 예측 가능

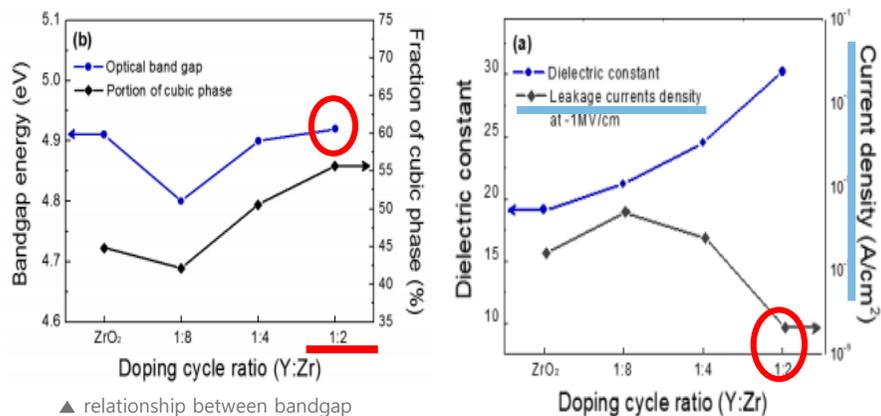
신소재공학과
 20학년도 2학기 K-pop, K-high조
 (홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)

신소재공학과
20학년도 2학기 K-pop, K-high조
(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)

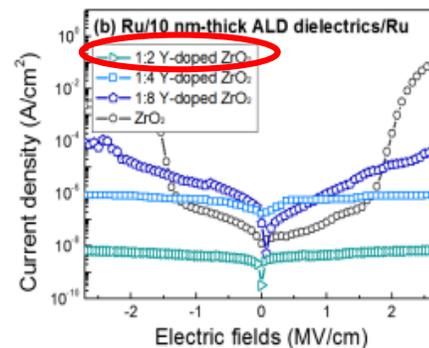


YSZ의 구체적인 설계

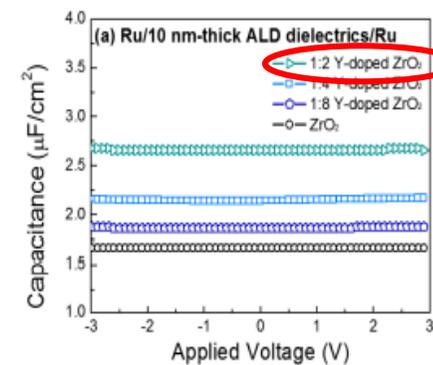
1. Y의 도핑 비율 결정



▲ relationship between bandgap energy and the fraction of cubic phase in films



▲ I-V curves of MIM capacitors using 10nm-thick ALD ZrO₂ and Y doped ZrO₂ Annealed under N₂ environment at 800 °C



▲ C-V curves of MIM capacitors using 10 nm-thick ALD ZrO₂ and Y-doped ZrO₂, annealed under N₂ environment at 800 °C

여러 데이터를 분석해본 결과, Y:Zr = 1:2 의 비율로 YSZ가 형성될 때, Band gap, Leakage Current, Dielectric Constant 특성이 좋아지는 것을 확인할 수 있다.

신소재공학과

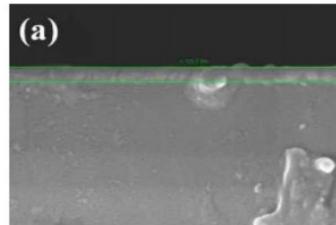
20학년도 2학기 K-pop, K-high조

(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)

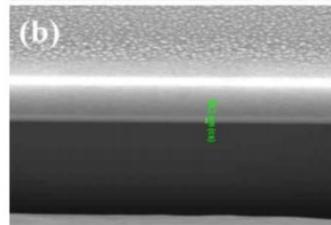


YSZ의 구체적인 설계

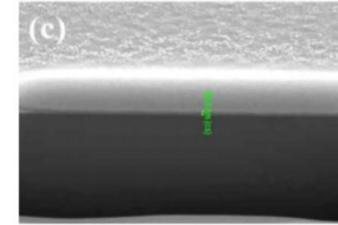
2. YSZ의 증착 공정 선정



(a) PLD 공정 기법



(b) ALD 공정 기법



(c) Sputter 공정 기법

고체 산화물 전지에 응용되는 YSZ의 공정 기법 조사 결과 (논문 결과 참조)

ALD 를 이용해 증착한 YSZ 박막이 PLD, Sputter 를 이용해 증착한 박막보다 치밀한 구조로 형성 또한, 약 5nm 두께 공정 가능으로, 기존의 ZrO₂ 대체 가능

신소재공학과
20학년도 2학기 K-pop, K-high조
(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)

YSZ의 구체적인 설계

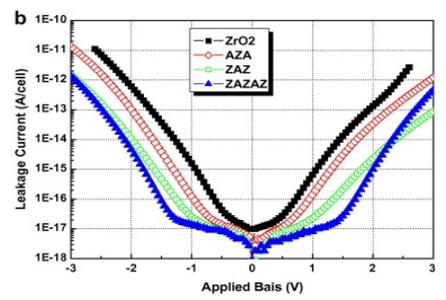
3. YSZ의 설계 구조

적층 구조의 필요성:

단일 High-k 재료에서는 High-k 물질의 Boundary layer를 통해 지속적으로 누설전류가 발생한다고 있다.

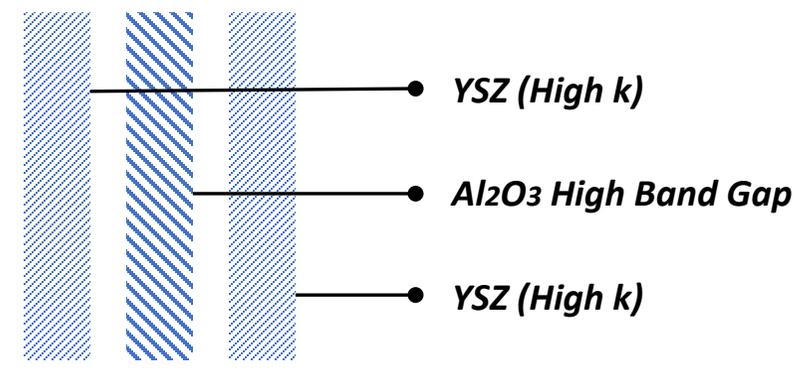
누설전류 특성 개선에 큰 영향을 주는 물질로 알려져 있는 Al₂O₃

기존 연구 및 양산 방법을 착안, High-k 물질 사이에 밴드갭 높은 물질로 감싸는 적층 구조를 적용 할 계획이다.



기존의 연구가 증명해왔던
적층 구조의 누설전류 해결

누설 전류를 해결하기 위해서
적층 구조 적용 필요

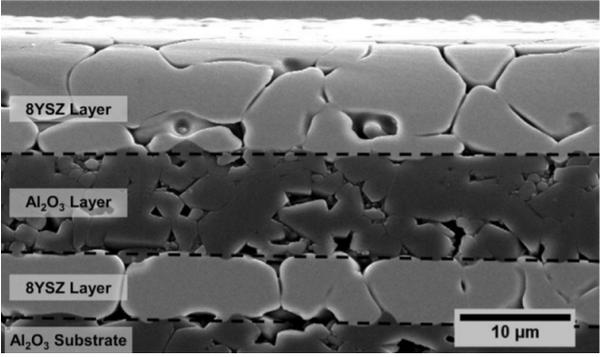




YSZ의 구체적인 설계

신소재공학과
 20학년도 2학기 K-pop, K-high조
 (홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)

4. YSZ/Al₂O₃ 재료 간 특성



▲ SEM image of polished and thermally etched cross-section of 8YSZ/Al₂O₃ multilayer film after sintering

	열팽창계수 (x10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	온도 영역(°C)
YSZ	10.4	20~1000
Al ₂ O ₃	7.8	25~800
ZrO ₂	10.5	40~800

▲ 재료에 따른 열팽창 계수

두 재료를 적층한 자료를 참고하여
 계면에서 균일한 상태와 큰 Grain을 형성하는 것을 확인

ZrO₂ 보다 낮은 YSZ의 열팽창계수를 가지는 것을 확인
 → YSZ와 Al₂O₃의 열적 안정성을 예측 할 수 있음



YSZ/Al₂O₃/YSZ 최종 설계

신소재공학과
 20학년도 2학기 K-pop, K-high조
 (홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)

Deposition materials	Deposition Method	Capacitor Structure
<p>YSZ (Y:Zr=1:2)</p> <p>Al₂O₃</p>	<p>ALD (PEALD)</p>	<p>YSZ (<i>High k</i>)</p> <p>Al₂O₃ (<i>High B.G</i>)</p> <p>YSZ (<i>High k</i>)</p>
<p>YSZ의 분율이 1:2일 때 가장 높은 Capacitance 및 Leakage Current 특성</p>	<p>가장 치밀한 박막 형성과 매우 얇은 두께 증착 가능</p>	<p>높은 유전 상수 사이에 높은 밴드갭 물질 적층 구조</p>

참고문헌

1. 김성근, 전기전자재료 제 26권 제 2호 ‘DRAM capacitor의 발전 현황, 2013
2. Ho Jin Cho 등 10명 “New T1T capacitor with ZrO₂/Al₂O₃/ZrO₂ dielectrics for 60 nm and below DRAMs”, 2007
3. 조성탁, “Studies on Electrical and Structural Properties of ZrO₂/Y₂O₃/ZrO₂ Dielectric Thin Films for DRAM Capacitors” 서울대학교 대학원 공학석사 학위논문, 2019
4. 김다영, 원자층 증착법에 의한 DRAM Capacitor 용 Al-doped HfO₂ 및 ZrO₂/ZrSiO₄/ZrO₂ (ZSZ) 유전체 증착 및 특성에 관한 연구”, 부산대학교 대학원 석사학위논문, 2018
5. 차순형, “DRAM Capacitor의 유전율 향상을 위한 ZrO₂/Al₂O₃/TiO₂ 박막의 전기적, 구조적 특성 연구”, 서울대학교 공학 전문대학원 공학전문석사 학위 연구보고서, 2019
6. 충남대학교 전자과 곽호영 등 8명 “Al₂O₃-HfO₂-Al₂O₃와 SiO₂-HfO₂-SiO₂ 샌드위치 구조 MIM 캐패시터 특성 분석”, 2011
7. B.-E. Park, I.-K. Oh, C. Mahata, C.W. Lee, D. Thompson, H.-B.-R. Lee, W.J. Maeng, H. Kim, Atomic layer deposition of Y stabilized ZrO₂ for advanced DRAM capacitors, Journal of Alloys and Compounds, 2017

신소재공학과
20학년도 2학기 K-pop, K-high조
(홍준성, 김영은, 양예진, 윤민수, 한지민)