

## BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> 박막의 고주파 유전 특성

이석진, 장보윤, 정영훈, 남 산  
고려대학교, 재료공학과

### Microwave Dielectric Properties of BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> Thin Film

Suk-Jin Lee, Bo-Yun Jang, Young-Hun Jung, and Sahn Nahm  
Department of Material Science and Engineering, Korea Uni.

#### Abstract

BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>계 유전체 박막을 Si 기판위에 RF Sputtering으로 성장시켜 유전체 박막의 두께 변화에 따른 마이크로파 대역에서 유전체 박막의 유전율 및 유전손실을 측정하였다. 유전체 박막의 두께가 증가함에 따라 유전율은 약간 증가하였으며 마이크로파 대역에서 벌크 유전체와 같은 38의 유전율 값을 얻을 수 있었다. 또한 probe와 상부 전극사이의 접촉 저항을 고려한 값들을 보정함으로써 6GHz의 주파수 대역까지 BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> 박막의 유전손실 값을 안정적으로 측정할 수 있었으며 유전체 박막의 두께가 증가함에 따라 최대 0.0001의 양호한 유전손실 값을 얻을 수 있었다.

**Key Words** : BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> Thin Films, Microwave frequency, CPW probe, Dielectric Constant, Dielectric Loss

#### 1. 서 론

최근 이동통신 및 위성방송 등 마이크로파를 이용하는 무선 통신시스템의 보급이 활발하게 진행됨에 따라 마이크로파 유전체 연구에 대한 중요성이 부각되고 있다. 또한 유전체 박막은 DRAM (Dynamic Random Access Memory) 및 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits)에 사용할 수 있어 많은 관심을 가지고 연구되고 있다.<sup>1)~3)</sup> 이와 같은 유전체 박막에 필요한 유전특성으로는 저 유전손실(tanδ), 고 유전율(ε<sub>r</sub>)을 가져야 한다. DRAM 및 MMIC의 사용 주파수가 수백 MHz에서 수십 GHz 대역에서 사용되기 때문에

GHz 대역에서 유전체 박막의 유전특성이 마이크로파 대역에서 동작되는 소자 개발을 위해 반드시 연구되어야 한다. 특별히 BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>계 세라믹 유전체는 마이크로파 대역에서 동작하는 공진기, 필터 및 안테나 등과 같은 이동통신용 부품의 소재로 널리 사용되고 있으며, BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>계 벌크(bulk) 유전체 세라믹은 Orthorhombic(P<sub>mmn</sub>)의 결정구조를 가지며, 1MHz에서 40 ~ 45의 유전율 및 마이크로파 대역인 4GHz에서 유전율 38, 품질계수(Q×f) 140,000정도의 우수한 유전특성을 나타낸다.

그러나 지금까지의 연구는 주로 벌크 유전체에 국한되어 개발되었으며, 마이크로파 대역에서의 유전체 박막의 마이크로파 유전특성 측정의 어려움

으로 일부 조성의 경우, 유전체 박막을 RF sputtering 또는 MOD(metalorganic deposition)법으로 수십 MHz 대역의 저주파 유전 특성만 보고 되어있을 뿐이다.<sup>[4]</sup>

따라서 본 논문은 BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>계 유전체 박막을 Si 기판위에 RF Sputtering으로 성장시켜 유전체 박막의 두께 변화에 따른 마이크로파 대역에서 유전체 박막의 유전을 및 유전손실을 측정하였으며, 향후 새로운 구조의 고주파 유전체 박막 수동소자를 설계할 경우 기본 데이터로 사용하고자 하였다.

## 2. 실험

BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>계 유전체 박막은 직경 2" BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> 타겟을 제작한 후 RF magnetron sputter를 이용하여 성장하였다. RF magnetron sputter의 동작압력은 5mTorr, 증착온도는 550℃ 이었으며, 주입 가스비율은 80% Ar에 20% O<sub>2</sub>를 사용하였다. 증착시간을 변화시켜 성장시킨 유전체 박막의 두께는 각각 1800 Å, 3600 Å 및 5000 Å 이었으며, 상부전극의 후열처리 온도는 900℃로 고정하였다.

제작된 시편의 구조는 Si 기판위에 1000 Å SiO<sub>2</sub> buffer 층이 있으며, 그 위에 하부 전극으로 Pt를 사용하였고 단면도는 그림 1과 같다.

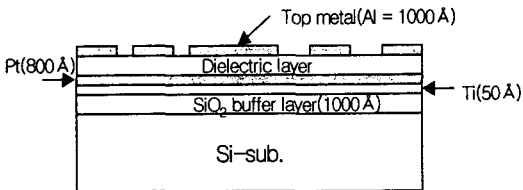


그림 1. 제작된 시편의 단면도

제작된 유전체 박막의 두께는 SEM 및 a-step을 이용하여 측정하였으며, 박막의 고주파 유전특성은 Be-Cu CPW(Coplanar-Waveguide) probe와 벡터네트워크 분석기(HP-8510C)를 사용하여 측정하였다. 마이크로파 대역에서 유전특성을 측정하기 위해 그림 2와 같이 Circular-patch capacitor 구조를 사용하였으며,<sup>[5]</sup> 실제 측정에 사용한 CPW probe의 사진은 그림 3에 나타내었다.

상부 전극은 약 1μm 두께로 알루미늄(Al)을 증착하였으며 그림 4와 같은 ring 구조를 가지기 위해 마스크를 이용해 photo-lithography 공정을 수

행하여 제작하였다.

제작된 박막의 복소 반사계수(Γ)는 one-port 측정 기법을 사용하여 아래 식과 같이 임피던스(Z<sub>DUT</sub>)로 변환하였다.<sup>[5]</sup>

$$Z_{DUT} \equiv Z_0 \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \dots\dots(1)$$

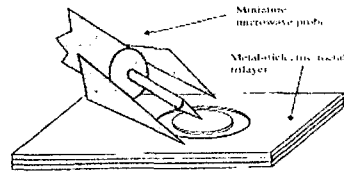


그림 2. 측정용 Circular-patch capacitor 구조

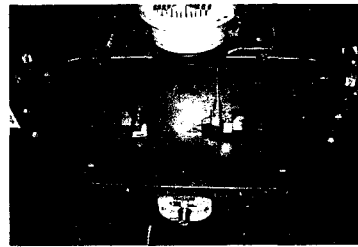


그림 3. CPW probe의 사진

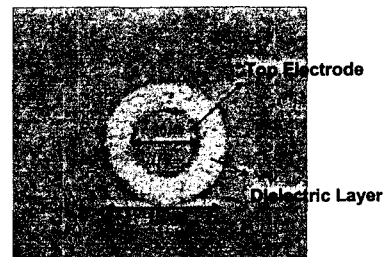


그림 4. photo-lithography 공정 후의 상부전극

여기서 Z<sub>0</sub>는 전송선의 특성 임피던스로 일반적으로 50Ω의 임피던스 값을 가진다. 제작된 유전체 박막의 유전을 및 유전손실은 Z<sub>DUT</sub>과 증착된 박막의 두께(t) 및 상부 전극의 면적을 이용하여 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

마이크로파 대역에서 박막의 유전율을 측정하기 위해서는 동일한 외경(150μm) 크기를 가지고, 각각

크기가 다른 내경( $a_1=50\mu\text{m}$ ,  $a_2=80\mu\text{m}$ )을 가지는 두 개의 링 모양의 테스트 구조의 임피던스를 벡터 네트워 분석기를 통해 측정하여 바깥 접지의 효과를 제거하기 위해 각각 빼준다. 두개의 내경  $a_1$ 과  $a_2$ 로부터 임피던스의 차는 아래 (2)식을 통해 구할 수 있다.<sup>[6]</sup>

$$Z_{DUT} = Z_1 - Z_2 = \frac{R_s}{2\pi} \ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right) + \frac{t}{i\omega\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left(\frac{1}{a_1^2} - \frac{1}{a_2^2}\right) \dots\dots\dots(2)$$

여기서  $Z_{DUT}$ 은 테스트 구조의 측정된 임피던스이며, 복소 반사계수(= $S_{11}$ )로부터 변환되어 계산되어 진다. 실제 벡터 네트워 분석기를 통해 측정된 복소 반사계수와 위상결과를 그림 5에 나타내었다.

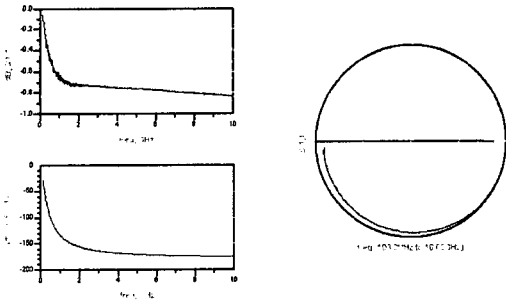


그림 5. 측정된  $S_{11}$  데이터

식 (2)에서  $R_s$ 는 하부 전극(Pt)의 sheet resistance로 본 실험에서는 4-point probe로 측정된 결과,  $4\Omega$ 의 값을 가진다.  $\epsilon_0$ 는 자유공간의 유전율로  $8.854 \times 10^{-12}$  [F/m]이며,  $t$ 는 박막의 두께 ( $1800\text{ \AA} \sim 5000\text{ \AA}$ )이고,  $\omega$ 는 각 주파수( $=2\pi f$ )를 나타낸다.

그림 6은 측정 주파수가 2GHz ~ 6GHz인 마이크로파 대역에서 측정된  $\text{BaTi}_4\text{O}_9$  박막의 유전율을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 박막 두께의 변화에 상관없이 측정 주파수 대역에서 일정한 유전율 값을 나타냄을 알 수 있으며, 박막의 두께가 증가함에 따라 35에서 38로 약간 증가함을 알 수 있다. 이 측정값은  $\text{BaTi}_4\text{O}_9$ 계 벌크 유전체를 4GHz에서 측정한 유전율 값인 38과 매우 근사

한 결과를 얻을 수 있어 본 논문에서 보고한 유전율 측정방법의 유효성을 알 수 있다.

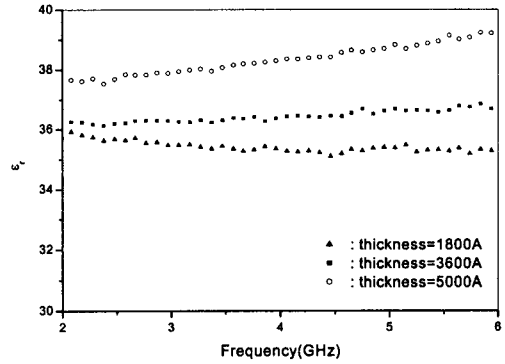


그림 6. 유전체 박막 두께에 따른 유전율

일반적으로 유전체 박막의 유전손실 값은 두개의 내경  $a_1$ 과  $a_2$ 로부터 얻은 임피던스의 차에서부터 실수부와 허수부의 비율을 통해 구할 수 있다. 그림 7에서 보는 바와 같이 주파수가 증가함에 따라 유전손실 값은 증가하는 것을 알 수 있으며, 그 이유는 상부 및 하부의 전극에 의한 저항성분과 CPW probe와 상부 전극사이의 접촉 저항에 기인하는 추가적인 직렬 저항( $R_s$ ) 때문인 것으로 보고되고 있다.<sup>[7]</sup>

전계 계산에 의해 하부 전극의 영향이 제거되는데 반해 접촉 저항의 영향은 계속 존재하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 접촉 저항을 포함하는 추가적인 저항에 대해 병렬 캐패시터/저항회로와 직렬저항으로 구성된 등가회로를 새롭게 고안하였다. 이와 같은 등가회로에 대한 임피던스의 표현 식은 아래 식 (3)과 같다.

$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + i\omega CR_p} = R_s + \frac{R_p - i\omega CR_p^2}{1 + \omega^2 C^2 R_p^2} \cong R_s + \frac{R_p - i\omega CR_p^2}{\omega^2 C^2 R_p^2} = R_s + R_p(\tan\delta)^2 - i\frac{1}{\omega C} \dots\dots\dots(3)$$

위 식에서  $C$ 와  $R_p$ 는 유전체 박막의 진성(intrinsic) 정전용량과 저항이다. 또한  $R_p$ 는 수

GHz 범위 내에서 주파수의 역수에 비례한다고 가정한다. 따라서 임피던스의 실수부와 주파수의 역수의 값에서부터 절편을 구하여 직렬 저항 ( $R_s$ )을 구할 수 있다.

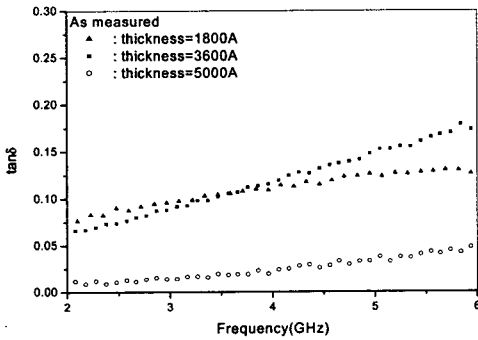


그림 7. 유전체 박막 두께에 따른 유전손실

절편(intercept)은 식 (3)을 사용하여 측정된 값의 최소 제곱법(least-square fitting)으로부터 결정되어지며 그 결과를 그림 8에 나타내었다.

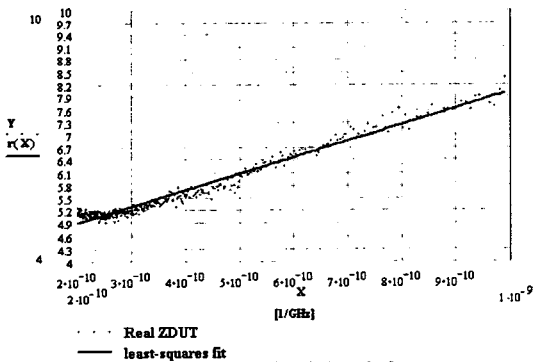


그림 8. 최소제곱법으로부터 얻은 절편

여기에서 얻어진 절편 값이 곧 직렬저항 값이며, 보정 전 계산된 유전손실 값에서 이 직렬저항 값을 뺀 것이 보정된 유전손실 값이 된다. 이 결과를 그림 9에 나타내었다.

그림 9에서 보는 바와 같이 CPW probe와 내경 및 외경 상부 전극사이의 접촉 저항의 영향을 제거하여 보정된 유전손실의 값은 주파수 2GHz ~ 6GHz 대역에서 유전체 박막의 두께가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있고 박막의 두께가 1800 Å인 경우 0.015 ~ 0.045, 3600 Å인 경우 0.002 ~

0.008 및 5000 Å인 경우 0.0001 ~ 0.005의 값을 가짐을 알 수 있고 일정한 두께 이상의 유전체 박막이 형성되어야만 양호한 유전손실 값을 가질 수 있음을 알 수 있었다.

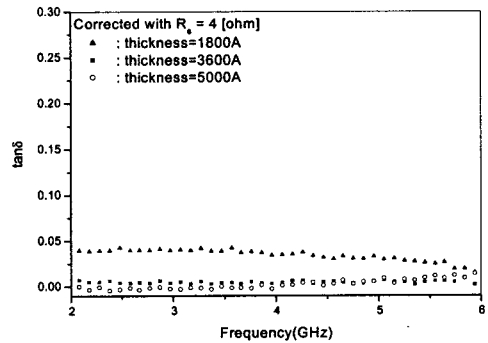


그림 9. 보정된 유전손실 값

#### 4. 결론

RF sputtering 방법으로  $BaTi_4O_9$  박막을 성장하였고 마이크로파 대역에서 유전체 박막의 유전특성을 측정하였다. 유전체 박막의 두께를 1800 Å에서 5000 Å으로 증가시킬 때 유전율의 변화는 크게 변하지 않았고, 벌크 특성과 비슷한 38의 유전율 값을 얻을 수 있었다. probe와 상부 전극사이의 접촉 저항을 고려한 값들을 보정함으로써 6GHz의 주파수 대역까지  $BaTi_4O_9$  박막의 유전손실 값을 안정적으로 측정할 수 있었으며 유전체 박막의 두께가 증가함에 따라 최대 0.0001의 양호한 유전손실 값을 얻을 수 있었다. 또한 향후 RF sputtering의 증착 온도에 따른 유전율과 유전손실의 변화 및 공진주파수의 온도계수를 측정하여 새로운 구조를 가지는 유전체 박막을 이용한 고주파 수동소자를 설계하는데 중요한 유전물성의 데이터를 제공하고자 한다.

#### 참고 문헌

- [1] R. Jammy and L. A. Wills., Integrat. Ferroelectr., Vol. 15, p. 235, 1997.
- [2] F. De Flaviis, N. G. Alexopoulos and O. M. Stafsudd, IEEE Trans. Microwave Theory and Technology, Vol. 45, p. 963, 1997.

- [3] D. E. Oates and A. C. Anderson, IEEE Trans. Magn., Vol. 28, p. 867, 1991.
- [4] P. C. Joshi and S. B. Desu, "Properties of  $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$  thin films prepared by metal organic solution deposition technique for microwave applications", Appl. Phys. Lett., Vol. 73, No. 8, p. 1080, 1998.
- [5] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", John Willy & Sons, New York, p. 8, 1998.
- [6] Z. Ma, A. J. Becker et al, "RF measurement technique for characterizing thin dielectric films", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 45, No. 8, p. 1811, 1998.
- [7] D. C. Dube, J. Baborowski, et al, "The effect of bottom electrode on the performance of thin film based capacitors in the gigahertz region", Appl. Phys. Lett. Vol. 74, No. 23, p. 3546, 1999.