

마이크로파대에서의 강유전 박막 유전 특성 평가

Characterization of Ferroelectric Thin Film in Microwave Region

박정흠^{1,a}

(Jeong-Heum Park^{1,a})

Abstract

In this study, ferroelectric (Ba,Sr)TiO₃ and high temperature superconductor YBCO thin films were fabricated by PLD (Pulsed Laser Deposition) method and tuneable bandstop filters were implemented with two different IDC(Interdigital Capacitance) gap patterns, 20μm and 30μm using these two thin film layers. The resonant frequency was changed by DC bias voltage. By comparing measured results with simulation, the dielectric properties of ferroelectric thin film have been extracted. The permittivity was 820~900 at 30 K and had an acceptable error range but the loss tangent had a great difference, 0.018 in 30 μm IDC gap pattern and 0.037 in 20 μm.

Key Words : Interdigital capacitance, Characterization of ferroelectric thin film, Tuneable filter

1. 서 론

이동통신시장 및 위성통신시장의 지속적인 확대, 고속무선 LAN시대의 도래 등에 의해, 기존의 마이크로파 소자와는 다른 새로운 개념의, 고성능화, 소형화, 저전력화, 다기능화된 소자가 요구되고 있다. 이를 만족시키기 위해 다양한 물질들이 마이크로파 소자의 재료로 검토되어 왔고, 그 중 강유전 물질이 그 특성의 우수성으로 인해 최근 주목을 받고 있다. 강유전 물질은 자발분극이 존재하여 이 자발분극의 스위칭이 가능하고, 이로 인해서 인가전계가 제거되어도 잔류분극을 가지는 독특한 특성이 나타나게 된다. 특히, (BaSr)TiO₃ 나 (Pb,Zr) TiO₃와 같은 페로브스카이트형의 물질이 전자소자로의 응용에 적합한 특성을 가지므로 많은 연구가 있어왔다. 이러한 물질은 결정구조로 인

해 큰 유전율을 가지고, 또한 직류전계의 인가로 유전율을 변화시킬 수 있으므로, 전기적으로 특성을 조절할 수 있는 새로운 개념의 소자에 응용할 수 있다. 마이크로파 소자로의 응용을 위해서, 이러한 강유전 물질들은 박막형태로 제작되어 DC Bias변화에 따른 유전율의 변화를 이용한 Tuneable 필터[1], 안테나[2]나 Phase Shifter[3] 등으로의 응용이 연구되고 있다.

한편, 1986년 고온초전도체의 발견 이후, 새로운 고온초전도체 물질 개발에 따른 상전이 온도의 고온화와 냉각장치 기술의 발전에 따른 냉각기의 소형화, 저가격화 및 안정화의 확보는, 고온초전도체의 실용화를 여러 분야에서 가시화 시키고 있으며, 특히, 시장의 규모와 기존 기술의 한계를 감안할 때, 고온초전도 박막의 마이크로파 소자로의 적용이 가장 실용유망한 분야로 평가받고 있다[4].

본 연구에서는 응용의 폭이 넓은 강유전체를 박막화 시키고 이를 초전도 박막과 결합시켜서 종래의 재료를 이용한 소자로서는 구현할 수 없는 신개념, 고성능의 고주파 Tunable 소자를 구현하고 이를 이용하여 강유전 박막의 마이크로파대에서의 유전특성 평가 기법에 관해 연구하였다.

1. 김포대학 정보통신계열

(경기도 김포시 월곶면 포내리 산14-1)

a. Corresponding Author : jhpark@kimpo.ac.kr

접수일자 : 2004. 6. 28

1차 심사 : 2004. 8. 26

심사완료 : 2004. 9. 17

2. 실험 방법

2.1 강유전 및 초전도 박막의 제작

고품위의 강유전 박막 및 초전도 박막의 제작을 위하여 본 연구에서는 Pulsed Laser Ablation Deposition(PLD)법을 사용하였다.

Multi-Target Holder를 사용하여 강유전 박막의 형성 이후 연속적으로 초전도 박막을 형성할 수 있도록 하였다. 표 1에 증착 조건을 나타내었다.

0.5 mm (001) MgO 단결정 기판 위에, 400 nm의 (Sr,Ba)TiO₃의 강유전 박막을 형성하고 다시 300 nm의 고온초전도체 박막 YBa₂Cu₃O₇을 도포하였다. 소자 구현을 위해 YBCO박막을 Dry Etcher를 사용하여 패터닝하였다.

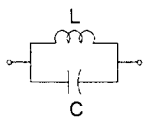
표 1. 박막형성 조건.

Table 1. Deposition parameter.

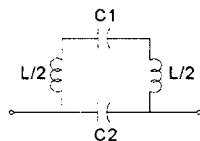
Parameter	(Ba _{0.5} Sr _{0.5})TiO ₃	YBa ₂ Cu ₃ O ₇
Laser Energy Density	1.5 J/cm ²	1.5 J/cm ²
Repetition Rate	5 Hz	5 Hz
Deposition Time	5000 Pulses	5000 Pulses
Oxygen Pressure	10 ⁻⁴ mbarr	0.3 Torr
Substrate Temperature	650 °C	750 °C
Oxygen flow	0.6 cscm	10 cscm
Substrate-Target Distance	5.5 cm	6.5 cm

2.2 Tunable bandstop filter 설계

그림 1(a)와 같은 병렬공진회로는 간단한 Bandstop filter로 동작한다. 이 회로는 capacitor에 DC bias를 인가하게 되면 inductor에 의해 단락이 되는 단점이 있다. DC Bias 인가가 가능한 회로를 고려하여, 그림 1(b)의 회로를 구성하였다.



(a) 단순 LC병렬공진회로



(b) DC bias 고려

그림 1. Bandstop filter 회로.

Fig. 1. Equivalent circuit of bandstop filter.

본 연구에서 사용된 0.5 mm MgO/강유전 BST 박막 기판 위에 그림 1(b)의 회로를 실제 구현시 설계된 패턴을 그림 2에 나타내었다.

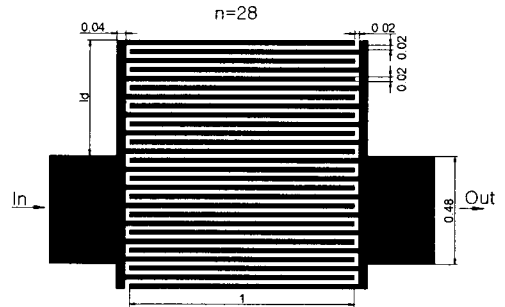
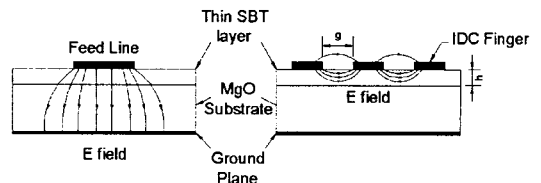


그림 2. Bandstop filter 구성을 위한 패턴(IDC gap=20 μm인 경우).

Fig. 2. The pattern for bandstop filter(IDC gap=20 μm).

MgO의 두께가 BST박막의 두께보다 상대적으로 훨씬 두꺼우므로, 그림 3(a)에서처럼 입,출력 전송선로에서 전계의 대부분은 MgO 내에 분포하게 되고, 이 때문에, 50 Ω 전송선로 구성 시, 유전율이 높은 BST 층을 배제하고, 유전율이 상대적으로 낮은 MgO 층만 고려할 수 있다. 이로부터 그림 2에서처럼 구현이 가능할 만큼 적당히 큰 폭(W=0.48 mm)을 가지는 전송선로를 구현할 수 있게 된다. 유전율이 높은 박막을 사용하는 것이 IDC(Interdigital Capacitance)의 구현에 있어서 더욱 효과적이다. 그림 3(b)에서처럼 BST박막의 높은 유전율에 의해 IDC Gap사이의 전계는 BST 박막에 집중하게 되고, 이에 따라 유전율이 낮은 MgO의 영향이 배제되므로 높은 캐패시턴스를 얻을 수 있다.



(a) Feed line

(b) Interdigital line

그림 3. 전계의 패턴 형상.

Fig. 3. Illustrations of E-field pattern.

그림 1(b) 등가회로에서의 L/2 인덕턴스 성분은, 그림 2의 패턴에서 l_d 에 분포한다. 이때의 인덕턴스는 집중소자로서의 short transmission line식에 의해 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$L[nH] = 2 \times 10^{-4} \left[\ln\left(\frac{l}{W+t}\right) + 1.193 + 0.2235 \frac{W+t}{l} \right] \cdot K_g$$

l [μm]은 선로길이로 l_d 에 해당하고, W 는 선폭 (=40 μm), t 는 선두께로 HTS박막의 두께에 해당하므로, 여기에서는 무시하였다. K_g 는 correction factor로 1로 가정하였다. 계산 결과, 0.94[nH]의 전체 인덕턴스를 가지는 것으로 계산되었다.

C_1, C_2 는 같은 값을 가지고, interdigital capacitor 표현으로 평가하면, 아래와 같다[5].

$$C = \frac{\epsilon_0}{2} (n-0.5)l + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1}}{2} (n-0.5)l + \frac{\epsilon_0 (\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1})(n-1)l}{0.882 + \frac{g}{h}}$$

여기서, n 은 overlap 개수이고, l 은 overlap의 길이, g 는 gap, h 는 기판의 두께에 해당한다.

분모의 0.882는 finger edges에서의 전계를, $z = (2h/\pi) \ln(\cos(\pi t/2))$ 로 하고 이를 conformal mapping을 사용함으로써 고려하여 계산한 값이다. MgO와 SBT의 유전율을 각각 9.8, 1000으로 고려했을 때, C_1 은 2.755[pF]로 계산된다.

이 L과 C로 구성된 그림 1(b)의 회로에서의 공진주파수는 아래 식으로 계산되는데,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2}} \quad (1)$$

위의 L, C값을 대입하여 계산하면, f_0 는 4.423 [GHz]로 된다. DC 바이어스의 인가에 의해 IDC 사이에 강한 전계가 형성이 되면, BST박막의 유전율이 변화하고, 이에 따라 C가 변화하므로, 공진주파수 f_0 의 변화를 초래한다. 이것을 이용하여 전기적인 튜닝이 가능한 공진기, 필터, 안테나, Phase Shifter 등을 구현할 수 있다.

본 논문에서는 IDC gap이 20 μm , 30 μm 인 두 가지 형태의 Bandstop Filter를 제작하여, IDC gap이 소자 특성에 미치는 영향을 평가하고, 유전특성 평가에 적합한 패턴을 모색하였다.

2.3 측정방법

구성된 필터의 마이크로파 특성측정을 위해서는 초전도체인 YBCO의 상전이 이하의 온도에서 측정이 필요하므로, 냉각기를 이용하여 30K이하로 냉각시킨 후 온도와 DC Bias를 변화시켜 측정하였다.

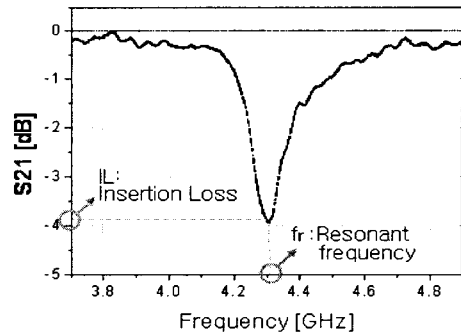


그림 4. S-parameter S21의 실제 측정 예.
Fig. 4. Example of S21 measurement.

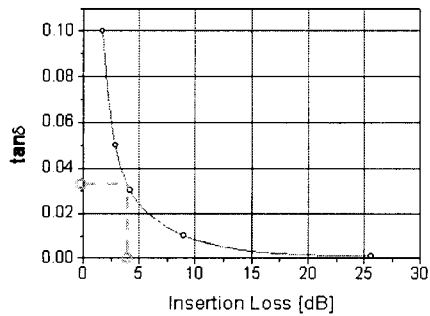
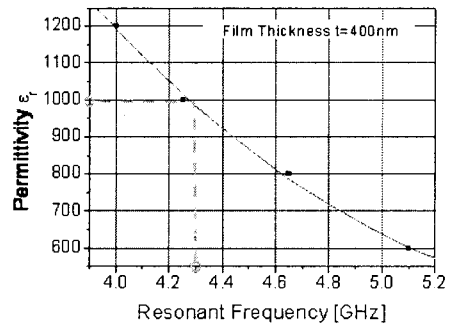


그림 5. 전자계 해석에 의한 소자 특성과 강유전 박막 특성과의 관계 (IDC gap = 20 μm).
Fig. 5. EM simulated resonant frequency against permittivity (IDC gap = 20 μm).

유전율의 변화가 캐패시턴스의 변화를 초래하고, 이로써, 공진주파수의 변화가 발생하는 것을 이용하면, 공진주파수를 측정하여 유전체 박막의 유전율을 유추할 수 있다. Bandstop Filter의 실제 측정 시 그림 4와 같은 결과가 나왔다면, 측정된 공진주

파수와 삽입손실로부터 유전율과 유전손실을 구할 수가 있는데, 이를 위해서는 그림 5와 같이 박막의 유전율과 공진주파수의 관계 그래프 및 삽입손실과 유전손실의 관계 그래프가 필요하고, 이는 sonnet 등과 같은 전자계 해석 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있다. 만약, 두께 400 nm인 BST 박막을 형성시켜, 그림 1(b)의 패턴으로 Bandstop Filter를 구성하여 공진주파수를 측정했을 때, 그림 4에서와 같이 4.31 GHz, 삽입손실이 3.9 dB였다면, 그림 5에 의해서 유전율은 1000, 유전손실은 0.031이 된다.

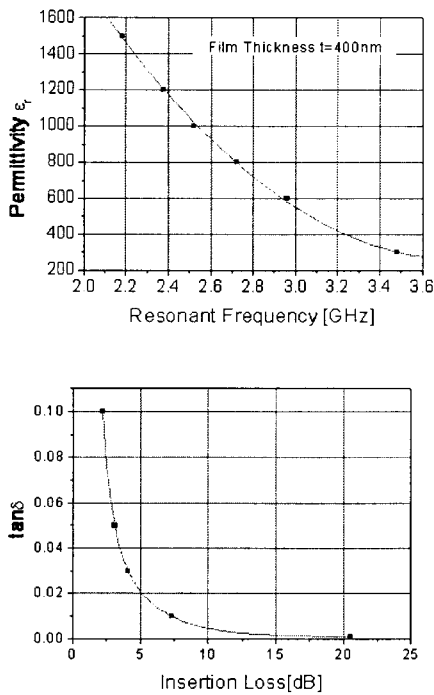


그림 6. 전자계 해석에 의한 소자 특성과 강유전 박막 특성과의 관계 (IDC gap=30 μm).
 Fig. 6. EM simulated resonant frequency against permittivity (IDC gap=30 μm).

그림 6에서는 IDC Gap=30 μm 인 경우의 공진주파수-유전율, 삽입손실-유전손실 관계를 나타내었다. 이와 같이 필터 특성을 측정하고, 이를 전자계 시뮬레이션 결과와 비교하여, 내삽법에 의해 마이크로파대에서의 강유전 박막의 유전특성을 평가할 수 있다.

3. 결과

그림 7에서 IDC Gap=20 μm 인 경우의, 온도변화와 DC bias 변화에 따른 필터의 S21 변화를 나타내었다. 온도가 증가하면서 공진주파수가 증가하는데, 이는 강유전박막이 Curie-Weiss법칙을 따르므로 온도증가에 따라 유전율이 감소하기 때문이다[6]. 또한, DC Bias가 증가하면서 역시 공진주파수가 증가하는데, 이는 전계 인가에 따라 강유전성의 근원인 Phonon 모드가 경화됨에 의해 유전율이 감소하기 때문으로 볼 수 있다[7]. 소자의 삽입손실은 온도가 증가하면서 증가되는데, 이는 상전이 온도 아래에서의 초전도체의 열화라기보다는 열적 활성도가 높아짐에 따른 강유전 박막에서의 격자의 열진동에 의해 B-site이온 변위시 에너지 손실이 생기는 것으로 해석된다. DC Bias가 증가하면서 삽입손실이 줄어드는 것은 도메인이 한쪽 방향으로 배열되면서 c-axis으로의 길이가 늘어나고, 이로 인해 B-site이온의 변위가 상대적으로 용이하게 되면서, 에너지의 손실이 줄어든 것으로 사료된다.

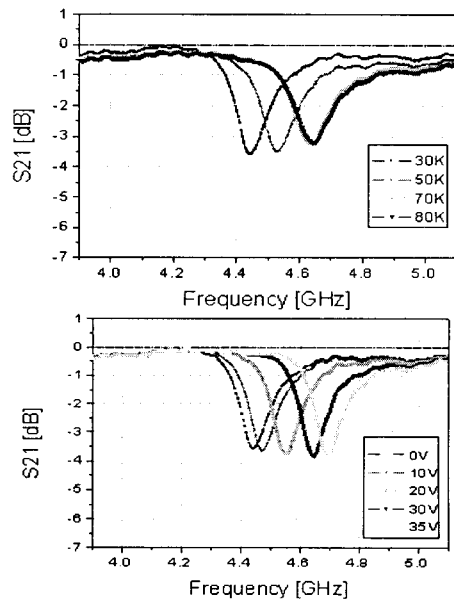


그림 7. 온도변화와 DC bias 변화에 따른 필터 특성 변화 (IDC Gap=20 μm).
 Fig. 7. Frequency response of filter with different temperature and bias voltage (IDC Gap=20 μm).

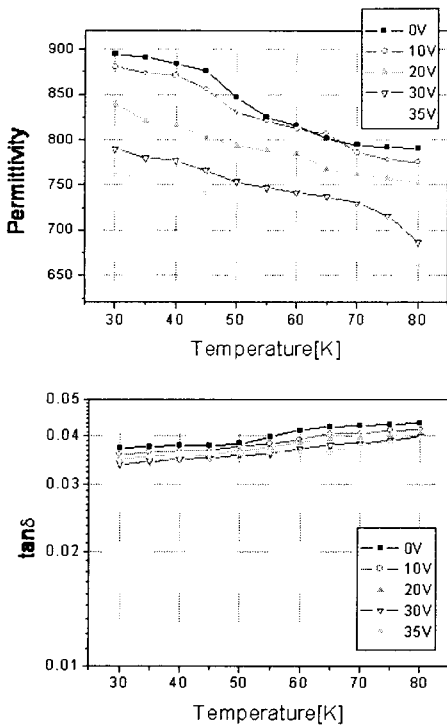


그림 8. 온도변화와 DC bias 변화에 따른 BST박막의 유전 특성 변화 (IDC Gap=20 μm).
 Fig. 8. Dielectric characteristics of BST thin film with different temperature and bias voltage (IDC Gap=20 μm).

그림 8에는 앞서 기술한 유전특성추출 방법에 의해 IDC Gap=20 μm 필터의 BST박막의 유전특성을 나타냈다. 30 K, 0V Bias에서 900정도의 높은 유전율을 가지며, 유전손실은 0.037정도로 실제 응용에 적용하기에는 너무 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 이 패턴에서의 높은 유전손실은 강유전 박막의 유전손실이 큰 것이라기보다는 초전도 전 극의 패턴형성의 정밀도가 떨어진 것에 기인한 것으로 보인다.

그림 9에서는 IDC Gap=30 μm 인 필터의 온도 변화와 DC bias 변화에 따른 특성변화를 나타내었다. 변화양상은 IDC Gap=20 μm 인 필터와 같은 경향을 보인다. 그러나 인가전계에 따른 공진주파수의 변화가 IDC Gap=20 μm 필터보다는 작으며, 이는 박막의 유전율 변화가 작기 때문이다. 그림 10에서 IDC Gap=30 μm 인 경우의 온도와 DC bias 변화에 따른 박막의 유전특성 변화를 나타냈는데,

인가전계에 따른 유전율의 변화가 상대적으로 작은 이유는, 패턴의 IDC gap이 작을수록, 캐패시턴스가 커지게 되고, 이로써 공진주파수에 미치는 캐패시턴스의 영향이 커짐에 기인한다. 인가전계에 따른 유전손실의 변화폭도 작는데, IDC에 분포하는 캐패시턴스가 상대적으로 작은 관계로 전술한 도메인과 결정구조의 배열효과가 작은 때문으로 생각된다. 따라서, 전극패턴 형성 시에 선로의 형상을 더욱 정밀하게 하여 에칭을 행한다면, 실제 응용이 가능한 수준의 삼입손실을 가지는 필터를 제작할 수 있을 것이고, 이를 통해 더욱 정확한 강유전 박막만의 유전손실을 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 그림 10에서 나타난 유전손실은 30 K 부근에서는 0.02이하의 낮은 값을 보이므로, 실제 응용으로 사용가능한 수준이다. 두 개의 서로 다른 패턴을 사용하여 유전특성 평가 결과, 유전율이 약 10 % 이내의 오차를 가지므로 적절한 평가방법이라고 할 수 있으나, 유전손실의 경우는 전술한 이유로 해서, 비교적 큰 오차를 가지므로, 정확한 평가를 위해서 전극패턴의 정밀도를 높이는 것이 요구된다.

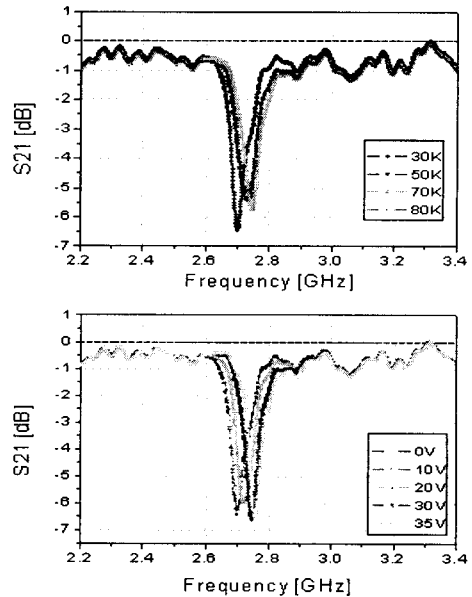


그림 9. 온도변화와 DC bias 변화에 따른 필터 특성 변화 (IDC Gap=30 μm).
 Fig. 9. Frequency response of filter with different temperature and bias voltage (IDC Gap=30 μm).

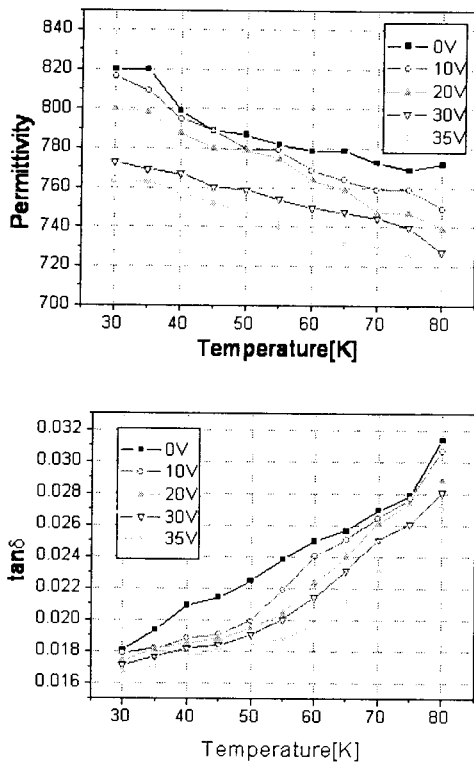


그림 10. 온도변화와 DC bias 변화에 따른 강유전 박막의 유전 특성 변화(IDC Gap=30 μm).
 Fig. 10. Dielectric characteristics of BST thin film with different temperature and bias voltage (IDC Gap=30 μm).

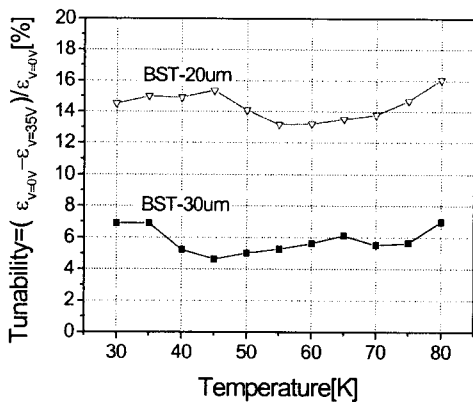


그림 11. 온도와 IDC Gap에 따른 소자 Tunability.
 Fig. 11. Tunability with temperature and IDC gap.

그림 11에서는 Tunable 소자의 성능평가 항목 중 하나인 Tunability를 나타내었다. IDC gap이 20 μm 인 경우, 30 μm 보다 Tunability가 높게 나타났는데, 이는 Gap이 작을수록 IDC의 캐패시턴스 변화가 커지기 때문이다.

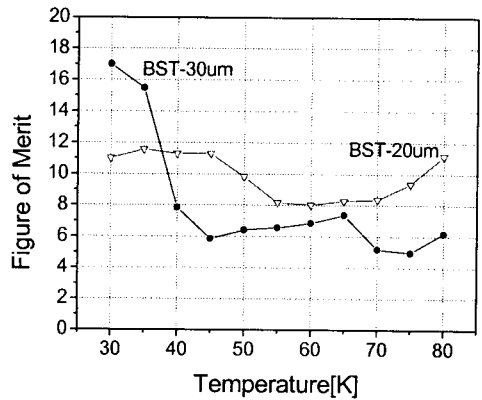


그림 12. 온도와 IDC Gap에 따른 Figure of Merit.
 Fig. 12. Figure of Merit with temperature and IDC gap.

그림 12에서는 Tunable 소자의 삽입손실과 공진주파수의 변화의 비로써 성능을 평가하는 Figure of Merit을 나타냈다[8].

$$Figure\ of\ Merit = \frac{(n-1)^2}{n \cdot \tan \delta(E_{min}) \cdot \tan \delta(E_{max})}$$

여기서, $n = \frac{\epsilon(E_{min})}{\epsilon(E_{max})}$

30-40 K에서 IDC Gap 30 μm 에서 상대적으로 높은 Figure of Merit가 나타나는데, 이는, 이 패턴의 소자에서의 삽입손실이 작은 때문이다. 실제적인 응용을 위해서 Figure of Merit은 1000 이상의 값을 가져야 하는 것으로 알려져 있으므로[8], 이를 위해서는 우선적으로 삽입손실을 줄이는 것이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 강유전 박막과 초전도 박막을 이용하여 Tuneable 필터를 제작하고 소자 특성을 측정하여, 이로써 강유전 박막의 마이크로파대 유전

특성을 평가하였다. 두 개의 서로 다른 필터 패턴을 이용하여 유전특성을 평가한 결과, 유전율은 820-900정도의 값으로 10 %정도의 오차를 가지는 것으로 평가되었고, 유전손실은 IDC Gap 30 μm 인 필터에서 0.018, 20 μm 인 필터에서 0.037로 많은 차이를 보였다. 이후 IDC 전극인 YBCO 박막을 더욱 정밀하게 패터닝하여 소자의 삽입손실을 개선한다면, 더욱 정확한 유전손실의 평가가 가능할 것이고, 나아가 IDC Gap을 20 μm 이하로 감소시킨 필터를 제작한다면, 실제 응용 가능한 특성을 가지는 Tuneable 필터의 제작이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연구지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] G. Subramanyam, F. V. Keuls, and F. A. Miranda, "A novel K-band tunable microstrip bandpass filter using a thin film HTS/ferroelectric/ dielectric multilayer configuration", IEEE MTT-S Dig., p. 1011, 1988.
- [2] K. A. Jose, V. K. Varadan, and V. V. Varadan, "Experimental investigations on electronically tunable microstrip antennas", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 20, No. 3, 1999.
- [3] Y. Lin, Amit S. Nagra, Erich G. Erker, Padmini Periaswamy, Troy R. Taylor, James Speck and Robert A. York, "BaSrTiO₃ Interdigitated capacitors or distributed phase shifter applications", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 10, No. 11, 2000.
- [4] M. J. Lancaster, "Passive microwave device applications of high temperature superconductors", Cambridge University Press, Cambridge, England, 1997.
- [5] F. Huang, B. Avenhaus, and M. J. Lancaster, "Lumped element switchable superconducting filters", Proc. Inst. Elect. Eng., Vol. 148, p. 229, 1999.
- [6] C. Basceri, S. K. Streiffer, A. I. Kingon, and R. Waser, "The Dielectric Response as a Function of Temperature and Film Thickness of Fiber-Textured (Ba,Sr)TiO₃ Thin Films Grown by Chemical Vapor Deposition", Journal of Applied Physics Vol. 82, p. 2497, 1997.
- [7] S. K. Streiffer, "Single-crystal ferroelectrics : fundamental physical and electronic properties," p. 52, 2003.
- [8] O. G. Vendik, I. B. Vendik, and V. O. Sherman, "Properties of Tuneable filter with ferroelectric capacitors", Integrated Ferroelectrics, Vol. 43, p. 91, 2002.

