

고온초전도 다층박막의 성장과 마이크로파 필터의 개발

강광용*, 김철수*, 객민환*
*한국전자통신연구원 반도체·원천기술연구소

Growth of high- T_c Superconducting Multilayer thin films and Fabrication of Microwave Filter

Kwang-Yong Kang*, Chul-Soo Kim*, Min Hwan Kwak*
*Semiconductor & Basic Research Institute, ETRI

kykang@etri.re.kr

Abstract-For microwave device applications, *c*-axis oriented high temperature superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (HTS-YBCO) epitaxial thin films on the *r*-cut sapphire substrate (Al_2O_3) were prepared. In order to reduce the lattice mismatch with a substrate and to enhance the crystallinity of HTS thin films, CeO_2 buffer layer on the *r*-cut sapphire substrate was grown by the RF-magnetron sputtering. The YBCO films on the CeO_2 buffer layer were deposited using the pulsed-laser deposition (PLD) method. These HTS YBCO / $\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ multilayer thin films ($30 \times 30 \text{ mm}^2$) routinely exhibited a critical temperature (T_c) of 89 K from the R-T measurement. Using HTS YBCO / $\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ multilayer thin film, we fabricated and characterized the microwave passive devices (planar type filters) with cryopack-age such as the coupled-line type low-pass filter (LPF) and the open-loop meander type bandpass filter (BPF).

1. 서 론

마이크로파 필터에 있어서 평탄한 통과 대역 특성을 얻고, 대역외(out of band) 불요파 신호의 억압(compression) 특성을 마이크로스트립 선로로서 실현하는 경우, 다수의 고주파 공진기(resonator)를 결합한 특성 설계에 의해 공진기도체손실의 영향이 크게 된다. 이 경우 냉각해도 필요한 양호도는 얻어지지 않고, 대역내에서의 억제요소가 더 크게 변화해서 양호한 평탄특성이 얻어지지 않는다. 그 때문에 높은 양호도를 갖는 3차원 구조의 세라믹 유전체 공진기가 주로 사용된다. 최근 다성분 산화물 박막제조 기술과 성장장비의 발달로 낮은 표면저항과 높은 임계전류를 갖는 고온초전도(다층) 박막이 가능하며, 이를 이용하여 소형·단순하고, 큰 설계 자유도를 가지며 다양한 마이크로파 시스템에 대한 적응성도 뛰어난 평면형 집적소자가 가능하다

[1-3].

고온초전도 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 박막을 성장할 경우, 가공된 기판을 그대로 사용하는 경우와 기판소재의 단점을 보완하기 위해서 완충층을 이용하는 두 가지 경우가 있는데, *r*-면 사파이어 기판 위에 SrTiO_3 나 CeO_2 를 완충층으로 사용하여 YBCO 박막을 제조하는 연구가 많이 진행되고 있다. 특히, *r*-면 사파이어 기판은 유전율이 작고, 유전손실($\tan\delta$)도 작으며, 기계적 강도가 매우 우수하고 열전도도가 양호하기 때문에 저온에서 동작하는 고온초전도 고주파 소자의 기판으로 많은 장점을 가지고 있다. 또한, 가격도 다른 단결정 기판에 비해 저렴한 편이다.

한편, 완충층과 YBCO 박막을 레이저를 이용하여 증착하면 *in-situ*로 두 종류의 박막을 쉽게 성장할 수 있는 장점은 있으나, 완충층을 펄스레이저 증착으로 할 경우 레이저의 강한 파워에 의해서 드롭렛(droplet)이 생기게 되는데 이 때문에 깨끗한(mirror-like) 완충층 표면을 얻기가 힘들다. 그러나 RF-스퍼터링 경우 분위기 가스의 양과 타깃과 기판사이의 거리, RF 파워 등을 잘 조절하여 표면 거칠기가 양호한 박막을 얻기가 용이하기 때문에, 본고에서는 *in-situ* 레이저 증착법 대신에 RF-스퍼터링을 이용하여 완충층을 증착하고 펄스-레이저를 이용하여 YBCO 박막을 증착하였다[4-6]. 그리고 성장한 HTS 에피박막을 사용하여 저지대역의 불요파를 제거하기 위한 새로운 구조의 저역통과 필터와 공진기간의 결합(coupling)에 역점을 둔 IMT-2000 기지국용 대역통과 필터를 개발하였다.

2. YBCO/ $\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 다층박막의 성장과 분석

r-면 사파이어 기판을 잘 세정한 후, 양호한 열전도를 위해 은-접착제를 이용하여 히터 표면에 부착하고 RF 마그네트론 스퍼터의 성장챔버에 장착하였다. 히터(heater)는 산소 분위기에서 950°C 까지 사용이 가능한 US Inc.社의 3-인치 히터를 사용하였다. 먼저, 4×10^{-6} Torr의 기본 압력에서 챔버내에 산소와 아르곤 혼합가스를

O₂/Ar=1:1.2 비율로 주입하여 15mTorr로 증착압력을 맞추었다. 타겟과 기판사이의 거리는 9cm로 하였으며, RF 파워는 50 W로 하였다. 이때 사용한 타겟은 Cerac사의 3-인치 CeO₂(99.9 %) 타겟이었다. 한편, 기판온도에 따른 CeO₂ 박막의 결정성을 조사하기 위하여 기판온도를 450 ~ 850°C로 변화시켰으며, 1 nm/min의 증착속도로써 45분간 증착하였다. 이어서 CeO₂ 완충층 위에 KrF 엑시머 레이저(λ =248 nm, Lambda Physik사의 COMPex 205)를 사용하여 YBCO 에피박막을 성장하였다. 이때 사용한 레이저 파워는 300 mJ, 펄스 속도는 5 Hz이었다. 성장챔버 내의 기판압력은 5×10^{-6} Torr로, 증착시 압력(O₂)은 170 m Torr로, 기판온도는 760°C로 그리고 타겟과 기판사이의 거리는 7cm로 정하였다. 타겟은 Cerac사의 1-인치급 YBCO 타겟을 사용하고, 0.153 nm/shot 증착속도로 10분간 5 Hz의 펄스 반복률로 박막을 증착하였으며 증착 후, 470°C 및 500mTorr(산소 분위기)에서 30분간 *in-situ*로 열처리 한 후, 상온까지 자연냉각하였다. 그리고 증착온도에 따른 완충층 CeO₂박막의 결정성을 분석하기 위하여 XRD 분석을 하였다. <그림 1>에 보는 바와 같이, 기판온도 650 °C까지는 주로 CeO₂ (111)피크가 생겨나고, 750°C 부터는 (111) 피크는 없어지고 대신 (200) 피크가 생성되기 시작한다. (100) 방향으로 성장된 CeO₂ 완충층의 경우, YBCO와의 격자상수 차이가 0.7% 정도로 매우 작았기 때문에, *c*-축 성장된 양질의 YBCO 박막을 얻을 수 있다.

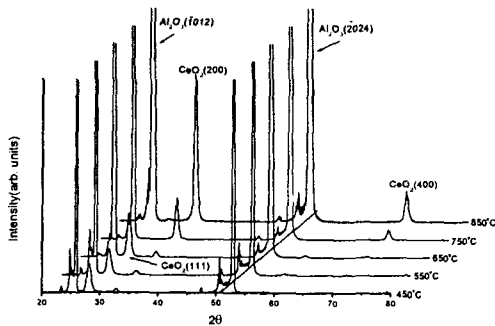
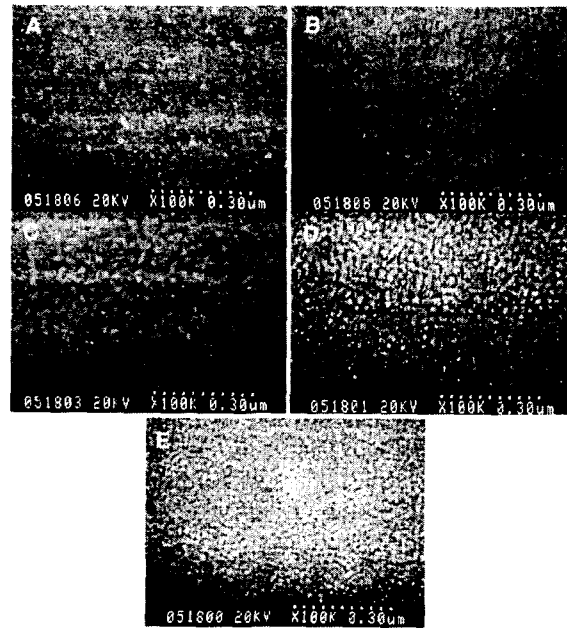


Fig. 1. XRD patterns of CeO₂ thin films as a function of deposition temperature

이상의 결과로부터, CeO₂ 완충층을 사용하여 양질의 YBCO 박막을 성장하기 위해서는 박막 증착시 기판온도를 750°C 이상으로 해야 함을 알 수 있다. 한편, 온도에 따른 CeO₂ 박막의 SEM 표면사진을 <그림 2>에 나타냈다. 증착온도 450°C에서 650°C까지의 표면사진은 표면의 결정립 (grain) 형성이 불완전함을 알 수 있고, 750°C와 850°C에서 성장된 CeO₂ 박막의 표면은 결정립이

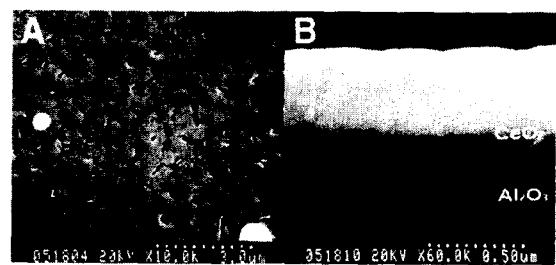
균일함을 알 수 있다. 이는 (200) 방향성만 보여



(A: 450°C, B: 550°C, C: 650°C, D: 750°C, E: 850°C)

Fig. 2. SEM micrograph of CeO₂ thin films as a function of deposition temperature.

완충층에 펄스-레이저를 이용하여 YBCO 박막을 증착하였다. SEM단면 촬영을 통해서 <그림 3>에서 보는 바와 같이 매우 양호한 초전도 YBCO 박막을 얻었으며, 관측된 박막의 두께는 460 nm였다.



(A: surface, B: cross section)

Fig. 3. SEM micrograph of YBCO/CeO₂ thin films(@ 850 °C)

주는 XRD 결과와 잘 일치한다. 그리고 성장된 CeO₂ 완충층을 이용하여 증착된 YBCO 박막의 전기적 특성 결과는 <그림 4>에 나타내었다. 측정결과로부터 알 수 있듯이 XRD 패턴에서 CeO₂ (111)피크를 보여주지 않는 그리고 750°C에서 성장된 YBCO/CeO₂ 박막의 임계온도가 89.1 K로 가장 높게 나타났고, (111)면과 (200) 면이 공존하며, 650°C 이하에서 증착된 YBCO/CeO₂ 박막

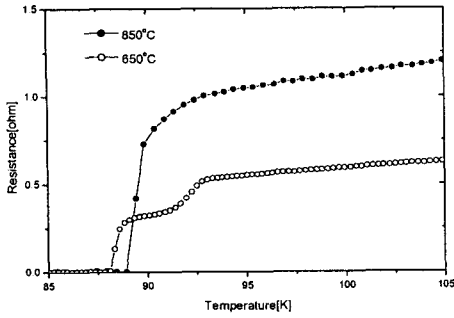


Fig. 4. R-T curve of YBCO/CeO₂ thin films(grown @ 650 °C and @ 850 °C).

의 경우는 대체적으로 낮은 임계온도를 보여주었을 뿐만 아니라, 두가지 상(phase)에 의한 효과적인 계단형 저항-온도 곡선을 나타내었다.

3. 고온초전도 다층박막형 수동소자의 제작과 특성평가

사파이어(Al₂O₃)는 아주 작은 유전손실과 극저온에서 MgO보다 뛰어난 열전도도를 보유하기 때문에 YBCO/CeO₂/Al₂O₃ 형태의 에피 대면적 다층박막을 성장할 수 있다. 이러한 박막을 이용하여 고온초전도 고주파 소자 개발할 경우, 많은 장점을 보여준다.

본 고에서는 초고주파 대역에서 잘 작동하고 설계된 값에도 잘 대응하는 분포소자형(distributed element) 마이크로스트립선 구조의 저역통과 필터와 대역통과 필터의 개발 결과를 보여주하고자 한다[7-8].

먼저, 저역통과 필터(lowpass filter : LPF)의 경우 저지대역이 좁기 때문에 넓은 주파수 영역에서 뛰어난 저지대역을 갖는 새로운 구조의 저역통과 필터가 요구되고 있다. 따라서 구현이 용이하고 넓은 저지대역 특성을 얻기 위해서 마이크로스트립 구조를 가지며 결합선로(coupled-line) 방식으로 설계한 고온초전도 평면형 11-극 LPF는 에피성장된 YBCO/CeO₂/Al₂O₃ 다층박막 이용하여 제작하였다. 이때 기판의 크기는 30×30×0.5mm³이고 r-면 사파이어 기판 위에 증착한 CeO₂ 완충층의 두께는 80 nm이었다. <그림 5> (a)와 (b)에 선택한 11-극 LPF의 회로패턴과 제작된 실물사진을 실었으며,

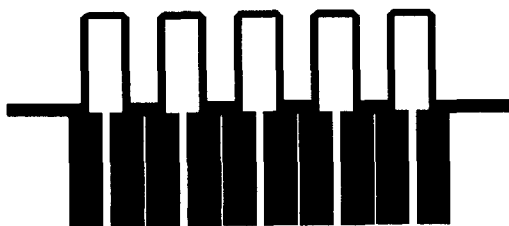


Fig. 5(a). Circuit pattern of 11-pole coupled-line type lowpass filter.

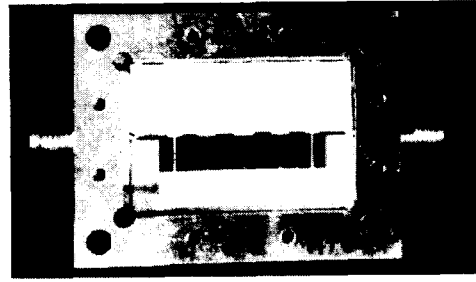


Fig. 5(b). photograph of fabricated LPF

<그림 6>에는 측정된 결과들을 나타내었다. 전산모사 결과와 실제로 제작한 고온초전도 저역통과 필터의 측정결과를 비교하였는데, 저지대역(1.2~9.6GHz)에서는 뛰어난 저역통과 특성을 보여주었다(차단주파수의 8배).

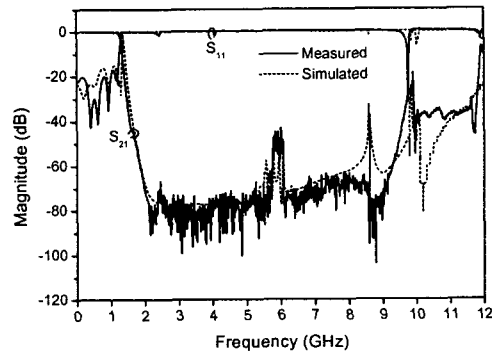


Fig. 6. Measured results and simulated results of 11-pole HTS lowpass filter

한편, 고주파 대역통과 필터의 응답은 설계된 필터에서 서로 근접하지 않은 공진기 사이의 교차결합(cross-coupling)에 의해서 나타난다[8]. 이러한 교차결합은 필터의 입력포트에서 출력포트까지 신호가 전달될 때 여러가지 경로를 통해서 신호를 전달한다. 이러한 다중경로 효과를 고려하면 저지대역에 감쇠 극을 나타내어 선택도를 높일 수 있고, 군지연(group delay) 평탄화와 같은 효과를 얻을 수 있다. 따라서 이를 이용한 설계방법은 작은 삽입손실을 가진 도파관 필터, 유전체 공진기 필터 등에서 사용되어 왔으나, 소자의 크기, 무게 및 가격 등에서 유리한 평면형 필터에도 적용하려는 시도가 많았다[9]. 일반적으로 평면형 필터는 손실이 크다는 것이 단점이지만, 매우 낮은 표면저항을 갖는 고온초전도 박막을 이용하면 이러한 단점을 보완할 수 있다.

<그림 7>에는 교차결합 개방루프 미로형(open-loop meander type) 공진기를 배열한 그리고 Hong 등[1]과 Levy [9]의 설계기법을 기반으로 한, 평면형 6-극 대역통과 필터의 구조를 나타내었으며, <그림 8>에는 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 결과는 1.927GHz의 중심

주파수를 가지며, 고차결합에 의한 너치로 스퀘어 특성이 우수함을 보여준다.

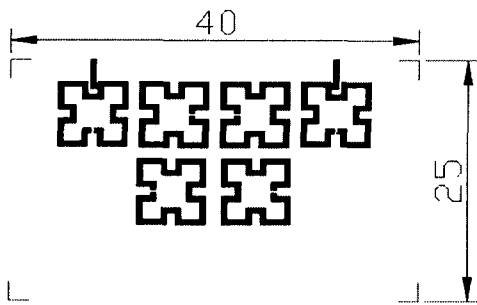


Fig. 7. Structure of open loop meander type 6-pole band pass filter.

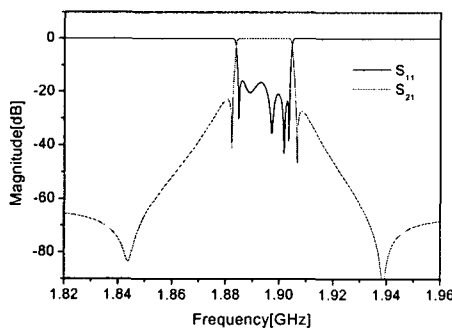


Fig. 8. The EM-simulation results of the HTS 6-pole bandpass filter.

4. 결 론

고온초전도 마이크로파 필터 제작에 이용할 수 있는 양질의 YBCO/CeO₂/Al₂O₃ 형태의 고온초전도 다층박막을 RF-스퍼터링법과 펄스-레이저 증착법을 이용하여 성장하였다. CeO₂ (100) 면만이 존재하는 750 °C 이상의 온도에서 증착시킨 양질의 완충층을 이용한 YBCO 다층박막의 경우에 89.1 K의 높은 임계온도를 가지며, 계면(interface)도 예리한 양질의 에피박막임을 확인하였다.

유전손실도 적고, 열전도 특성도 우수한 고온초전도 YBCO/CeO₂/Al₂O₃ 형태의 다층 박막을 이용하여, 넓은 주파수 영역에서 뛰어난 저지대역을 갖는 결합선로(coupled-line) 방식 평면형 11-극 저역통과 필터와 고차결합(cross coupling) 개방-루프 미로형 공진기를 배열한 평면형 6-극 대역통과 필터를 개발하였으며, 설계와 실제에서 거의 일치된 결과와 양호한 주파수 특성을 얻었으며, 향후 IMT-2000 기지국 등의 통신시스템용 핵심부품으로 활용 가능성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1]Jia-Sheng Hong and M.J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/ Microwave Applications*, John Wiley and Sons, Inc.(2001).
- [2]David M. Pozar, "*Microwave Engineering*", Addison-Wesley Publishing Comp.(1990).
- [3]George L. Matthaei, Leo Young, E. M. T. John, "*Microwave Filters, Impedance Matching Networks and Coupling Structure*", Artech House.(1979).
- [4]X Castel and M. Guilloux-Very, A. Perrine, *J.Crystal Growth*, **187**, 211 (1998).
- [5]K. D. Develos, K. Kusunoki, and S. Ohshima, *Physica C* **320**, 21 (1999).
- [6]A.Zaitsev, G. Ockenfuss, and U. Kruuger, *J. Appl. Phys.*, **81**, 3069 (1997).
- [7]Min Han Kwak, S. K. Han, K. Y. Kang, Dal Ahn, J. S. Suh, and S H. Kim, *IEEE Trans. on Appl. Supercon.* Vol. **11(2)**, 4023(2001).
- [8]Min Han Kwak, K. Y. Kang, and S H. Kim, *Physica C* **320-376**, 532 (2002).
- [9]R. Levy and S. B. Chon, *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-32**, 1055(1984)