

## 고온초전도 박막을 이용한 튜너블 이상기의 마이크로파 특성

### Microwave Properties of Tunable Phase Shifter Using High Temperature Superconducting Thin Film

곽민환\*, 김영태\*, 문승언\*, 류한철\*, 이수재\*, 강광용\*\*

Min Hwan Kwak\*, Young Tae Kim\*, Seong Eon Moon\*, Han Cheol Ryu\*, Su Jae Lee\*, Kwang Yong Kang\*\*

**Abstract:** High temperature superconductor,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) and ferroelectric,  $\text{Ba}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{TiO}_3$  (BST) multilayer thin films were deposited using on MgO(100) substrates pulsed laser deposition. The thin films exhibited only (00l) peaks of YBCO and BST. The HTS thin films demonstrated excellent zero resistance temperature of 92.5 K. We designed and fabricated HTS ferroelectric phase shifter using high frequency system simulator and standard photolithography method, respectively. The HTS phase shifter shows a low insertion loss (2.97 dB) and large phase change ( $162^\circ$ ) with 40 V dc bias at 10 GHz. The HTS phase shifter shows 54 of figure of merit. These results can be applicable to phased array antenna system for satellite communication services.

**Key Words:** tunable phase shifter, multilayer HTS film, phased array antenna

#### 1. 서 론

지금까지 고온초전도 전자소자의 응용에는 조셉슨 접합을 이용한 디지털 소자와 고온초전도 박막을 이용한 통신 소자에 대한 연구가 주로 진행되어 오고 있다. 특히 고온초전도 수동소자의 경우 필수적으로 사용해야하는 냉각시스템의 경제성과 신뢰성이 해결된다면 가장 상용화에 근접한 고온초전도 응용분야이다. 실제로 무선통신 기지국용 고온초전도 필터의 경우 수년 전부터 이동 통신시스템에 적용하여 운용 중에 있으며, 필터 외에도 고온초전도를 이용한 공진기, 안테나 등 통신 소자에 대한 연구가 진행되어 왔다 [1-3]. 최근에 들어서 다양하고 복합적인 무선통신 서비스가 시행되고 있고, 통신 시스템 자원의 효율적인 활용방안의 일환으로 전파의 수신 효율을 높이고 수신 방향의 전자적 제어와 이동 중 송수신을 가능케 하는 이상기(phase shifter)를 이용한 위상 배열 안테나 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[4-5].

군수용으로는 주로 자성체 이상기를 이용한 레이더 시스템, 방송통신용으로는 전계효과 트랜지스터 (FET) 이상기를 이용한 위상 배열 안테나가 구현되고 있는

나, 소자의 크기, 형태, 경제성을 고려할 때 아직은 범용화에 문제점이 있다. 또한 이러한 이상기들은 고온초전도 무선통신 시스템에 적용하면 냉각시스템 구성에 있어서 냉기의 손실, 이중 소자의 연결에 따른 마이크로파 손실 등의 단점이 있다.

최근 연구되고 있는 강유전체 박막을 이용한 이상기의 경우, 강유전체 박막위에 고온초전도 박막을 비교적 쉽게 증착 할 수 있어 소형화가 가능하고 구조 또한 고온초전도 이상기 제작에 매우 적합하다[6-8]. 강유전체를 이용한 고온초전도 이상기는 기존에 연구되어 왔던 고온 초전도 안테나, 필터 등과 단일 칩으로 제작이 가능하기 때문에 단일 칩 고온 초전도 위상 배열 안테나 시스템에 적용할 수 있다. 고온 초전도 마이크로파 시스템에서 단일 칩으로 시스템을 구성할 수 있다는 것은 고가의 냉동기를 효율적으로 이용할 수 있고 고온초전도가 아닌 소자와의 연결에 의한 마이크로파 손실을 줄일 수 있다는 큰 장점이 있기 때문에 고온초전도 마이크로파 시스템 범용화에 가장 큰 문제점인 고가의 냉동기에 의한 경제적 단점을 고온초전도 시스템의 뛰어난 특성으로 보완할 수 있어 매우 중요하다.

본 연구에서는 고온초전도 위상 배열 안테나의 핵심 소자인 이상기를  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3/\text{MgO}$  다층 박막을 이용하여 설계 제작하고 인가전압에 따른 마이크로파 특성을 평가하였다.

#### 2. 실험 방법

##### 2.1. 박막의 제작

고온초전도 강유전체 다층박막을 펄스 레이저 증착장치를 이용하여 MgO(100) 기판위에 제작하였다. 펄스 레이저는 KrF 엑시머 레이저(COMPex 205)를 사용하였으며 레이저 파워는  $2.5 \text{ J/cm}^2$ 로 하였다. 타깃의 조성은 고온초전도체는  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO)를 사용하였고 강유전체는  $\text{Ba}_{0.1}\text{Sr}_{0.9}\text{TiO}_3$  (BST)를 각각 사용하였으며 기판은  $15 \times 15 \times 0.5 \text{ mm}^3$  크기를 사용하였다. 이때 박막과 타깃과의 거리는 5 cm로 하였다.

BST 박막은  $790^\circ\text{C}$ 의 기판온도, 180 mTorr 산소 분위기에서  $7.3 \text{ nm/min}$ 의 속도로 증착하여 230 nm의 두께로 증착하였으며, YBCO박막은  $750^\circ\text{C}$ 의 기판온도, 200 mTorr의 산소분위기,  $11.2 \text{ nm/min}$ 의 증착속도로 450 nm의 두께로 증착하였다. 증착된 박막은 저온 저항 측정 장치를 이용하여 전기적 특성을 측정하고 X-선 회절분석과 전자현미경을 이용하여 결정성과 미세구조를 관찰하였다.

\* 비 회 원 : 한국전자통신연구원 기반기술연구소

\*\* 정 회 원 : 한국전자통신연구원 기반기술연구소

원고접수 : 2005년 2월 22일

심사완료 : 2005년 3월 15일

2.2. 이상기 제작 및 측정

소자의 제작은 크롬 마스크와 마스크 정열기를 이용하여 표준 사진식각 공정으로 제작하였고, RF 이온 밀링 장비를 이용하여 설계된 고온초전도 패턴을 식각하였다. 고온초전도 이상기와 일반 금속 이상기의 특성비교를 위하여 BST만 증착된 MgO(100) 기판위에 dc 스퍼터링을 이용하여 2 μm 두께의 금을 증착하고 동일한 리소그래피 방법으로 제작하였다. 제작된 소자는 동일 평판형 도파관(coplanar wave guide: CPW) 형태이며 Fig. 1과 같다. 신호선의 폭과 접지사이의 간격은 각각 10 μm이다. 소자의 마이크로파 특성 측정을 위해 K-커넥터가 장착된 금속 패키지를 제작하고 여기에 각각의 소자를 실장한 후, 마이크로파 저온 측정 챔버에 장착하고 HP8510C 벡터 네트워크 분석기와 dc 전압공급장치(Keithley 237)를 이용하여 8~12 GHz 대역에서 이상기의 전압에 따른 마이크로파 특성을 측정하였다.

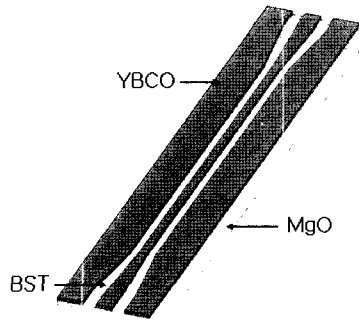


Fig. 1. Schematic of CPW phase shifter.

3. 결과 및 고찰

MgO(100) 기판위에 증착된 BST와 YBCO 박막의 결정성은  $\theta$ - $2\theta$  X-선 회절분석을 통하여 확인한 결과, Fig. 2에서 보는 바와 같이 두 박막의 층이 모두 c-축으로 잘 배향된 모습을 보이고 있다. Fig. 3에 나타난 전자현미경 사진에서 조밀한 미세구조를 가진 박막의 단면을 볼 수 있으며 BST와 YBCO 박막 사이에서 결함이 없이 c-축으로 에피택셜 성장된 박막임을 알 수 있었다. 표면 사진에서는 약간 거친 표면을 보이고 있지만, 이러한 YBCO 박막은 피닝이 커서 임계전류가 높기 때문에 마이크로파 소자 제작에 적합한 박막의 전형적인 형태를 보이고 있다. 한편 디지털 전자소자 제작에 사용되는 YBCO 박막은 임계전류가 낮더라도 YBCO에서 분리되어 결정화된  $\text{CuO}_x$  입자들이 거의 없는 깨끗하고 평탄한 YBCO 박막이 필요하다.

박막의 임계온도 특성을 측정하기 위하여 저온 냉각 장치, 전류공급장치, 전압측정장치를 이용하여 저항-온도 특성을 측정하여 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다. 결과에서 보는 바와 같이 YBCO 박막의 저항-온도 특성이 92.5 K의 아주 높은 임계온도 특성과 저항 곡선의 기울기가 금속과 같은 특성을 보였다. 이와 같은 임계온도 특성은 YBCO 단결정과 유사한 매우 뛰어난 특성이다. 향후 이러한 YBCO와 BST 박막사이의 계면 구조와 결정형성 그리고 양질의 YBCO/BST 박막의 형성 메커니즘을 규명할 예정이다.

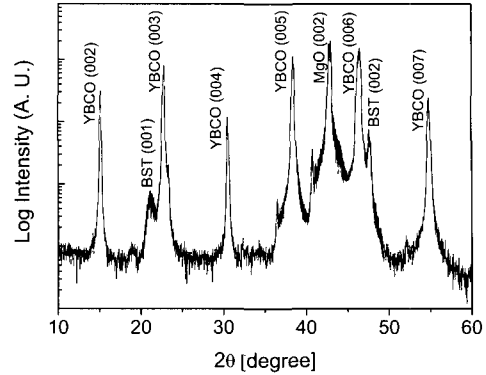


Fig. 2. XRD pattern of BST/YBCO/MgO thin film.

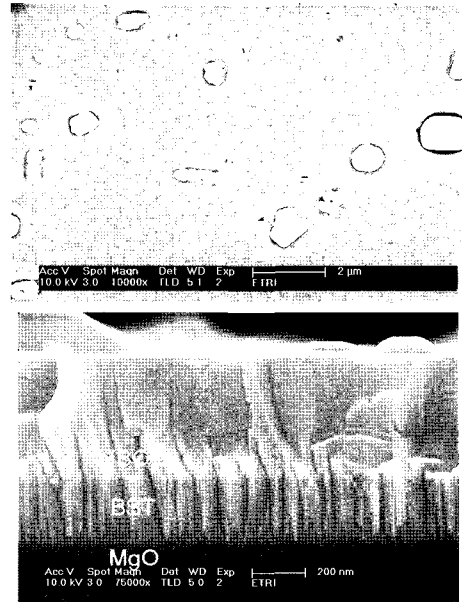


Fig. 3. SEM micrograph of BST/YBCO/MgO thin film.

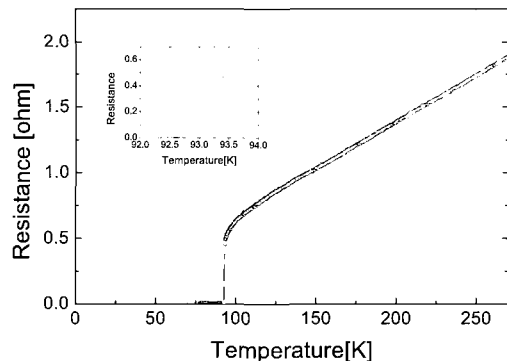


Fig. 4. Resistance-Temperature curve of BST/YBCO/MgO thin film.

YBCO/BST 박막을 이용하여 Fig. 1에서 나타낸 형태의 고온초전도 CPW 이상기를 제작하였고 제작된 이상기의 마이크로파 특성을 측정하였다. 동일한 조건에서 Au/BST 박막으로 제작된 이상기의 마이크로파 특성을 측정하였으며, 통신 소자에서 중요한 특성인 삽입손실과 반사손실을 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 삽입손실의 경우 YBCO/BST와 Au/BST 이상기가 77 K, 0 V 인가전압에서 각각 2.97 dB와 7.27 dB로 나타났다.

실온에서 측정된 Au/BST 이상기의 삽입손실이 5.38 dB인데 저온에서 삽입손실이 증가한 것은 본 실험에서 사용한 BST 박막의 강유전-상유전 전이 온도가 측정된 온도와 가깝기 때문에 급격한 유전을 변화에 따른 유전손실이 크게 증가한 것으로 보인다. 유전손실이 증가 했음에도 불구하고 YBCO/BST와 Au/BST 이상기가 4.3 dB의 손실차이를 보이는 것은 CPW 강유전체 이상기에서 신호선의 도전을 차이에 의한 손실은 강유전체의 유전손실 보다 더욱 큰 영향을 받는다는 중요한 사실을 알 수 있다. 반사손실은 YBCO/BST와 Au/BST 이상기 두 경우 모두 17 dB 이상으로 나타나 강유전체 이상기의 임피던스 매칭이 우수함을 알 수 있다.

마이크로파 이상기의 또 다른 중요 특성인 인가전압에 따른 위상변이 측정값을 Fig. 6에 나타내었다. 77

K에서 40 V의 전압을 인가했을 때, YBCO/BST와 Au/BST 이상기의 위상변이는 각각 162°와 178°의 비슷한 위상변이를 보였으나 마이크로파 손실 대비 위상변이 지수인 figure of merit를 보면 각각 54.5와 24.5로 YBCO/BST 이상기가 2배가 넘는 장점을 가짐을 알 수 있었다. 지금까지 보고된 강유전체 이상기는 본 연구 결과에서 나타난 정도의 위상변이를 얻기 위해서는 수 백 V의 전압을 인가했을 때 가능하였으나[9], 본 연구에서는 40 V의 인가전압에서 많은 위상변이를 보이고 있다. 일반적으로 강유전체 이상기는 인가전압이 높아짐에 따라 선형적으로 위상이 변하는 것이 아니라 일정 전압 이상에서는 위상변이가 포화되는 특성을 보이니, Fig. 5에서 보는 바와 같이 40 V에서도 위상변이가 포화되지 않고 있기 때문에, 향후 고전압 bias-tee를 제작하여 고전압에서 위상변이 추이를 관찰 할 계획이다.

#### 4. 결 론

펄스 레이저 증착법을 이용하여 MgO(100) 단결정 기판위에 YBCO/BST/MgO 다층박막을 제작하였다. YBCO/BST 박막은 두 층 모두 c-축 배향된 결정성을 보였으며, 저항-온도 측정에서 92.5 K의 매우 높은 전이온도 특성을 보였다. 이 박막을 이용하여 제작한 YBCO/BST 이상기의 경우 77 K에서 측정된 마이크로파 특성은 10 GHz에서 2.97 dB의 삽입손실과 16.71 dB의 반사손실 특성을 나타내었다. 이와 비교해서 금으로 제작된 이상기는 삽입과 반사손실이 각각 7.27 dB와 17.84 dB를 보였다. 이상기의 위상변이 특성은 40 V dc 인가전압에서 고온초전도와 금 이상기는 각각 162°와 178°의 위상변이를 보였다. figure of merit로 볼 때, 고온초전도와 금 이상기는 각각 54.5와 24.5인데 소자로서 활용될 경우 고온초전도가 일반금속에 비해 두 배 이상의 장점을 가짐을 알 수 있었다.

이와 같은 결과에서 고온초전도 이상기를 고온초전도 배열 안테나 시스템에 적용한다면 큰 이득을 가지면서 손실 또한 매우 우수한 특성의 위상 배열 안테나 시스템 제작이 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 정보통신부 선도기반기술개발사업 연구 과제 No. 02-S-138 에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

[1] J-S. Hong, M. J. Lancaster, D. Jedamzik, and R. B. Greed "On the Development of Superconducting Microstrip Filters for Mobile Communications Applications," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 47, no. 9, 1656 - 1663, 1999.

[2] M. R. Namordi, A. Mogro-campero, L. G. Turner and D. W. Hogue "Comparision of High-Temperature-Superconductor and Metal-Based Resonator," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 39, no. 9, 1468 - 1474, 1991.

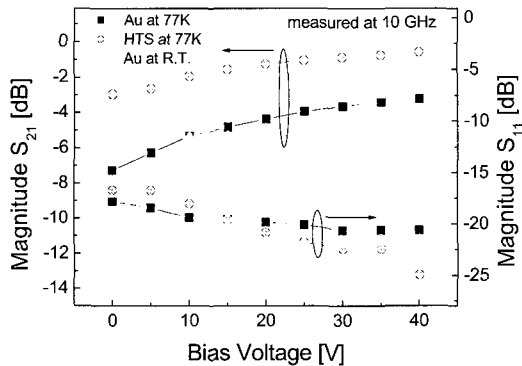


Fig. 5. Transmission characteristics of HTS ferroelectric phase shifter as a function of dc bias voltage at 10GHz.

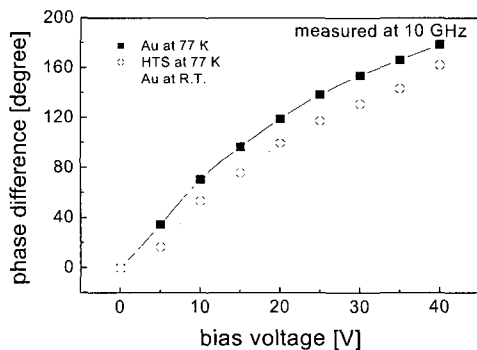


Fig. 6. Phase difference of the HTS ferroelectric phase shifter as a function of dc bias voltage at 10 GHz

[3] R. C. Hansen, "Superconducting antennas," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 26, no. 2, 345-355, 1990.

[4] C. F. Campbell and S. A. Brown, "A Compact 5-Bit Phase-Shifter MMIC for K -Band Satellite Communication Systems," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 48, no. 12, 2652-2656 2000.

[5] H. A. Atwater, "Curcuit Design of the Loaded Line Phase Shifter" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 33, no. 7, 626-634 1985.

[6] Y. Liu, A. S. Nagra, E. G. Erker, P. Periaswamy, T. R. Taylor, J. Speck, and R. A. York, "BaSrTiO<sub>3</sub> Interdigitated Capacitors for Distributed Phase Shifter Applications" IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 10, no 11, 448 - 450, 2000.

[7] H.-C. Ryu, S. E. Moon, S.-J. Lee, M. H. Kwak and Y. T. Kim "Microwave Performance of Distributed Analog Phase Shifter Using Ferroelectric (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> Thin Films" Integrated Ferroelectrics, 54, 689-696, 2003.

[8] S.-J. Lee, S. E. Moon, M. H. Kwak, H.-C. Ryu, Y. T. Kim and K.-Y. Kang, "High Dielectric Tunability of (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub> Thin Films and Their Coplanar Waveguide Phase Shifter Applications." Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43, no. 9B, 2004, 6750 - 6754, 2004.

[9] A. Kozyrev, A. Ivanov, O. Soldatenkov, E. Gol'man, A. Prudan, and V. Loginov "Microwave phase shifter with planar capacitors using strontium titanate films," Technical Physics Letters, Vol. 25, No. 10, 836-837, 1999.

저 자 소 개



곽민환(郭致煥)  
1970년 1월 25일생, 1995년 경상대학교 공대 전자재료공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전자재료공학과 졸업(공학석사), 2002년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전자통신연구원 기반기술연구소 선임연구원.



김영태(金玲台)  
1972년 2월 11일생, 1998년 순천향대학교 공대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 2004년 동대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사) 현재 한국전자통신연구원 기반기술연구소 Post-doc.



문승언(文勝彦)  
1965년 11월 22일생, 1990년 서울대학교 자연대 물리학과 졸업, 1994년 동 대학원 물리학과 졸업(이학석사), 2000년 동대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한국전자통신연구원 기반기술연구소 선임연구원.



류한철(柳漢哲)  
1976년 9월 22일생, 2000년 한양대학교 전자전자통신전과공학과 졸업, 2002년 포항공과대학교 대학원 전자전기공학과(공학석사) 졸업, 현재 한국전자통신연구원 기반기술연구소 연구원.



이수재(李守宰)  
1986년 경성대학교 물리학과 이학사, 1988년 부산대학교 물리학과(이학석사), 1997년 부산대학교 물리학과(이학박사) 현재 한국전자통신연구원 기반기술연구소 선임연구원.



강광용(姜光鏞)  
1959년 2월 12일생, 1975년 서울대학교 섬유고분자공학과 졸업, 1988년 부산대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학박사), 현재 한국전자통신연구원 기반기술연구소 책임연구원, 단말부품연구부 부장.