

고온초전도체의 마이크로파 특성



이상영
건국대학교 물리학과

고온초전도체의 마이크로파 특성에 대한 이해는 고온초전도체를 이용한 고주파소자의 설계 및 제작된 소자의 특성을 이해하는데 있어서 매우 중요하다. 본문 중에는 고온초전도체의 고주파특성 중 초전도박막의 표면저항과 전자파침투깊이의 측정방법이 기술되었으며 지금까지의 연구결과 밝혀진 고온초전도박막의 표면저항의 온도 및 rf 자기장에 의존성에 대한 내용이 기술되었다.

1. 서론

10 GHz 정도의 주파수 대역에서 quality factor (Q)가 10^4 인 마이크로스트립 (microstrip, '미세선'으로도 표현함) 공진기를 제작하는 일은 보통의 도체를 이용할 경우 구현 불가능한 일로서 이 정도의 Q를 구현할 수 있는

기존의 기술로는 loss tangent ($\tan \delta$)가 작은 유전체를 이용하거나 크기가 매우 큰 도체 cavity를 이용하는 기술이 알려져 있다 [1]. 초전도체를 이용한 기술은 이러한 높은 Q의 공진기를 마이크로스트립 형태로 제작할 수 있게 하는 유일한 기술이라 할 수 있는데, 초전도 공진기의 높은 Q는 초전도체의 표면저항이 초전도현상이 나타나기 시작하는 일정 온도 (임계온도, T_c 로 표기함) 이하에서 매우 작아지는 현상을 이용한 것이다. 그러나 초전도 기술을 이용한 마이크로파 공진기나 필터, 그리고 높은 Q의 공진기를 이용한 오실레이터의 제작 등 소자제작 기술은 이러한 소자의 우수한 특성이 초전도체의 임계온도 이하에서만 구현 가능하다는 점과 낮은 온도 (예로서 niobium 초전도체를 이용할 경우 액체헬륨 온도인 절대온도 4.2 도에서 작동하게 됨)를 유지하는데 드는 비용 등으로 인해 과거에는 극히 제한된 분야에만 응용될 수 있는 것으로 여겨져 왔다. 참고로 도체나 유전체로 제작되어 상온에서 작동하는 대부분 공진기의 Q는 $10^2 \sim 10^4$ 정도이며 최상의 성능을 지닌 quartz oscillator 경우 위상잡음은 100 Hz의 offset 주파수에서 -90 dBc/Hz 정도의 값을 지닌다 [2]. 1987년에 임계온도가 액체질소온도 (절대온도 77 도) 이상인 고온초전도체가 발견 되면서

초전도체를 이용한 마이크로파 기술은 새로운 발전의 계기를 맞게 되었는데 이는 냉각장치에 드는 비용의 절감과 고온초전도체로 제작한 마이크로파 소자의 특성이 저온에서 기존의 소자에 비해 월등히 우수한 특성을 지니고 있음에 기인한다. 한 예로서 가장 잘 성장된 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) 고온초전도 박막의 표면저항이 10 GHz, 액체질소온도에서 약 $200 \mu\Omega$ 정도인 것을 들 수 있다 [3]. 이러한 크기는

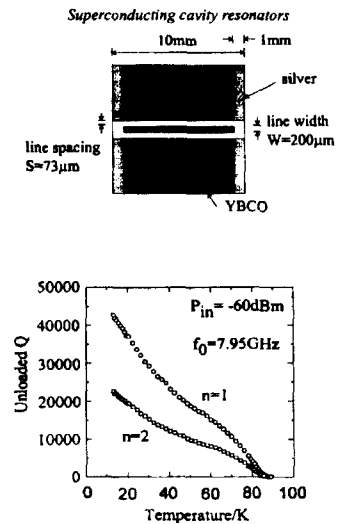


Fig. 1. Top: The coplanar resonator. bottom: The unloaded Q of the coplanar resonator; the fundamental and second harmonics are shown at frequencies of about 8 and 16 GHz. The input power to the resonator (P_{in}) is -60 dBm [4].

같은 조건에서 무산소동 (OFHC)의 표면저항인 10 mΩ의 약 1/50 정도에 불과한 것이며 공진기 내에서의 고온초전도 박막에 의한 conductive Q (Q_C)가 도체에 의한 Q_C에 비해 50 배 정도의 큰 값을 지닐 수 있게 됨을 뜻한다. Fig. 1은 YBa₂Cu₃O_{7-δ} 고온초전도박막으로 제작한 coplanar 공진기의 모습과 공진기의 Q에 대한 결과로서 77 K, 7.95 GHz에서 공진기의 Q가 약 10,000 정도의 크기를 지님을 보여준다 [4]. 저온에서 고온초전도 박막이 지닌 우수한 마이크로파 특성을 매우 낮은 loss tangent를 지닌 유전체의 특성과 결합하여 신기능의 마이크로파 소자를 제작할 수 있는데, sapphire rod와 YBCO 고온초전도 박막을 결합시킨 공진기 내의 TE₀₁₁ mode의 Q는 5 GHz, 액체 질소온도에서 10⁶ 이상의 값을 지니는 것으로 보고된 바 있다 [5]. 또한 액체질소온도에서의 sapphire 공진기의 whispering gallery mode의 Q는 3 × 10⁷ 정도의 매우 큰 값을 지니는데 이러한 유전체 공진기를 고온초전도 박막과 결합할 경우 매우 높은 Q의 tunable resonator 제작 및 이를 이용한 tunable oscillator를 제작이 가능하다. Phase noise L과 Q의 관계식은

$$L(f_m) = 10 \cdot \log \left[\left(1 + \frac{f_0^2}{4Q_L^2 f_m^2} \right) \cdot \left(\frac{\alpha}{f_m} + \beta \right) \right] \quad (1)$$

로서 (Q_L은 loaded Q, f_m은 offset 주파수)를 이용하면 기존의 GaAs MESFET (위상잡음 : -125 ~ -135 dBc/Hz)이나 HBT (위상잡음: -140 ~ -148 dBc/Hz)를 사용할 경우 10 GHz 주파수

와 100 Hz의 offset 주파수에서의 최소 위상잡음의 크기 L(100 Hz)은 -138 dBc/Hz 정도의 매우 작은 값을 지닐 수 있을 것으로 기대된다 [6] (참고로 최상의 quartz oscillator의 경우 L(100 Hz) = -90 dBc/Hz임).

이러한 고온초전도 기술의 마이크로파공진기 제작에의 응용이 성공적으로 이루어지기 위하여 확립되어야 하는 기술의 내용으로서 (i) 높은 임계온도와 낮은 표면저항을 지니고 박막 두께가 전자파 침투깊이의 2 ~ 3 배이며 동시에 우수한 표면 평활도를 지닌 고온초전도 박막의 제작기술, (ii) 고온초전도 박막에 대한 마이크로파특성 평가기술, (iii) 마이크로스트립 공진기의 제작시 박막의 특성을 저하시키지 않는 식각 공정기술, (iv) 고온초전도박막 제작에 사용되는 기판의 마이크로파 특성평가기술 확립 및 우수한 마이크로파 특성의 고온초전도 박막제작용 기판 제작기술, (v) 고온초전도박막-유전체의 접합을 이용한 공진기 제작시 공진기 내의 모드별 전자파분포 이해, (vi) 고온초전도박막-유전체의 접합을 이용한 공진기에서 높은 Q를 지닌 모드의 구분 및 공진신호와 parasitic mode와의 결합 배제, 그리고 (vii) 높은 Q를 지닌 공진기의 저온 특성평가기술 등을 들 수 있는데 이러한 것은 또한 공진기 외의 다른 마이크로파 소자의 제작 시에도 필요한 기술이라 할 수 있다. 본문 중에는 마이크로파 소자 제작에 사용되는 고온초전도체 박막의 마이크로파특성의 평가기술에 대한 내용이 기술되었는데 특히 제작된 소자의 고주파특성을 결정짓는 가장 중요한 특성인 표면저항과 전자파 침투깊이에 대한 내용이 기술되었다.

2. 고온초전도 박막의 마이크로파특성 평가법

고온초전도 박막의 표면저항과 침투깊이의 측정은 대개 고온초전도 박막을 이용하여 제작된 공진기의 quality factor (Q)와 공진주파수를 측정된 후 측정된 자료를 분석함으로써 이루어지게

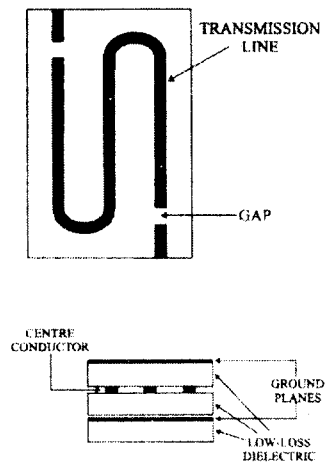


Fig. 2. A schematic of a stripline resonator in the form of a meander line. top: top view showing the superconductor track. bottom: the cross sectional view [7]

되는데 공진기의 Q는 다음과 같이 정의된다 [8].

$$Q = 2\pi f_0 \cdot \frac{\text{공진기내의 에너지}}{\text{power 손실}} \quad (2)$$

여기서 f₀는 공진주파수이다. 실제 측정되는 Q는 loaded Q (Q_L)로서 공진기 고유의 특성이 반영된 unloaded Q (Q_U)에 비해 작은 값을 지니는데 이는 Q_L이 공

진기 내의 power 손실 뿐 아니라 공진기에 연결된 회로에 의한 power 손실 까지도 반영하기 때문이다. Q_L 과 Q_U 의 관계는 $Q_U = Q_L/[1-\exp(IL(\text{dB})/20)]$ 이며 여기서 IL (dB)는 decibel 단위로 측정된 공진기의 삽입손실(insertion loss, 줄여서 'IL'이라 함)로서 $IL(\text{dB}) = -10 \log_{10}(\text{output power}/\text{input power})$ 이다. 공진기 고유의 특성 만이 반영된 Q_U 는 공진기 내의 고온초전도박막과 도체, 유전체로부터의 power 손실, 그리고 외부로 새어나가는 전자파에 의한 손실들을 각각 고려하면 다음과 같이 기술된다.

$$\frac{1}{Q_U} = \frac{1}{Q_s} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{rad}} \quad (3)$$

여기서 Q_s , Q_c , Q_d , Q_{rad} 는 각각 공진기 내의 고온초전도박막, 도체, 유전체 들에서의 power loss에 의한 Q를 뜻하며 Q_{rad} 는 radiation loss에 의한 Q를 의미한다. 또한 Q_s , Q_c , Q_d 는 각각 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\frac{1}{Q_s} = \frac{R_s}{A_s}, \quad \frac{1}{Q_c} = \frac{R_c}{A_c}, \quad \frac{1}{Q_d} = p_d \tan \delta \quad (4)$$

여기서 A_s , A_c 는 각각 고온초전도 박막 및 도체와 관련된 geometrical factor로서 모양, 설계형태 및 크기에 따라 다른 값을 지니게 되며 고온초전도박막 및 도체 고유의 물리적특성과는 관계가 없는 값이다. 또한 p_d 는 공진기 내에 저장된 에너지 중 유전체 내에 저장된 에너지가 차지하는 energy filling factor이다. 공진기를 이용한 고온초전도체의

마이크로파특성 평가방법으로는 크게 i) 마이크로스트립 공진기를 이용하는 방법 ('마이크로스트립 방법'이라 함)과 [7, 9], ii) 고온초전도체 - 유전체 접합으로 된 공진기를 이용하는 방법 ('유전체'방법'이라 함) [10 - 12], 그리고 iii) 평행판 공진기를 이용하는 방법 ('평행판공진기 방법'이라 함)이 사용되고 있다 [14]. Fig. 2는 마이크로스트립 방법을 사용하기 위하여 제작된 공진기의 한 예이다. 이 경우 고온초전도 박막은 식각과정을 통해 마이크로스트립 공진기의 형태로 제작되는데 이러한 공진기를 통하여 전파되는 전자파는 거의 TEM mode 형태라 할 수 있다. 그리고 이러한 공진기의 TEM mode의 Q와 공진주파수의 온도 의존성으로부터 고온초전도 박막의 표면저항과 전자파침투깊이를 측정할 수 있다. 이 방법은 실제 고온초전도 박막이 응용되는 형태인 미세선 형태로 측정된다는 점에서 장점이 되기도 하지만 미세선 내에서 흐르는 전류가 미세선의 edge 부분에 크게 집중되는 current crowding 효과를 해석적으로 이해하는 것이 어렵다는 점과 식각과정에서 고온초전도 박막의 특성이 변할 수 있다는 점이 단점으로 지적되고 있다. Fig. 3은 마이크로스트립의 가장자리에서 전류의 집중(crowding)이 크게 일어나게 됨을 보여준다. 고온초전도체 - 유전체 접합으로 이루어진 cavity 공진기를 이용한 특성 평가 방법은 Shen 등에 의해 처음 시도된 바 있는데 [5] 제작된 고온초전도 박막을 그대로 사용할 수 있다는 장점을 지니고 있어서 최근 많은 연구결과가 보고되고 있는 측정방법이기도 하다 [10 - 12]. 여기서 한 가지 언급할 사

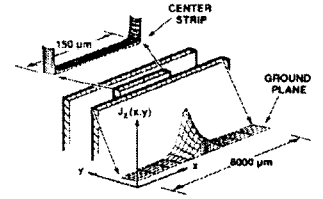


Fig. 3. Calculated current distribution (J_z) for the center conductor and ground plane for the resonator shown in (Fig. 2). The scale is different for the central strip and the ground plane. The parameters used in the calculation are $\lambda=0.16\mu\text{m}$ with a film thickness of $0.3\mu\text{m}$ [7].

실은 이 방법의 사용시 측정된 공진기의 Q와 고온초전도 박막의 표면저항의 관계를 구하기 위하여는 cavity 내의 전자기장 분포를 정확히 이해하는 것이 요구된다는 것이다. 또한 측정 결과의 정확한 분석을 위하여 공진기 제작시 사용된 유전체의 특성이 먼저 분석되어야 한다는 점도 지적된다. 한편 평행판공진기 법은 Taber 등에 의해 보고된 바 있는데 [13] 가장 측정 감도가 큰 방법으로 알려진 측정법이지만 측정시 시간이 많이 소요되고 측정의 자동화를 이루기가 어려운 방법으로 알려져 있다. 각 측정법에 대한 보다 자세한 내용은 다음과 같다.

(1). 마이크로스트립공진기 법

마이크로스트립공진기 법에서 공진기의 Q_U 와 고온초전도 박막의 고유표면저항 (R_s)과의 관계식은 우리가 앞서 보고한 바 있다 [9]. 여기서 한 가지 주의하여야 할 것은 고온초전도 박막의 표면저항을 계산하는데 있어서 박막의 두께가 전자파침투깊이에 비해 2 ~ 3 배 보다 작은

값을 지닐 경우에는 유한한 박막을 통과하는 전자파에 의한 radiation effect를 고려해야 한다는 것이다 [14, 15]. 고온초전도 박막의 두께가 작을 경우 박막의 R_S 와 radiation effect가 포함된 유효표면저항 (R_S^{eff}) 간의 관계식은 측정온도가 T_C 보다 매우 작은 영역에서는 $R_S^{eff} = R_S \cdot \coth(t_{eff}/\lambda)$ 로 주어지는데 (λ 는 주어진 온도에서의 전자파 침투 깊이, t_{eff} 는 미세선의 유효두께). 이 관계로부터 박막의 두께가 작을 경우 고온초전도박막의 유효표면저항이 고유의 표면저항에 비해 큰 값을 지니게 됨을 알 수 있다. 여기서 λ 는 고온초전도 마이크로스트립의 inductance의 온도의존성이 공진기의 공진주파수 (f_0)의 온도의존성을 측정함으로써 구할 수 있다. 참고로 두께가 h 인 기판 위에 제작된 선폭이 w 인 고온초전도 마이크로스트립과 도체 ground plane으로 이루어진 공진기의 f_0 의 온도의존성은 $w \gg h$ 인 경우 다음과 같이 기술된다 [9].

$$\frac{\Delta f_0}{f_0(T_0)} = 1 - \left[\frac{1 + \frac{\lambda(T_0)}{h} \coth \frac{t}{\lambda(T_0)} + \frac{\delta_N(T_0)}{2h}}{1 + \frac{\lambda(T)}{h} \coth \frac{t}{\lambda(T)} + \frac{\delta_N(T)}{2h}} \right]^{1/2} \quad (5)$$

여기서 $\Delta f_0 = f_0(T) - f_0(T_0)$, T_0 는 기준이 되는 측정온도 (보통의 경우 측정온도의 최저치), t 는 박막의 두께, h 는 기판의 두께이고 δ_N 은 도체의 skin depth이다. 고온초전도체의 $\lambda(T)$ 는 다음과 같다 [16].

$$\lambda(T) = \lambda_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (6)$$

그러므로 측정치인 Δf_0 를 식 (5)와 (6)에 fitting 함으로서 λ_0 및 T 에서의 λ 를 구할 수 있다. 식 (5)와 (6)은 또한 제작된 마이크로스트립 공진기의 공진주파수 (f_0)가 온도 증가에 따라 작아지게 됨을 보여준다.

(2) 유전체공진기 법

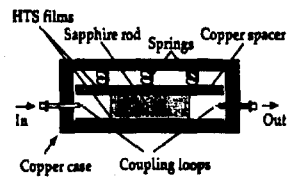


Fig. 4. The configuration of a packaged HTS-sapphire-HTS resonator [5].

Fig. 4는 유전체공진기법에서 사용되는 고온초전도박막-유전체 접합형의 cavity 공진기의 개략도로서 원통형 cavity 내에 놓인 유전체봉의 위, 아랫면에 고온초전도박막이 설치된 모습이다. 공진기 외부로 새어나가는 전자파를 차단하여 radiation loss를 없게할 경우 ($1/Q_{rad} = 0$), 고온초전도 박막의 R_S 와 공진기의 Q_U 간의 관계식은 (식) 3과 (4)로부터 다음과 같이 기술된다.

$$R_S = A_S \left(\frac{1}{Q_U} - \frac{R_C}{A_C} - \frac{1}{Q_d} \right) \quad (7)$$

여기서 R_C , A_C , A_S 는 각각 공진기를 구성하는 도체의 표면저항, 도체 부분에 대한 geometric factor와 고온초전도체 부분에 대한 geometric factor를 각각 의미하는데 A_C 와 A_S 의 크기는 공진기의 크기와 모양에 의해 결정된다. 식 (7)은 유전체공진기법을

이용한 표면저항 측정시 표면저항의 측정의 정확도 및 범위가 공진기의 구조 변화에 따른 A_C , A_S , p_d 의 크기와 공진기 제작시 사용된 도체의 표면저항 (R_C)과 유전체의 loss tangent ($\tan \delta$)의 크기에 의해 결정되게 되며 또한 Q_U 가 큰 모드를 선택하는 것이 보다 작은 값의 R_S 측정에 필수적임을 보여준다. 참고로 Fig. 4의 구조를 지닌 cavity 공진기의 경우 TE_{011} mode의 매우 큰 Q_U 를 이용하는 연구가 많이 보고되고 있는데 [5, 17], TE_{011} mode의 경우 공진기 내에서 전자파에 의한 전류의 방향이 원통형 cavity의 대칭축을 회전하는 방향으로 주어진다. Fig. 5는 이러한 달리움계의 고온초전도박막이 설치된 유전체공진기의 Q 의 circulating power에의 의존성 data로서 90 K, 5.55 GHz에서 Q 가 1,000,000 이상의 크기를 지님

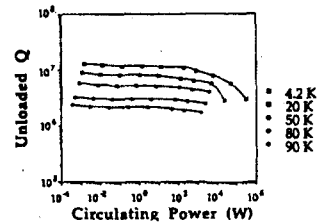


Fig. 5. Unloaded Q versus circulating power at different temperatures of a 5.55 GHz $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$ (TBCCO) HTS-sapphire-HTS resonator [5].

을 보여준다. 또한 TM_{011} mode를 이용한 표면저항 측정결과도 보고된 바 있다. 이러한 유전체공진기법 외에도 유전체봉의 아랫면에만 고온초전도박막을 설치하고 유전체봉의 윗면은 비어두

는 open-ended 유전체공진기법 (open-ended parallel plate resonator method)도 고온초전도 박막에 대한 효과적인 표면저항 측정법이라 할 수 있는데 [17] 이 방법의 장점은 하나의 고온초전도박막을 이용한 측정이 가능하다는 것인데 상업용의 software를 사용하지 않을 경우 open-ended 구조의 cavity 내의 전자기파 분포에 대한 해석이 Fig. 4의 구조의 경우에 비해 보다 까다롭다는 점이 지적된다.

(3) 평행판공진기 법

Taber가 제안한 평행판공진기 (parallel plate resonator) 법은 10 GHz 정도의 주파수 대역에서 고온초전도박막의 표면저항과 전자침투깊이의 정확한 측정을 가능하게 하는 방법으로 알려져 있다 [13]. Taber가 사용한 공진기는 두 개의 10 mm x 10 mm 크기의 고온초전도박막이 12.5 μm 두께의 테프론 tape 양쪽에 붙어 있는 형태로 copper cavity 내에 설치된 형태이다. Fig. 6는 본 공진기의 개략도이다. 이 방법은 두 개의 고온초전도박막을 필요로 하기 때문에 측정된 표면저항은 두 박막의 표면저항의 평균값을 주게 되는데 Q_U 와 표면저항 R_S 의 관계식은 다음과 같다.

$$Q_U = \tan \delta + \alpha s + \beta \frac{R_S}{s} \sim \frac{R_S}{\pi \mu_0 f s} \quad (8)$$

여기서 s 는 고온초전도박막 간의 간격 (즉 테프론 tape의 두께), α , β 는 기하학적 구조에 따라 결정되는 상수이고 $\tan \delta$ 는 테프론의 loss tangent이다. $\tan \delta =$

5.6×10^{-6} 인 테프론 tape을 이용하면 평행판공진기법을 이용하여 $5 \mu\Omega$ 정도의 작은 표면저항까지 측정할 수 있음이 알려져 있다 [13]. Fig. 7은 평행판공진기법을 이용하여 YBCO 박막의 표면저항에 대해 측정한 결과이다. 평행판공진기법은 표면저항을 가장 정확히 측정할 수 있는 방법 중 하나라 할 수 있지만 앞서 언

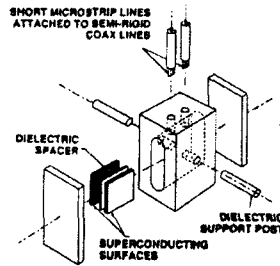


Fig. 6. Expanded view of the measurement configuration. The material under test is clamped within the test chamber by two dielectric posts that are spring loaded by components (not shown) exterior to the test chamber [13].

급한 바와 같이 측정 과정에서 공진모드를 구별하는 것이 용이하지 않고 공진모드의 주파수 측정에 어려움이 있으며 측정시간이 많이 소요된다는 점등이 문제점으로 지적되고 있다 [13].

3. 고온초전도체의 표면저항

고온초전도박막의 고주파 소자 제작에의 응용성을 가능하게 하는 가장 중요한 요인 중의 하나로서 고온초전도박막이 지닌 낮은 표면저항을 들 수 있다. 일반적으로 초전도체의 표면저항은

온도 및 주파수, 그리고 인가된 자기장의 크기에 따라 다른 값을 지니게 되는데 초전도체의 표면저항은 측정온도가 임계온도 부근에서 큰 값을 지니게 되고 온도가 낮아짐에 따라 점점 작은 값을 지니게 된다. 초전도체의 표면저항은 $R_S \propto f^2$, 즉 초전도체에 인가된 신호의 주파수 크기의 제곱에 비례하는 형태를 지니게 되는데 [18] 이러한 표면저항

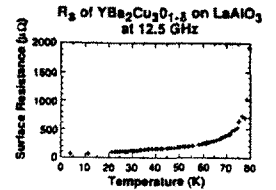


Fig. 7. R_S as a function of temperature for a YBCO film on LAO with a 12.5 μm-thick teflon FEP spacer, measured with the parallel plate resonator shown in Fig. 6 [13].

의 주파수 의존성은 도체 표면저항의 주파수 의존성인 $R_S \propto f^{1/2}$ 와 비교되는 것이기도 하다. 초전도체의 표면저항의 주파수 의존성은 이유험 모형 (two-fluid model)으로 잘 설명되는데 인가된 신호의 주파수가 gap frequency인 $f_c = 2Eg/h$ (Eg 는 초전도체의 gap energy, h 는 플랑크 상수)의 크기를 지니게 되면 초전도체의 표면저항도 급격히 증가하게 된다 [18]. 현재까지의 연구결과, 고온초전도체 중 하나인 YBCO 고온초전도박막의 표면저항은 10 GHz, 77 K에서 약 $200 \mu\Omega \sim 300 \mu\Omega$ 의 크기를 지닌 것으로 알려져 있으며 이러한 값은 77 K, 100 GHz 이내의 주파수에서 YBCO 고온초전도박막의 표면저항이 구리의

표면저항보다 작은 값을 지니게 됨을 뜻한다. 고온초전도체의 마이크로파 응용에 있어서 고려되어야 할 중요한 특성 중 하나로써 고온초전도체의 R_S 의 고주파 자기장 (H_{rf})에의 비선형적인 의존성을 들 수 있다 [7, 19]. 고온초전도체의 표면저항의 H_{rf} 에의 비선형적인 의존성은 측정에

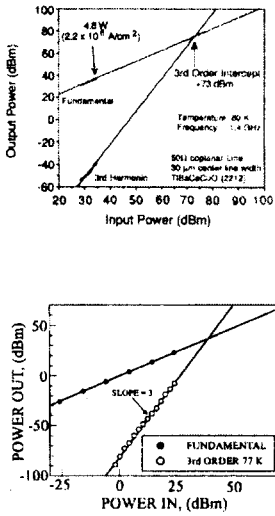


Fig. 8. Top: The third order intercept plot for a $30\text{-}\mu\text{m}$ wide, 1 mm -long, $50\ \Omega$ $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ coplanar line measured with a single tone input at 77 K . The fundamental frequency is 1.0 GHz [21]. Bottom: Two-tone third-order and third harmonic distortions compared with the fundamental [22].

사용된 고온초전도박막의 상태와도 관련있는 것으로 보고되고 있는데 이와 관련하여 영국의 Gallop 등은 고온초전도박막이 입자성을 많이 지닌 경우 R_S 는 $R_S = R_0 (1 + H_{rf}^2)$ 의 형태를 지

니고 에피성장된 YBCO 박막의 경우 R_S 는 $R_S = R_0 (1 + H_{rf}^2)$ 의 형태를 지니게 됨을 보고한 바 있다 [20]. 고온초전도체의 H_{rf} 에 대한 비선형적 표면저항으로 인해 주파수 f_0 인 신호를 고온초전도박막으로 만든 신호전달선에 입력한 경우에 주파수 f_0 인 출력 신호와 함께 주파수 $3f_0, 5f_0, 7f_0$ 등의 신호 (조화신호)가 함께 나오게 된다. 이 경우 일정한 크기의 f_0 주파수의 입력신호 (P_{in})에 대해 주파수 f_0 인 출력신호의 크기 (P_1)과 $3f_0$ 의 주파수를 지닌 출력신호의 크기 (P_3)가 같아지게 되는데 이러한 P_{in} 의 크기를 3 차 교차점 (third order intercept)이라 하며 3 차 교차점의 크기가 작을수록 고온초전도박막의 R_S 의 비선형성이 크다고 할 수 있다. Fig. 8 (top)은 TBCCO 고온초전도박막으로 제작한 마이크로스트립의 경우 3 차 교차점이 73 dBm (약 10 KW)의 입력신호에서 나타남을 보여준다 [21]. 이러한 고주파특성의 비선형성은 또한 서로 다른 주파수의 신호 들 간의 간섭, 즉 intermodulation을 일으키게 되는데 이 경우 서로 다른 주파수 대역을 지닌 변조된 신호 (modulated signal) 들이 서로 섞이게 되는 현상이 나타나게 된다. 이러한 intermodulation의 정도는 two-tone third-order intermodulation의 측정을 통하여 행할 수 있다. 여기서 two-tone intermodulation의 크기는 필터의 통과 대역 내의 두 주파수 f_1 과 f_2 의 출력이 변조된 3차 (third order)의 주파수 $f_{1,2} = 2f_1 - f_2 = f_1 + \Delta f$ 인 신호의 출력과 같게 되는 입력신호의 크기 P_{in} 으로 기술되고 two-tone third-order intermodulation의 크기가 작을수

록 고온초전도체의 비선형성이

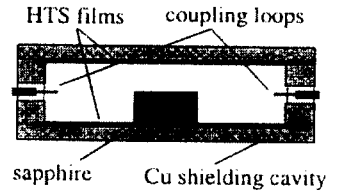


Fig. 9. An open-ended dielectric-loaded parallel plate resonator used for measurements of R_S

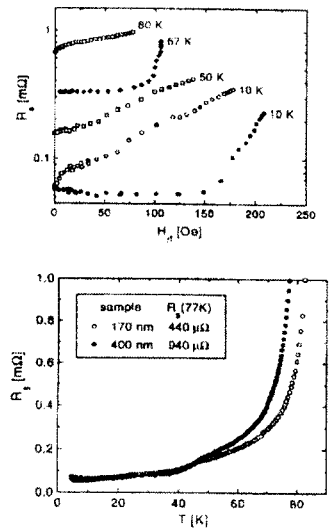


Fig. 10. Top: R_S versus T for YBCO films on CbS with different thickness at 9.5 GHz Bottom: R_S vs H_{rf} at different temperatures and 9.5 GHz for YBCO films of different thickness on CbS: 170 nm (open) and 400 nm (filled) [25].

크다고 말할 수 있다. Fig. 8 (bottom)는 현재 LaAlO_3 (LAO) 기판 위에 성장된 YBCO 박막으로 제작된 중심주파수 2 GHz , 0.7% 통과대역의 필터의 경우 two-tone third-order intermodulation intercept의 크기가 39 dBm ($= 10^{39/10}\text{ mW} = 10^{3.9}$

mW ~ 10 W) 정도임을 보여준다 [22]. 수신기용 마이크로파 소자의 제작에 필듯한 고온초전도박막의 제작시 LAO 기판이 주로 사용되고 있음에 비해 송신기용의 마이크로파 소자의 제작시에는 주로 CeO_2 -buffered sapphire (CbS) 기판이 사용되고 있는데 이는 CbS 기판이 송신기용의 소자에서 발행하는 열을 발산시키기에 보다 효과적이기 때문이다 [23]. CbS 기판을 사용하여 제작된 YBCO 박막의 경우에도 LAO 위에 제작된 박막에 비해 표면저항의 크기가 떨어지지 않을 뿐 아니라 680 nm 두께의 YBCO 박막도 crack 없이 성장시킬 수 있는 것으로 보고된 바 있다 [24]. Fig. 10 (top)은 CbS 위에 성장시킨 YBCO 박막의 R_s vs T data로서 77 K에서의 R_s 의 크기가 박막두께가 커짐에 따라 커짐을 보여준다. 또한 Fig. 10 (bottom)은 R_s vs H_{rf} data로서 두께가 큰 박막 (400 nm)의 경우 두께가 작은 박막 (170 nm)에 비해 R_s 의 값에 변화가 없는 최대 H_{rf} 의 크기가 증가함을 보여준다 [25].

4. 요약

LaAlO_3 기판 위에 성장된 고온초전도박막을 이용한 수신기 모듈 (receiver module)용의 마이크로파소자 제작기술과 CeO_2 -buffered sapphire 기판 위에 제작된 고온초전도박막을 이용한 송신기 모듈 (transmitter module) 용 소자의 제작기술은 각 분야에서 기존의 경쟁 기술을 대체할 수 있는 수준에 도달해 있는데 이는 YBCO와 TBCCO 고온초전도체 박막이 i) 액체질소

온도, 10 GHz에서 표면저항이 약 $200 \mu\Omega$ 이내의 작은 값을 지니고 있고, ii) 5,000 Å ~ 6,000 Å (77 K에서의 전자과 침투깊이의 약 2 배)의 두께로 crack 없이 에피성장이 가능하며, iii) 표면저항의 rf 자기장에 의존성이 우수함에 기인한다. 고온초전도박막이 지닌 고주파특성의 측정기술에 대한 연구 결과 평행판공진기를 이용한 방법은 높은 감도의 측정방법으로, 유전체공진기를 이용한 방법은 대면적 고온초전도박막의 고주파특성의 균일성을 측정할 수 있는 방법으로 여겨지고 있다. 특히 유전체공진기를 이용한 측정법의 경우 유전체공진기 내의 전자기장 분포의 해석에 기초한 고온초전도박막의 특성평가의 자동화와 유전체공진기가 지닌 매우 큰 Q를 이용한 고성능 오실레이터의 제작도 기대된다.

본 연구는 과학재단 특정기초 연구사업의 지원을 받았다.

참고 문헌

[1] 이상영, "고온초전도마이크로파소자 제작 및 응용", 요업기술, 12권, 5호, pp.340-349, 1997.
 [2] Phase noise is defined as the power in a 1-Hz bandwidth at a frequency f_m from the carrier frequency and measured in dB below the carrier power.
 [3] H. Piel and G. Mueller, "The microwave surface impedance of high- T_c superconductors", IEEE MAG-27, pp. 854-62, 1991.
 [4] A. Porch et al., "Non-linear microwave surface impedance of patterned

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films", IEEE MTT-43 (2), pp. 306-14, 1995.
 [5] Z.-Y. Shen et al., "High- T_c superconductor-sapphire microwave resonator with extremely high Q values up to 90 K", IEEE MTT-40 (12), pp. 2424- 2432, 1992.
 [6] I. Ghosh et al., Invited talk, 7th Korean Conference on Materials and Applications of Superconductivity, 용평 8월 18일 - 20일, 1997; see also C.A. Fiory and R. C. Taber, IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 44, pp. 486-495, 1997.
 [7] D.E. Oates et al., "Stripline resonator measurements of Z_s versus H_{rf} in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films", IEEE MTT-39, pp. 1522-1529, 1991.
 [8] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", Addison-Wesley, 1990.
 [9] Sang Young Lee et al., "Microwave properties of high- T_c $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ resonators with different surface morphologies and finite thicknesses", Physica C, vol. 273, pp. 83-90, 1996.
 [10] J. Krupka et al., "Surface resistance measurements of HTS films by means of sapphire dielectric resonators", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 3, pp. 3043-3048, 1993.
 [11] Sang Young Lee et al., "Use of a dielectric-loaded cylindrical cavity in

- measurements of the microwave surface resistances of high- T_c superconducting thin films", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 7, pp. 2013-2017, 1997.
- [12] J. Mazierska, "Dielectric resonator as a possible standard for characterization of high- T_c superconducting film for microwave applications", *Journal of Superconductivity*, vol. 10, pp. 73-84, 1997.
- [13] R. C. Taber, "A parallel plate resonator technique for microwave loss measurements on superconductors", *Rev. Sci. Instrumen.*, vol. 61, pp. 2200-2206, 1990.
- [14] N. Klein et al., "The effective microwave surface impedance of high- T_c thin films", *J. Appl. Phys.*, vol. 67, pp.6940-6945, 1990.
- [15] H.-Y. Lee and T. Itoh, "Phenomenological loss equivalence method for planar quasi-TEM transmission lines with a thin normal conductor or superconductor", *IEEE MTT-37*, pp. 1904-1909, 1989.
- [16] Z. Ma et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, p.781, 1993.
- [17] N. Tellmann et al., "High-Q LaAlO_3 dielectric resonators shielded by YBCO films", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 4, pp. 143-148, 1994.
- [18] See e.g., M. J. Lancaster, "Passive Microwave Device Applications of High-Temperature Superconductors", Cambridge, 1997.
- [19] J. R. Delayen and C. L. Bohn, "Temperature, frequency, and RF field dependence of the surface resistance of polycrystalline $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ", *Phys. Rev. B.*, vol. 40, p.5151, 1989.
- [20] A. Cowie et al., "Correlation between Raman and XRD characterization of YBCO thin films and their microwave loss", *Applied Superconductivity-EUCAS'97* proceedings, 1997.
- [21] Z.-Y. Shen, "High-temperature superconducting microwave circuits", Artech House, 1994.
- [22] G.-C. Liang et al., "High power HTS microstrip filters for wireless communications", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 183-186, 1994.
- [23] P. Merchant et al., *Appl. Phys. Lett.*, vol. 60, p. 763, 1992.
- [24] A. G. Zaitsev, G. Ockenfuss and R. Woerdenweber, "Critical thickness of YBCO films on CeO_2 buffered sapphire", *Applied Superconductivity -Proceedings of EUCAS'97*, 1997.
- [25] C. Zuccaro et al., "Nonlinear microwave losses of large area YBCO thin films", *Applied Superconductivity Proceedings of EUCAS'97*, 1997.

< 이상렬 위원 >