

Microwave Properties of HTS Parallel-Plate Sapphire Resonators Designed for the Two-Resonance Mode Method

Ho Sang Jung^a, W. I. Yang^a, J. H. Lee^b, Sang Young Lee^{a,*}

^a Department of Physics and Center for Wireless Transmission Technology, Konkuk University, Seoul, Korea

^b SuNAM Co., Ltd, Anyang, Korea

(Received 8 March 2010 revised or reviewed 14 April 2010 accepted 14 April 2010)

Two-Resonance Mode 방법으로 제작된 고온초전도 평행판 사파이어 공진기의 마이크로파 특성

정호상^a, 양우일^a, 이재훈^b, 이상영^{a*}

Abstract

Sapphire resonators with $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) endplates have provided a way to realize extremely high quality factor due to the extremely low dielectric loss of sapphire and conductive loss of YBCO films, which enables to measure the low surface resistance of superconductor films at microwave frequencies. We present microwave properties of HTS sapphire resonators designed for measuring the surface resistance of HTS films at millimeter-wave frequencies by using the two-resonance mode dielectric resonator method. Despite enhanced surface resistance (R_s) of YBCO films due to the quadratic frequency dependence of the R_s , the unloaded quality factor (Q_0) of the TE_{021} mode sapphire resonator still appears to be well above 1×10^6 at a mm-wave frequency of 38 GHz at 10 K. However, it appears that the TE_{012} mode Q_0 is unexpectedly low despite that the corresponding resonance peak looks uncoupled with parasitic modes. We discuss possible reasons for the unexpected results using the surface resistance at the TE_{021} , TE_{012} , and TE_{011} mode frequencies.

Keywords : Sapphire resonator, Two-resonance mode, Microwave, Surface resistance, Superconductor

I. Introduction

초전도체 박막의 표면저항은 초전도체의 전기역학적 특성을 연구하기 위한 중요한 기본 물성의 하나로서 [1] 초전도체의 매우 낮은 표면저항은 초전도체를 이용한 이동통신 기지국

용 필터의 제작을 가능하게 한다 [2]. 유전체 공진기법을 초전도체 박막의 마이크로파 표면저항(R_s)을 측정하기 위해 사용할 경우 [3-7] 유전체의 loss tangent($\tan\delta$) 측정치의 불확도는 R_s 의 오차를 결정하는 가장 중요한 요인의 하나이다. Kobayashi 등은 사파이어 공진기의 TE_{012} 모드 및 TE_{021} 모드의 공진신호를 이용하여 초전도체 박막의 표면저항(R_s)과 유전체의 $\tan\delta$ 를 동시에 측정하는 방법(여기서 'two-

*Corresponding author. Tel : +82 2 450-3166

e-mail : sylee@konkuk.ac.kr

resonance mode' 측정법이라 함)을 제안하였고 [8] Lee 등은 'modified two-resonance mode' 측정법으로 초전도체 박막의 고유표면저항과 전자 침투깊이, 그리고 유전체의 $\tan\delta$ 를 측정하는 방법을 제안한 바 있는데 [9], 이들의 측정법은 하나의 유전체 공진기에서도 TE₀₁₂모드와 TE₀₂₁모드가 각각 다른 Q -factor를 지닌다는 사실에 기초를 두고 있다. 따라서 이러한 'Two-resonance mode' 측정법을 사용할 경우 이 두 모드가 다른 기생 모드(parasitic modes)와 결합되지 않은 상태에서 이 두 모드들의 Q_0 를 정확하게 측정하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 'two-resonance mode' 측정법 용으로 제작된 평행판 사파이어 공진기의 TE₀₂₁ 모드와 TE₀₁₂ 모드의 Q_0 를 측정된 결과를 기술하고, 특히 이들 공진모드와 다른 기생모드 간의 결합이 사파이어 공진기의 특성에 미칠 수 있는 영향을 이 공진기의 TE₀₁₁ 모드에 대한 측정 결과에 기초하여 기술하였다.

II. 'Two-resonance mode' 측정법의 이론적 배경

초전도체 박막이 위, 아랫면에 놓이고 옆면이 무산소동으로 만들어진 유전체 공진기에서 (Fig. 1 참조) p -mode 공진기의 $Q_0(Q_{0p})$ 와 공진기를 둘러싼 초전도체 박막 및 도체의 표면저항, 그리고 유전체의 loss tangent 간의 관계식은

$$\frac{1}{Q_{0p}} = \frac{R_{sp}^B(SC)}{G_p^B} + \frac{R_{sp}^T(SC)}{G_p^T} + \frac{R_{sp}^{SW}(Cu)}{G_p^{SW}} + k_p \cdot \tan \delta_p \quad (1)$$

와 같이 주어진다 [10, 11]. 식 (1)에서 $R_{sp}^T(SC)$, $R_{sp}^B(SC)$, $R_{sp}^{SW}(Cu)$ 는 각각 윗면과 아랫면에 놓인 초전도체 박막의 표면저항, 공진기 옆면에 있는 무산소동의 표면저항이며, k_p 와 $\tan\delta_p$ 는 filling factor와 유전체의 loss tangent이며, G_p^T , G_p^B , G_p^{SW} 는 각각 공진기의 아랫면, 윗면, 그리고 옆면의 geometrical factor이다. 여기서 $p=1$ 과 $p=2$ 는 각각 TE₀₂₁ 모드와 TE₀₁₂모드를 의미하는 것으로 정의한다. 참고로 도체(혹은 초전도체)의 두께가 skin depth (혹은 침투깊이)의 3-

4 배 이상의 값을 지니지 않은 경우 측정된 표면저항 값은 유효표면저항의 의미를 지닌다.

이제 TE₀₂₁ 모드의 공진주파수를 f_1 , TE₀₁₂ 모드의 공진주파수를 f_2 라하고 사파이어의 $\tan\delta$ 와 YBCO의 R_s^B , R_s^T 의 주파수 의존성은 다음과 같다.

$$\frac{\tan\delta}{f} = \frac{\tan\delta_p}{f_p}, \quad (2)$$

$$R_{sp}^B(SC) \propto f^2, \quad R_{sp}^T(SC) \propto f^2, \quad R_{sp}^{SW}(Cu) \propto f^{1/2}. \quad (3)$$

식 (2), (3)을 이용하면 주파수 $f = f_1$ 에서의 R_{S1} 와 $\tan\delta$ 는 $R_{S1}^T = R_{S1}^B \equiv R_{S1}$ 이라 할 경우 다음의 식 (4a)와 (4b)와 같이 주어진다 [7, 8].

$$R_{S1} = \frac{X_1 k_2' - X_2 k_1}{A_1 k_2' - A_2 k_1}, \quad (4a)$$

$$\tan \delta_1 = \frac{A_2' X_1 - A_1 X_2}{A_2' k_1 - A_1 k_2'}. \quad (4b)$$

여기서

$$A_1 = \frac{1}{G_1^T} + \frac{1}{G_1^B}, \quad A_2' = \left(\frac{1}{G_1^T} + \frac{1}{G_1^B} \right) \times \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2, \quad (5)$$

$$k_2' = k_2 \times \left(\frac{f_2}{f_1} \right), \quad X_1 = \frac{1}{Q_{01}} - \frac{R_{S1}(Cu)}{G_1^{SW}}, \quad (6)$$

$$X_2 = \frac{1}{Q_{02}} - \frac{R_{S1}(Cu)}{G_1^{SW}} \times \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^{1/2} \quad (7)$$

이다.

III. Experimental

Fig. 1은 유전체 공진기의 개략도이다.

사파이어 공진기 내의 사파이어의 상온에서의 상대유전율은 a - b 평면에서의 값이 9.4 정도

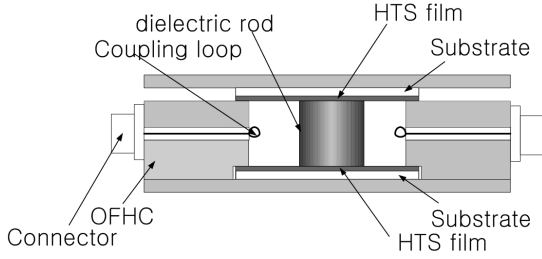


Fig. 1. Diagram for a parallel-plate dielectric resonator. For a sapphire resonator, a sapphire rod is used as the dielectric rod.

인데, 본 연구에서는 직경이 5.26 mm이고 높이가 2.99 mm인 rod 형태의 것이 사용되었다

공진기의 몸체는 무산소동(OFHC)으로 제작되었고 원통형 cavity의 크기는 직경이 15.78 mm이다. 사용된 사파이어 공진기의 geometrical factor와 filling factor는 [12] TE₀₂₁ mode의 경우 $G_1^T = G_1^B = 1731 \Omega$, $G_1^{SW} = 2.4 \times 10^6 \Omega$, $k_1 = 0.9533$ 이고, TE₀₁₂ mode의 경우 $G_2^T = G_2^B = 608.7 \Omega$, $G_2^{SW} = 4.2 \times 10^{11} \Omega$, $k_2 = 0.9947$ 이다. 또한 TE₀₁₁ mode의 경우 $G_1^T = G_1^B = 517.2 \Omega$, $G_1^{SW} = 6.5 \times 10^6 \Omega$, $k_1 = 0.9783$ 이다.

사파이어 공진기의 위, 아랫면에 각각 설치된 두께 600 nm의 YBCO 박막은 THEVA에서 제작된 것으로 [13] 크기가 18 mm × 18 mm인 MgO 기판 위에 동시증착법으로 성장된 것이다. 이 YBCO 박막의 임계온도(T_c)는 약 87 K이다.

IV. Results and Discussion

Fig. 2는 6.5 K 및 38 GHz 부근에서 사파이어 공진기의 S_{21} 을 측정된 결과로서 38.07 GHz 및 38.32 GHz에서 각각 TE₀₂₁ mode의 공진 신호와 TE₀₁₂ mode의 공진 신호가 관측됨을 보여준다.

참고로 two-resonance mode 유전체 공진기법을 이용하여 초전도체 박막의 표면저항을 측정할 경우 두 TE mode는 서로 인접하여 있으면서 동시에 다른 모드와의 결합이 없어야 한다.

R_{S1}^{SW} 와 R_{S2}^{SW} 의 온도 의존성은 식 (1)에서 사파이어의 $\tan\delta$ 가 들어간 항이 다른 항에 비해 매우 작다는 사실을 이용하여 구할 수 있는데, 사파이어 공진기의 위, 아랫면을 OHFC로 대체

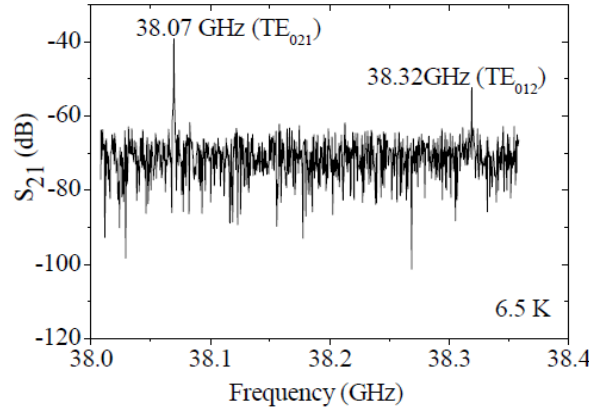


Fig. 2. The frequency response of the sapphire resonator near 38 GHz at 6.5 K. Both resonance peaks appear very sharp and uncoupled with parasitic modes.

한 후 구한 TE₀₂₁ mode의 Q_0 로부터 f_1 에서의 R_{S1}^{SW} 를 구하였고 식 (3)을 이용하여 f_2 에서의 R_{S2}^{SW} 를 구하였다. 참고로 TE₀₂₁ mode의 Q_0 는 기생모드의 영향을 거의 받지 않기 때문에 R_{S1}^{SW} 을 scale하여 R_{S2}^{SW} 를 구하는 것이 보다 정확하며 f_1 과 f_2 의 차이가 0.6% 정도에 불과하기 때문에 $R_{S1}^{SW} \approx R_{S2}^{SW}$ 를 이용하는 것이 가능하다.

YBCO 박막이 설치된 사파이어 공진기의 TE₀₂₁와 TE₀₁₂ mode의 Q_0 는 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

TE₀₁₂와 TE₀₂₁ mode 공진 주파수의 온도에 따른 변화는 Fig. 4에 나타난 바와 같은데, 사파이어의 유전상수의 온도 의존성이 매우 작기 때문에 공진 주파수의 변화도 전체 온도 구간에서 상당히 작음을 알 수 있다.

Fig. 5는 TE₀₂₁와 TE₀₁₂ mode의 주파수에서 측정된 YBCO 박막의 표면저항의 온도 의존성에 대한 실험결과로서 이 표면저항 값을 구하기 위해 사용한 사파이어의 $\tan \delta$ 는 Krupka 등 [14] 이 보고한 값을 식 (2)를 이용하여 f_1 과 f_2 에서 scale한 것이다. TE₀₂₁ mode와 TE₀₁₂ mode의 주파수가 거의 같음에도 불구하고 TE₀₁₂ mode의 Q_0 에서 구한 표면저항 값이 TE₀₂₁ mode에서 구한 표면저항에 비해 상당히 크다는 점이 주목된다. TE₀₁₂ mode의 Q_0 가 기대값 보다 상당히 작게 나왔다는 사실은 TE₀₁₁ mode에 대한 다음의 측정결과로부터 확인할 수 있었다.

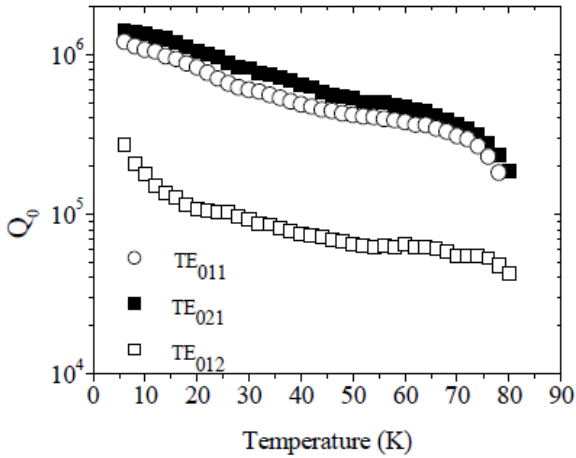


Fig. 3. The unloaded Q vs. temperature data for the TE_{011} , TE_{021} and TE_{012} modes of the sapphire resonator

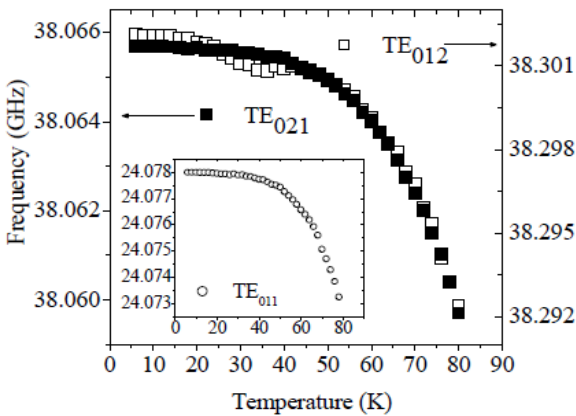


Fig. 4. The resonant frequency vs. temperature data for the TE_{021} and TE_{012} modes of the sapphire resonator. Inset: The resonant frequency vs. temperature data for the TE_{011} mode of the sapphire resonator.

TE_{011} 모드의 Q_0 와 공진 주파수, 그리고 표면 저항 측정 결과는 각각 Fig. 3과 Fig. 4의 inset, 그리고 Fig. 5에 나타난 바와 같다. Fig. 5를 보면 TE_{021} 모드의 표면저항이 TE_{011} 모드의 표면 저항 보다 모든 온도 영역에서 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 표면저항이 측정된 주파수의 차이에 기인하는 것으로서 TE_{021} 모드의 주파수는 ~ 38 GHz이고 TE_{011} 모드의 주파수는 ~ 24 GHz이다. TE_{011} 모드 주파수에서의 표면 저항 측정 결과를 식 (3)의 $R_S \propto f^2$ 의 관계식을 이용하여 scale한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

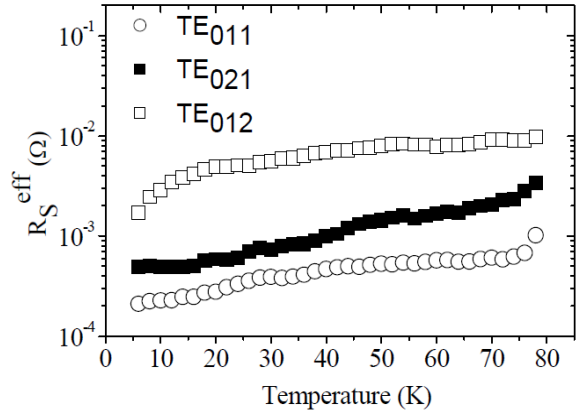


Fig. 5. The effective surface resistance vs. temperature data for the TE_{021} , TE_{012} , and TE_{011} modes of the sapphire resonator.

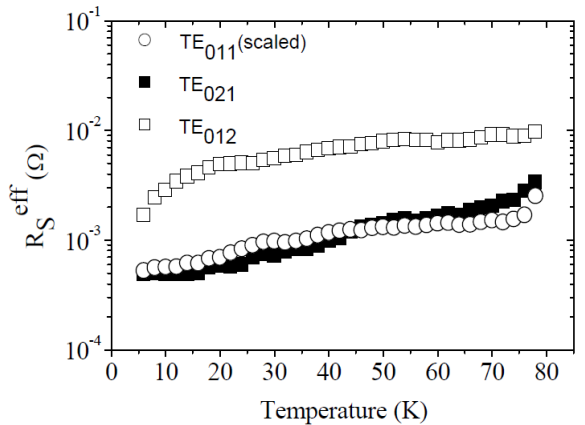


Fig. 6. The temperature dependence of the effective surface resistance of YBCO films at the TE_{011} mode f_0 scaled to the TE_{021} mode f_0 , and at the TE_{012} and TE_{021} f_0 s. The effective surface resistance at the TE_{011} mode f_0 becomes almost the same as R_{S1}^{eff} when scaled by using the $R_S \propto f^2$ relation, which, however, does not appear to hold true for R_{S2}^{eff} .

Fig. 6을 보면 TE_{011} 모드에서 측정된 표면 저항을 38 GHz의 값으로 scale 한 값이 TE_{021} 모드에서 측정된 표면저항과 모든 온도에서 거의 같음을 알 수 있다. 이 결과는 TE_{011} 모드의 공진신호와 TE_{021} 모드의 공진신호가 다른 기생 모드와의 결합 없이 측정된 것임을 보여준다. 같은 논리로 Fig. 6에서 TE_{012} 모드의 Q_0 로부터 구해진 YBCO 박막의 표면저항이 TE_{021} 모드와 TE_{011} 모드의 Q_0 에서 구해진 표면저항 보다 현저히 크다는 것은 TE_{012} 모드의 Q_0 가 기생모드

와의 결합에 의해 기대치보다 훨씬 작게 관측되었음을 의미한다.

참고로 Fig. 3에 제시된 TE_{021} 와 TE_{012} 모드의 Q_0 와 식 (4a)를 이용하여 표면저항을 구할 경우 f_1 과 f_2 에서 구한 YBCO의 표면저항은 거의 같은 값을 갖게 되지만 사파이어의 $\tan \delta$ 가 음수가 되기 때문에 이 값은 신뢰할 수 없는 값이다.

본 실험 결과는 two-resonance mode 유전체 공진기 방법을 이용하여 초전도체 박막의 표면저항과 유전체의 $\tan \delta$ 를 동시에 측정할 때 다음의 사항이 확인되어야만 함을 보여준다. 즉, 공진 모드가 겹보기에 기생모드와의 결합이 없는 것처럼 보이더라도 실제로는 확인되지 않은 기생모드와의 결합에 의해 상당히 작은 Q_0 를 지닐 수 있다는 것이다. 이러한 것은 TE_{021} 모드에서 구한 표면저항 값이 TE_{012} 모드에서 구한 것과 같은 값을 지니는지를 보면 쉽게 확인할 수 있다. 실제로 Fig. 3에 제시된 각 모드의 Q_0 와 식 (4b)를 이용하여 구한 사파이어의 $\tan \delta$ 는 음의 값을 지니게 됨을 확인할 수 있었는데, 음의 $\tan \delta$ 는 물리적으로 허용되지 않는 값이다. 본 연구의 결과처럼 TE_{012} 모드가 확인되지 않은 기생모드와 결합하여 기대치보다 훨씬 작은 Q_0 를 지니는 경우 기생모드를 억제시키는 방법을 찾아서 TE_{012} 모드와 결합되지 않도록 하는 것은 한 해결책이 될 수 있다고 여겨지며, 현재 이러한 방법을 찾는 연구가 본 연구팀에 의해 시도되고 있다.

V. Conclusions

HTS 박막의 마이크로파 표면저항을 two-resonance mode 유전체 공진기법으로 정확하게 구하기 위하여 평행판 사파이어 공진기를 제작하고 이 공진기의 TE 모드 공진특성을 연구하였다. 본 공진기의 TE_{021} 모드와 TE_{012} 모드 공진주파수는 ~ 38 GHz의 값을 지니는 것으로 관측되었으며 예상과 달리 TE_{012} 모드와 TE_{021} 모드의 공진주파수에서 측정된 YBCO 박막의 표면저항이 상당히 다른 값을 지니는 것으로 나타났다. TE_{011} 모드 공진주파수에서 측정된 YBCO 박막의 표면저항을 TE_{021} 모드의 주파수

값으로 scale하여 확인한 결과 이러한 상이함은 TE_{012} 모드의 Q_0 가 확인되지 않은 기생모드와의 결합으로 인해 기대값 보다 현저히 작은 값을 갖기 때문임을 알 수 있었다. 본 결과는 two-resonance mode 유전체 공진기법을 이용하여 초전도체 박막의 표면저항을 구할 경우 반드시 확인되지 않은 기생모드와 TE_{012} 모드와의 결합을 억제하는 방법이 사용되어야 함을 보여준다.

Acknowledgments

This work was supported by Nuclear Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MEST).

References

- [1] See e.g., S. Y. Lee, J. H. Lee, J. H. Han, S. H. Moon, H. N. Lee, J. C. Booth, J. H. Claassen, "Effects of the two-gap nature on the microwave conductivity of polycrystalline MgB_2 films with the critical temperature of 39 K", Phys. Rev. B 71, 104514 (2005), and the references therein.
- [2] See e.g., S. Y. Lee and B. Oh, "Recent progress in microwave HTS technologies in Korea and Japan", J. Supercond. 16, 823-831 (2003), and the references therein.
- [3] Y Kobayashi, T Imai and H Kayano, "Microwave measurement of temperature and current dependences of surface impedance for high- T_c superconductors", IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., 39, 1530-1538 (1991).
- [4] Z Y Shen, C Wiler, P Ang, W L Holstein, D Face and D J Kountz, "High T_c Superconductor_sapphire microwave resonator with extremely high Q _values up to 90K", IEEE Trans. On Microwave Theory and Tech, 40, 2424-2432 (1992).
- [5] J Krupka et al., "Surface resistance measurements of HTS films by means of sapphire dielectric resonators", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 3, 3043-

- 3048 (1993).
- [6] J Mazierska and C. Wilker, "Accuracy issues in surface resistance measurements of high temperature superconductor using dielectric resonators", IEEE Trans. Appl. Supercond. 11, 4140 (2001).
- [7] H J Kwon, J Hur and S Y Lee, "Accurate measurements of the unloaded Q of a dielectric-loaded high-Q $TE_{01\delta}$ mode cavity resonator with HTS endplates", Progress in Superconductivity, 1 (1), 36-41 (1999).
- [8] Y Kobayashi and H. Yoshikawa, "Microwave measurements of surface impedance of high-TC superconductors using two modes in a dielectric rod resonator", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 46, 2524-2530 (1998).
- [9] J. H. Lee, W. I. Yang, M. J. Kim, J. C. Booth, K. Leong, S. Schima, D. Rudman, S. Y. Lee "Accurate measurements of the intrinsic surface impedance of thin $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ films using a modified two-tone resonator method", IEEE Trans. Applied Supercond. 15, 3700-3704 (2005).
- [10] D Kajfez and P Guillion, "Dielectric resonators", 2nd ed, Noble, Chap 5 (1998)
- [11] M. Hein, High-Temperature Superconductor Thin Films at Microwave Frequencies (Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 1999), Chap. 2.
- [12] See e.g., J. H. Lee, H. K. Han, and S. Y. Lee, "Effects of the temperature-dependent dielectric constant on the geometrical factors of dielectric resonators and the measurement accuracy in the surface resistance of superconductor films", J. Korean Phys. Soc. 47, 494-500 (2005), and the references therein.
- [13] See e.g., the website for Theva (<http://www.theva.com/>)
- [14] J. Krupka, D. Derzakowski, M. Tobar, J. Hartnett, and R. G. Geyer, Meas. Sci. Technol. 10, 387 (1999).