

Effects of Magnetic Nano-Particle Alignment on Near-Field Transmission Power Absorption of Composite Sheets

Baekil Nam*

School of General Education, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

(Received 24 October 2018, Received in final form 26 October 2018, Accepted 26 October 2018)

Power absorption of the composite composed with nonmagnetic polymer matrix and magnetic nano-particles were evaluated by the IEC standard. To investigate the effects of magnetic particle alignment on the power absorption, permeability of the composites were calculated along with alignment directions. Low fmr resonance frequency and high permeability values were shown for easy direction while high fmr resonance frequency and low permeability values were shown for hard direction. It was clearly shown that power absorption characteristics resembled the profiles of permeability for each alignment direction.

Keywords : power absorption, composite, magnetic nano-particle, shape anisotropy, alignment direction

자성 나노 입자의 정렬 방향이 복합재 시트의 근접장 전력 흡수능에 미치는 효과

남백일*

영남대학교 교양학부, 경북 경산시 대학로 280, 38541

(2018년 10월 24일 받음, 2018년 10월 26일 최종수정본 받음, 2018년 10월 26일 게재확정)

자성 나노 입자를 비자성 수지에 분산 정렬한 복합재의 근접장 흡수능을 IEC 표준에 근거하여 평가하였다. 각형비가 큰 도선형 자성 입자를 사용하였을 때 자성 입자의 정렬 방향이 흡수능에 미치는 효과를 분석하기 위해 자성 입자의 정렬 방향에 따른 투자율을 계산하였다. 자화용이 방향의 경우 낮은 공명진동수와 높은 투자율을 나타내고, 자화곤란 방향의 경우 높은 공명진동수와 낮은 투자율을 나타내었다. 이 투자율을 적용하여 전산모사를 통해 복합재의 흡수능을 평가한 결과 이러한 정렬 방향에 따른 투자율 변화가 흡수능에 동일한 형태로 재현됨을 확인하였다.

주제어 : 전자파 흡수능, 복합재, 자성 나노 입자, 형상 이방성, 정렬 방향

I. 서 론

전자기기의 고주파화와 소형화 및 무선통신 기기의 발달에 따라 전자파 에너지 및 전자기 잡음을 흡수 또는 차폐하는 방안들이 다양하게 고안되고 있다. 자성 입자를 비자성 수지에 분산시킨 얇은 유연성 시트는 적용성 및 확장성이 뛰어나서 적극적으로 연구 개발하고 있다[1,2]. 자성 복합재 시트의 전자파 차폐 및 흡수능에 영향을 미치는 요소들 중 자성 입자의 형상과 정렬 및 평가 치구의 전자기장 분포의 기하학적 관계는 매우 중요하다. 자성 입자의 이방성과 인가되는 전자

기파의 투과 각도가 투자율에 미치는 영향[3], 입자의 정렬과 측정 치구의 구조가 투자율 측정 결과에 미치는 영향 등이 연구되었다[4].

이 연구에서는 자성 복합재에 함유된 자성 입자의 정렬 방향이 전력 흡수능에 미치는 효과를 분석하였다. 전력 흡수능을 광대역화하기 위해 형상 이방성을 가지고 있는 입자를 적용할 때 정렬 방향이 미치는 영향을 고려하여야 한다. 긴 도선 형태의 자성 나노입자가 비자성 수지에 분산 정렬되어 있을 때 정렬 방향에 따라 복합재의 투자율이 달라지고 이에 따라 복합재의 전력 흡수능이 영향을 받게 된다. 입자 정렬 방향에 따른 투자율 계산 방법을 찾고 이를 적용하여 상용 전자기 해석 도구를 사용하여 복합재 시트의 전력 흡수능을 분석하였다.

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-53-810-7837,

Fax: +82-53-810-4755, e-mail: binam@ynu.ac.kr

II. 이론 및 전산모사 모델

자성 금속 입자의 마이크로파 영역에서 투자율 특성은 자화 동역학을 기술하는 Landau-Lifshitz-Gilbert 식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma(\vec{M} \times \vec{H}) + \frac{\alpha}{M} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \quad (1)$$

\vec{M} 은 자화(magnetization), \vec{H} 는 전체 자기장으로 내부의 자기 결정 이방성(magnetocrystalline) 자기장과 형상 이방성(shape anisotropy)에 의한 자기 소거장(demagnetization field), 외부에서 가해지는 정자기장 및 마이크로파 자기장을 모두 포함하며, γ 는 자기 회전비(gyromagnetic ratio)로 2.8 MHz/Oe이고, α 는 감쇠 상수이며 실험 자료로부터 정해진다. 이 연구에서는 자화와 외부 자기장 및 형상 이방성 자기장 등의 각도 의존성을 모두 고려하는 복잡성을 피하기 위해 자기 결정 이방성 자기장과 마이크로파 자기장만을 고려하여 물질 고유(intrinsic)의 투자율을 먼저 구하고 입자의 형상에 의한 자기 소거장 효과는 복합재의 투자율을 구하는 유효 매질 근사(effective medium approximation) 과정에 포함하여 다루도록 한다.

자기장 $H = H_k + h e^{j\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}}$ 에서 H_k 는 자기 결정 이방성 자기장으로 z 축 방향이고 h 는 마이크로파에 의한 교란으로 z 축에 수직인 방향이다. 자화 $M = M_s + m e^{j\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}}$ 에서 M_s 는 포화자화(saturation magnetization)이고 m 은 마이크로파에 의한 교란이다. H 와 M 을 식(1)에 대입하여 투자율 텐서의 마이크로파 방향 성분을 구하면 다음과 같다[5].

$$\mu = 1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (2)$$

여기서 $\omega_0 = \gamma H_k$, $\omega_m = \gamma M_s$ 이고 감쇠를 고려하면 ω_0 는 $\omega_0 + i\alpha\omega$ 로 변환되어야 한다. 자기 소거장을 고려하지 않았기에 이 투자율은 형상과 관계없는 물질 고유의 투자율이다.

물질 고유의 투자율이 주어진 자성 물질이 특정 형상으로 제조되어 복합재에 함유된 경우에 대해 Lin 등은 자성 물질의 투자율 μ 와 자기 소거 인자(demagnetizing factor) N 및 함유율 p 에 따른 복합재의 유효 투자율 μ_{eff} 을 아래 서술한 바와 같이 구하였다[6].

n 개의 자성 입자가 비자성 수지(non-magnetic polymer matrix)에 함유된 복합재에서 외부 자기장 H_e 방향의 유효 자화 M_{eff} 는 다음과 같다.

$$M_{eff} = \sum_1^n M_i p_i \quad (3)$$

여기서 M_i , p_i 는 각각 i 번째 입자의 자화와 함유율(volume fraction)이다. 식(3)을 복합재와 입자의 자기 선속 밀도(magnetic flux density) B_{eff} 와 B_i 로 나타내면,

$$B_{eff} - H_e = \sum_1^n (B_i - H_i) p_i \quad (4)$$

이때 H_i 는 i 번째 입자 내부 자기장 세기이며 외부 자기장과 소거 자기장의 차이로 주어진다.

$$H_i = H_e - H_{d,i} \quad (5)$$

입자의 함유율이 높지 않아 입자 사이의 상호작용을 고려하지 않아도 된다면 소거 자기장은 입자의 형상에 의한 소거 자기 인자와 자화의 곱으로 $H_{d,i} = N_i M_i$ 이다. 투자율이 외부 자기장의 세기에 대한 자기선속밀도의 비로 주어지므로 $\mu_{eff} = B_{eff}/H_e$ 와 $\mu_i = B_i/H_i$ 은 각각 복합재의 유효 투자율과 입자의 투자율이다. 식(4)를 투자율로 다시 표현하면

$$\mu_{eff} = 1 + \sum_1^n (\mu_i - 1) \frac{H_e - H_{d,i}}{H_e} p_i \quad (6)$$

인데, $B = 4\pi M + H$ 관계와 모든 입자가 동일한 형상으로 배열되어 있다고 가정하고 복합재의 유효 투자율에 대한 다음 최종 관계식을 구하였다.

$$\mu_{eff} = 1 + \frac{4\pi(\mu - 1)}{4\pi + N(\mu - 1)} p \quad (7)$$

좌표계 주축 방향의 자기 소거 인자의 합은 CGS 단위계에서 $N_a + N_b + N_c = 4\pi$ 이다.

자성 복합재의 입자 형상으로 많이 연구되고 있는 원통형 입자에 대해 이 결과를 적용하여 외부 자기장 방향에 따른 투자율을 구하였다. 지름에 대한 길이의 비인 각형비(aspect ratio)가 매우 큰 도선형 입자의 경우 길이 방향의 자기 소거 인자는 무한 길이 입자의 경우에 근사하게 영에 가깝다. 도선형 입자의 길이 방향은 자기 소거장이 영이므로 자화용이(easy) 방향이라 하고, 길이에 대해 수직인 두 방향은 자화곤란(hard) 방향이라 하겠다. 마이크로파 자기장이 자화용이 방향으로 가해지는 경우 $N = N_c \approx 0$ 이므로 식(7)에 대입하면 자화용이 방향에 대한 투자율은 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_{eff} = 1 + (\mu - 1)p \quad (8)$$

외부 자기장이 자화곤란 방향으로 인가되는 경우 자기 소거 인자 $N = N_a = N_b \approx 2\pi$ 를 식(7)에 대입하면 투자율은 다음과 같다.

$$\mu_{eff} = 1 + \frac{2(\mu - 1)}{\mu + 1} p \quad (9)$$

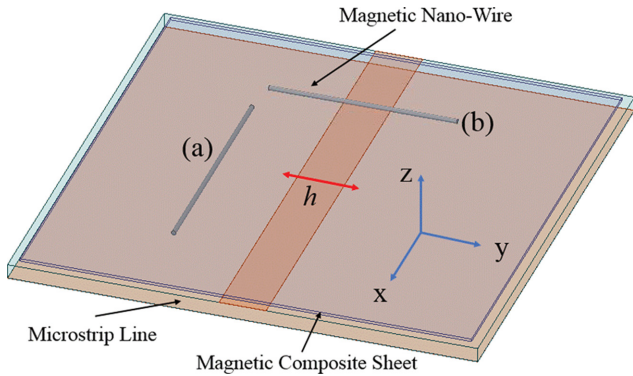


Fig. 1. (Color online) Schematic diagram of IEC standard microstrip line and the sheet under test. The size of the nano-wire are exaggerated to show alignment direction clearly.

도선형 자성 나노입자를 함유한 복합재 시트의 입자 정렬 방향이 근접장 전력 흡수능에 미치는 영향을 평가하기 위한 전산모사 모형을 Fig. 1에 나타내었다. 근접장 전력 흡수능 평가는 이전의 연구에서와 동일하게 IEC62333-2 표준에 의한 마이크로스트립라인 평가법을 적용한 모형을 설정하였다 [7]. 그림에서 자성 나노 입자의 크기는 정렬 방향을 표시하기 위해 과장하여 나타내었다. 전송선이 x축 방향이므로 전송선 위의 복합재 시트 위치에서 자기장 h 의 방향은 y축 방향이 된다. 형상 이방성을 나타내는 자성입자인 도선형 입자 인 경우 각 방향으로 투자율이 다르게 나타난다. 자성입자의 정렬 방향이 (a)와 같이 전송선에 나란한 경우 자화곤란 방향으로 외부 자기장이 가해진다. 이러한 정렬을 곤란방향이라 하겠다. 자성입자의 y축과 z축 방향 자기장은 식(9)에 주어진 자화곤란 방향 투자율을 적용하고 x축 방향은 식(8)의 자화용이 방향 투자율을 적용하였다. 정렬방향이 (b)와 같이 전송선에 수직인 경우 자화용이 방향으로 외부 자기장이 가해진다. 이 정렬방향을 용이방향이라 하겠다. 따라서 이 입자의 y축 방향 투자율은 용이방향 투자율 식(8)을 x축과 z축 방향 투자율은 곤란방향 투자율 식(9)를 각각 적용하였다.

III. 결과 및 논의

도선형 자성 나노입자의 자성 특성은 문헌을 참고하여 철 또는 코발트의 자성과 유사하도록 결정 이방성 자기장은 $\mu_0 H_k$ 가 0.05 T, 포화자화는 $\mu_0 M_s$ 가 2 T가 되도록 정하였다 [8]. 이 경우 낮은 진동수에서 투자율 $M_s/H_k + 1$ 은 41이다. 이 자료를 적용하여 물질의 고유 투자율을 10 GHz까지 구하면 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 낮은 진동수 투자율은 41이고 공명진동수 1.4 GHz인 감자성 공명 곡선을 보이고 있다.

이 물질로 만든 각형비가 100 이상으로 충분히 긴 도선형 나노 입자를 비자성 수지에 섞어 복합재를 만들었을 때 유효

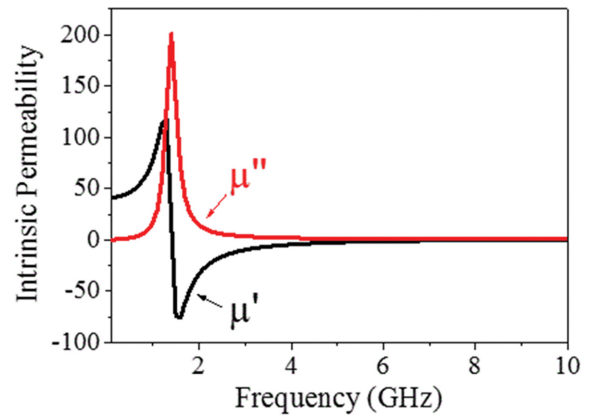


Fig. 2. (Color online) Intrinsic permeability of magnetic material studied here.

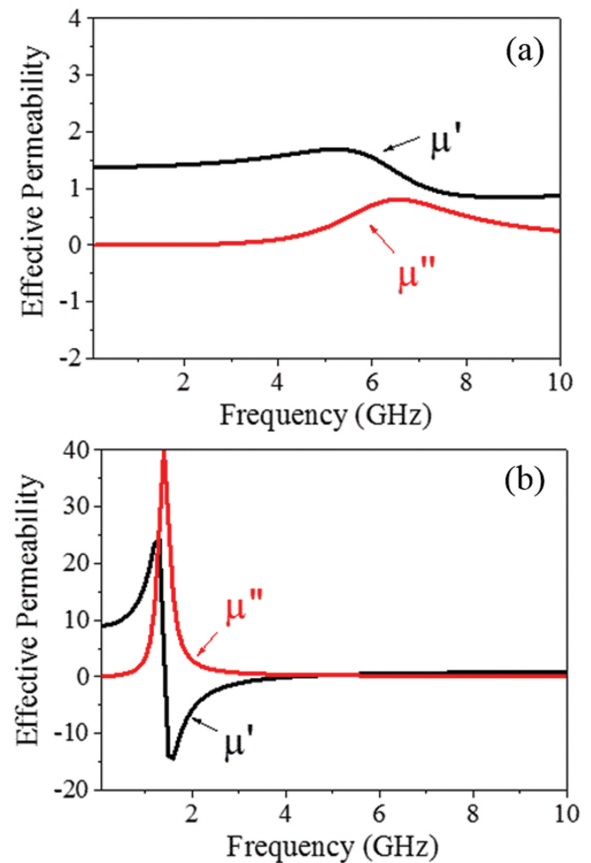


Fig. 3. (Color online) Effective permeability of the composite with magnetic particles aligned in (a) hard direction and (b) easy direction.

투자율은 Fig. 3에 보였다. 이때 자성 입자의 함유율은 입자 사이의 자기적 상호작용을 고려하지 않아도 되도록 20 vol% 정도로 낮게 설정하였다. 자성 입자의 정렬 방향에 따라 유효 투자율은 다른 특성을 나타내고 있다. 그림에서 (a)와 (b)의 세로축은 크기 비가 10배임을 유의하여야 한다. Fig. 3(a)는 자성 입자의 정렬 방향이 Fig. 1(a)와 같이 곤란방향으로

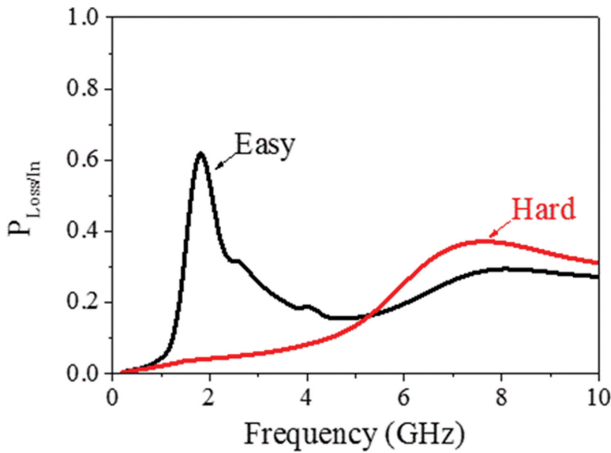


Fig. 4. (Color online) Power loss of the composites along with magnetic particle alignment.

외부 자기장이 걸리는 경우이다. 이 경우 큰 자기 소거인자로 인해 공명 진동수는 커지고 투자율은 낮아진다. 낮은 진동수에서 투자율 1.4를 보이고 공명 진동수는 6.5 GHz이다. Fig. 3(b)는 정렬 방향이 Fig. 1(b)와 같아서 용이방향으로 외부 자기장이 인가되는 경우이다. 이 경우 자기 소거 인자는 매우 작고 따라서 공명 진동수는 낮고 투자율은 크게 나타난다. 공명 진동수는 1.4 GHz에서 나타나고 낮은 진동수 투자율은 9이다.

앞에서 계산한 투자율을 적용한 100 μm 두께를 가진 48 mm × 48 mm 크기의 복합재 시트가 나타내는 근접장 전력 흡수능 평가 결과는 Fig. 4와 같다. 전력 흡수능은 입사 전력에 대한 복합재에 의한 손실 전력의 비이며 $P_{Loss/In} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ 로 주어진다. 여기서 산란인자 S_{11} 과 S_{21} 은 이 모형을 상용 전자기 해석 프로그램(Ansys HFSS)을 사용하여 해석한 결과로부터 얻을 수 있다. 전자기 해석에 요구되는 다른 물성들은 다음과 같다. 복합재의 유전율은 실수부 10, 허수부 0.5로 주파수에 관계없이 일정하게 적용하였다. 복합재의 전기 전도도의 경우 일반적인 수치들이 비전도성 물질이고 전도성 자성 금속 입자를 소량으로 함유하여도 유효 전기 전도도는 크게 증가하지 않는다. 자성 금속입자의 함유량이 증가하면 입자들이 형성하는 전도성 네트워크에 의한 손실이 크게 작용하겠지만 여기서는 고려하지 않았다.

자성 입자 정렬 방향에 따른 전력 흡수능 특성은 각 정렬 방향의 투자율 곡선과 유사한 형태를 보이고 있어서 정렬 방향에 따른 투자율의 차이가 전력 흡수능에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 용이방향으로 정렬된 경우 2 GHz 근처의 낮은 주파수 영역에서 흡수능이 크게 증가하는 모습을 보이며 이것은 투자율이 1.4 GHz에서 공명 현상을 보인 것의 직접적인 결과라고 할 수 있다. 곤란방향의 경우도 6.5 GHz 공

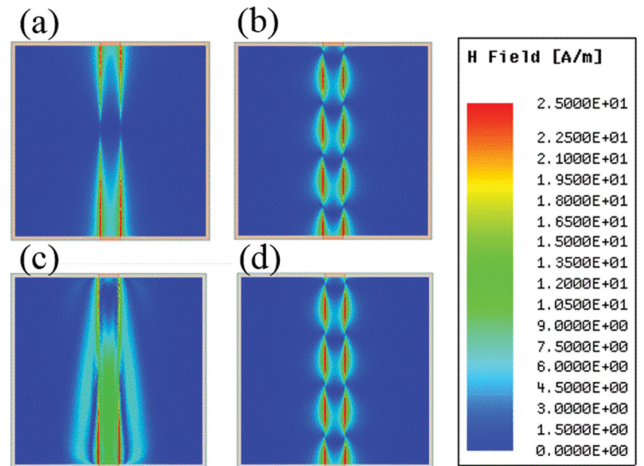


Fig. 5. (Color online) Magnetic field distributions on bottom surfaces of the composites.

명 진동수 이후에 흡수능이 증가하는 모습을 보이고 있다. 다만 용이방향의 투자율에 비해 곤란방향에서는 낮은 투자율을 보이지만 흡수능은 그렇게 낮게 나타나지 않는다. 이것은 전력 흡수능이 주파수에 선형적으로 비례하는 성질을 가지고 있어서 높은 주파수에서 공명 현상을 보이는 경우 낮은 투자율이라도 흡수능은 크게 나타날 수 있다는 특성을 보여주고 있다[9].

자성 입자의 정렬방향에 따른 복합재의 전력 흡수능 특성은 복합재의 자기장 분포를 통해서도 분석할 수 있다. Fig. 5는 전송선 바로 위의 복합재 아랫면에서 자기장 분포를 주파수와 정렬 방향에 따라 나타낸 것이다. (a)와 (c)는 용이방향 공명 진동수 근처인 1.8 GHz, (b)와 (d)는 곤란방향 공명진동수 근처인 7.6 GHz에서 자기장 분포이다. (a)와 (b)는 곤란방향으로 정렬된 경우의 자기장 분포이고 (c)와 (d)는 용이방향으로 정렬된 경우의 자기장 분포이다. 용이방향 공명 진동수인 (c)에서 용이방향을 따라 자기장이 시트에 넓게 확산되는 모습은 곤란방향인 (a)의 경우와 확연히 구별되는 분포를 보여주고 있다. 곤란방향 공명 진동수인 (b)에서는 낮은 투자율에 의해 (c)에서와 같이 자기장이 확산되는 분포를 보이지 못하고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

자성 나노입자를 함유한 복합재 시트에서 자성 입자의 정렬방향이 복합재의 전지와 흡수능에 영향을 미치는 영향을 분석하였다. 정렬 방향에 따라 자성 나노입자의 형상에 따른 자기 소거인자를 고려한 복합재의 유효 투자율을 계산하였다. 이 투자율을 적용한 복합재의 전력 흡수능을 전산모사를 통해 평가 분석하였다. 도선형 자성 입자의 경우 자화 용이방

향으로는 낮은 공명진동수와 높은 투자율을 나타내고 자화 곤란방향으로는 높은 공명진동수와 낮은 진동수를 보이고 있고 이러한 특성이 복합재 전력 흡수능에 그대로 재현되고 있다. 따라서 자성 나노입자를 함유한 복합재를 전자파 흡수를 위해 사용하는 경우 자성 입자의 정렬이 복합재의 동작 특성에 영향을 미치고 있음을 감안하여 복합재를 설계하여야 함을 알 수 있다. 이러한 논의를 더 진전시킨다면 전력 흡수능뿐만 아니라 복합재의 투자율이나 유전율의 측정에서도 자성 입자의 정렬과 측정용 치구의 전기장과 자기장 분포 특성이 어떻게 측정 결과에 영향을 미치는지 이해할 수 있을 것으로 보인다.

References

- [1] J. Lee, S. H. Cho, S. Yoon, and K. H. Kim, *J. Appl. Phys.* **115**, 17A503 (2014).
- [2] J. Lee and K. H. Kim, *New Phys.: Sae Mulli* **64**, 117 (2014).
- [3] L. Z. Wu, J. Ding, H. B. Jiang, and C. P. Neo, *J. Appl. Phys.* **99**, 083905 (2006).
- [4] T. Kasagi, H. Massango, T. Tsutaoka, S. Yamamoto, and K. Hatakeyama, *Proceeding of Metamaterials 2016, IEEE* (2016) pp. 157~159.
- [5] L. Z. Wu, J. Ding, C. P. Neo, L. F. Chen, and C. K. Ong, *Phys. Stat. Sol (a)* **204**, 755 (2007).
- [6] G. Q. Lin, Z. W. Li, L. Chen, Y. P. Wu, and C. K. Ong, *J. Magn. Magn. Mater.* **305**, 291 (2006).
- [7] J. Lee, K. H. Kim, and B. Nam, *New Phys.: Sae Mulli* **66**, 407 (2016).
- [8] R. Ramprasad, P. Zurcher, M. Petras, and M. Miller, *J. Appl. Phys.* **96**, 519 (2004).
- [9] D. M. Pozar, *Microwave Engineering* 2nd Edition, Wiley (1997), Chap 1.