

电导率对纳米磁性金属膜微波吸收性能的影响

邓联文^{1,2}, 周克省¹, 江建军², 冯则坤²

(1. 中南大学 物理科学与技术学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 华中科技大学 电子科学与技术系, 湖北 武汉, 430074)

摘要: 基于纳米金属膜电导率和介电性的理论基础, 采用 0.05~5 GHz 宽频带扫频测量所得的复磁导率, 计算分析电导率对具有不同微波磁谱特性的纳米磁性金属膜吸波性能的影响。研究表明: 具有较高磁导率的纳米磁性膜, 当其电导率低于 100 S/m 时, 该薄膜材料在微米级厚度时就具有良好的吸波性能, 即在 0.05~5 GHz 的宽频段反射率小于 -4 dB; 降低薄膜电导率可以显著改善薄膜吸波材料的电磁匹配性能, 从而提高其吸波性能。

关键词: 纳米磁性膜; 电导率; 电磁匹配; 吸波性能

中图分类号: TM271

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2008)01-0059-05

Influence of conductivity on microwave absorbing ability of nanostructural magnetic metallic film

DENG Lian-wen^{1,2}, ZHOU Ke-sheng¹, JIANG Jian-jun², FENG Ze-kun²

(1. School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the matching requirement of complex permeability and permittivity for the thin film absorber, the effect of conductivity on microwave absorbing ability of the nanostructural magnetic metallic films was analyzed according to the measured complex permeability in 0.05~5 GHz. The results show that the films with large permeability can present good microwave absorbing ability (reflection less than -4 dB) if the value of conductivity is less than 100 S/m. Electromagnetic matching capability becomes better and microwave absorption gets enhanced for the films with smaller conductivity.

Key words: nanostructural magnetic film; conductivity; electromagnetic matching; microwave absorption

吸波材料技术作为一种常用的抗电磁干扰手段, 能够把电磁污染产生的无用和有害电磁能量吸收、转换而衰减掉。纳米磁性吸波材料能有效减薄吸波涂层厚度和展宽带宽, 因此具有明显优势^[1]。纳米磁性合金薄膜由于具有强形状各向异性和高饱和磁化强度, 在微波频段可获得高磁导率和大磁损耗^[2-3]。研究表明^[4-7], 金属磁性纳米膜(纳米晶膜, 纳米多层膜和纳

米颗粒膜)自然共振频率在 0.1~10 GHz 之间, 共振峰附近磁导率实部、虚部均可高于 100, 影响共振频宽的磁损耗因子在 0.001~0.1 之间。纳米磁性薄膜有望成为新一代超薄型吸波材料, 已引起国内外研究者的关注^[8-9]。

有关纳米磁性膜高频性能研究已取得不少成果, 但主要是针对低于 2 GHz 频率影响薄膜电磁性能相关

收稿日期: 2007-04-05; 修回日期: 2007-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60771028)

作者简介: 邓联文(1969-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 从事电磁波吸收材料研究

通信作者: 邓联文, 男, 博士, 副教授; 电话: 13574125176; E-mail: dlw626@163.com

因素的试验研究,应用对象主要是薄膜磁头、微型电感等微磁器件。有关磁损耗型金属磁性纳米膜的介电性和电导率对其微波吸收性能的影响问题,还未见文献报道。为此,本文作者针对金属磁性纳米膜的电磁性能匹配问题,计算分析电导率对吸波性能的影响。

金属也具有介电性,金属磁性纳米膜相比金属块体材料,电导率大幅度降低^[10-12],与之密切相关的介电常数也大幅度下降,但一般还比磁导率高2个数量级。由于纳米金属膜微波介电常数的测量技术还不能得到应用,而金属薄膜电导率测量技术较成熟,并且电导率与介电常数直接关联,因此,研究探讨电导率对金属磁性纳米膜微波吸收性能的影响规律,对研制超薄型薄膜吸波材料具有重要意义。

1 计算模拟方法

理论分析表明,多层层状结构吸波材料的吸波性能主要取决于各层材料的电磁参量(磁导率和介电常数)。超薄型吸波材料一般采用由纳米磁性金属膜和电介质层构成的纳米多层膜周期结构,各单层厚度一般都在纳米范围,因此,可以把周期结构的纳米多层膜复合结构视为一种等效媒质^[13],得到等效电磁参量,就可以把纳米多层膜中电磁波传输问题近似简化为单层等效媒质中的电磁波传输问题,对计算分析有关问题带来很大方便。因此,本文的计算以单层薄膜为模型,所得结果对薄膜型吸波材料都具有参考意义。

通常,以铁、钴、镍为主要成分的金属磁性纳米膜是金属性材料,其最小电导率可由 Mott 提出的最小金属化电导率理论进行估算。Mott 根据 Ioffe-Regell 提出的原理,即金属性材料中电子的平均自由程 L 不能小于原子间距 a ,得到最小电导率 $\sigma_{\min} \approx 10^5$ S/m。

该理论值与现有的非晶态金属材料的电阻率测量值基本相符,相应的最大电阻率 ρ_{\max} 约为 $1 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ 。实际金属磁性纳米膜的电阻率比金属块体材料的电阻率大为提高,一般为 $10^{-3}\sim 10 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 。根据 Drude 关系式,与电导率对应的介电常数为:

$$\tilde{\varepsilon}_{rf} = -j \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega (\omega + j\omega\tau)} = -\frac{\sigma_0 \tau}{\varepsilon_0 (1 + \omega^2 \tau^2)} - j \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega (1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (1)$$

在微波频段,频率为 1 GHz 时,通常极化弛豫时间 τ 约为 10^{-14} s ,因此, $\varepsilon_{rf}'' \approx 10^6$ 。由于 ε_{rf}'' 很大, $\tilde{\mu}$

和 $\tilde{\varepsilon}$ 之间的数值差很大,故一般情形下纯金属磁性纳米膜的反射率较高。可见,要把金属磁性纳米膜用于微波吸收,必须大幅度降低其介电常数。

根据 Drude 关系式,改变薄膜介电常数最直接的方法是增大材料的电阻率(亦即降低材料的电导率),从而减小与传导电流相应的介电常数。下面通过数值计算进一步分析讨论电导率和介电常数对磁性纳米膜吸波性能影响的规律和特点。磁导率取实际样品在 $0.05\sim 5 \text{ GHz}$ 频段用微带短路扫频法^[14]测得的频谱数据,电导率 σ 分别为 $10, 100$ 和 1000 S/m (相应的电阻率 ρ 分别为 $10, 1, 0.1 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$),介电常数则只计及与传导电流相关的部分,相应的介电常数为:

$$\tilde{\varepsilon} = 1 - j \frac{\sigma}{\omega(1 + j\omega\tau)}, \quad \tau = 10^{-14} \text{ s} \quad (2)$$

当在空气中传播的电磁波遇到由介电常数为 $\tilde{\varepsilon}$ 、磁导率为 $\tilde{\mu}$ 的材料构成的界面时,其反射系数为:

$$R = \frac{|Z-1|^2}{|Z+1|^2} = \frac{\left[\sqrt{\frac{|\tilde{\mu}|}{|\tilde{\varepsilon}|}} \cos\left(\frac{\alpha_\mu - \alpha_\varepsilon}{2}\right) - 1 \right]^2 + \left[\sqrt{\frac{|\tilde{\mu}|}{|\tilde{\varepsilon}|}} \sin\left(\frac{\alpha_\mu - \alpha_\varepsilon}{2}\right) \right]^2}{\left[\sqrt{\frac{|\tilde{\mu}|}{|\tilde{\varepsilon}|}} \cos\left(\frac{\alpha_\mu - \alpha_\varepsilon}{2}\right) + 1 \right]^2 + \left[\sqrt{\frac{|\tilde{\mu}|}{|\tilde{\varepsilon}|}} \sin\left(\frac{\alpha_\mu - \alpha_\varepsilon}{2}\right) \right]^2} \quad (3)$$

功率反射系数 $R_e = 20 \lg |R|$ 。其中, $Z = \sqrt{\frac{\tilde{\mu}}{\tilde{\varepsilon}}}$, 为材料的阻抗; α_μ 和 α_ε 分别为磁导率和介电常数的损耗角。

假定由金属纳米磁性膜(厚度通常小于 $1 \text{ }\mu\text{m}$)构成 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 厚的单层薄膜吸波材料,根据上述功率反射系数计算公式,计算模拟金属磁性纳米膜电导率对其吸波性能的影响。

2 结果与讨论

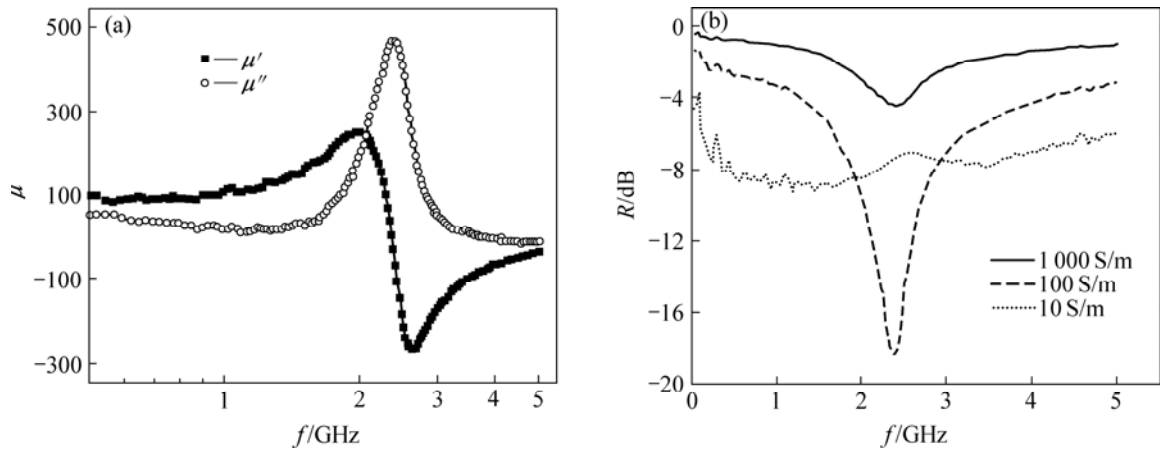
图 1 所示为实验测得的纳米晶 FeCoNbZr 薄膜的典型共振型磁谱和不同电导率时该类薄膜吸波性能的计算结果。图中 μ' 为磁导率的实部; μ'' 为磁导率的虚部。可见,当电导率为 10 S/m 时,在 $0.05\sim 5 \text{ GHz}$ 宽频范围具有良好的吸波性能;电导率为 100 S/m 时,在 2.4 GHz 处有一强吸收峰,但频带窄;电导率为 1000 S/m 时,在 2.5 GHz 处有一较弱的吸收峰,在该频段内吸波性能显著降低。

图 2 所示为呈弛豫型复磁导率频谱特性的 FeCoNbZrDy 纳米晶膜和电导率对其吸波性能的影响。可见, 当电导率为 10 S/m 时, 在 0.05~5 GHz 宽频范围具有良好吸波性能, 峰值处小于 -30 dB; 电导率为 100 S/m 时, -4 dB 的带宽较宽; 随着电导率增高, 吸波性能显著降低。

图 3 所示为添加少量 SiO₂(体积分数约为 10%)形成的 FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜的磁谱和不同电导率(假定)对薄膜吸波性能的影响。可见, 掺入少量 SiO₂ 对纳米膜磁谱产生一定影响, 电导率对吸波性能的影响与纳米晶膜的趋势大体一致, 但不同电导率时薄膜的吸收峰位置发生明显变化, 可能与纳米颗粒膜中金属纳米颗粒间强交换耦合作用有关。

图 4 所示为共振频率明显提高(3.5 GHz)的 FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜的磁谱和不同电导率(假定)对薄膜吸波性能的影响。可见, 随着电导率大幅降低(电阻率的大幅提高), 吸波性能显著改善, 吸收峰值处对应频率在 3.5 GHz 附近, 与共振频率基本一致; 颗粒膜中电介质 SiO₂ 含量增多导致磁导率明显降低(小于 50), 但只要获得较高的电阻率, 纳米膜仍可保持良好的吸波性能。

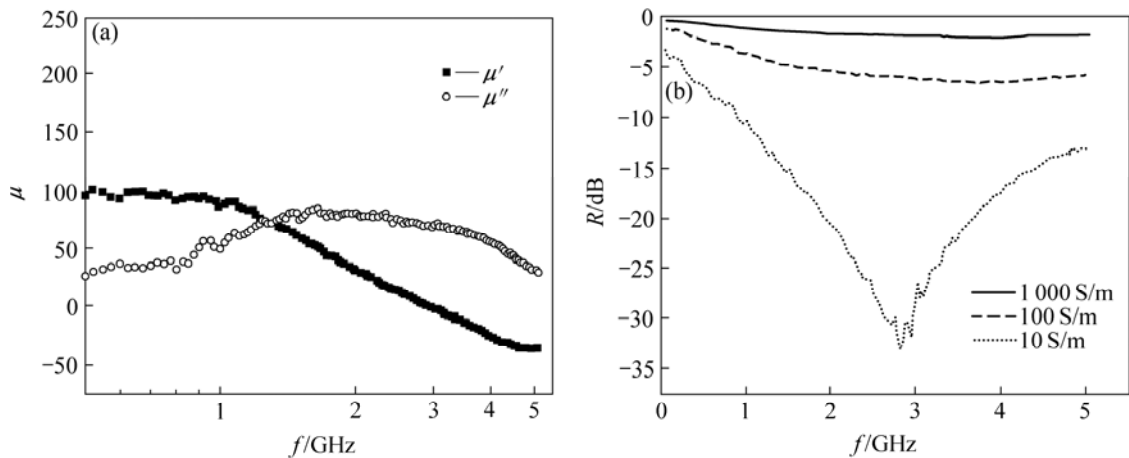
图 5 所示为磁各向异性异常导致的 FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜的多峰型磁谱和电导率对这类薄膜吸波性能的影响。可见, 在与 2 个共振频率对应处的频率点都出现吸收峰, 降低电导率(提高电阻率)对提高薄膜吸波性能仍具有显著作用。



(a) 共振型 FeCoNbZr 纳米晶膜磁谱; (b) 电导率对共振型 FeCoNbZr 纳米晶膜吸波性能的影响

图 1 共振型 FeCoNbZr 纳米晶膜磁谱及其不同电导率时的吸波性能

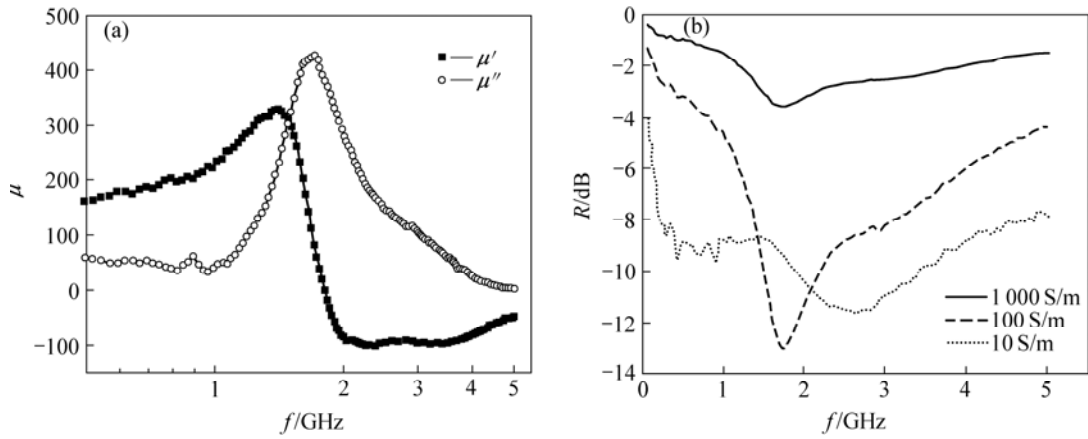
Fig.1 Complex permeability spectra and microwave absorbing ability of resonant FeCoNbZr nanocrystalline film with different conductivities



(a) 弛豫型 FeCoNbZrDy 纳米晶薄膜磁谱; (b) 电导率对弛豫型 FeCoNbZrDy 纳米晶膜吸波性能的影响

图 2 弛豫型 FeCoNbZrDy 纳米晶薄膜磁谱及其不同电导率时的吸波性能

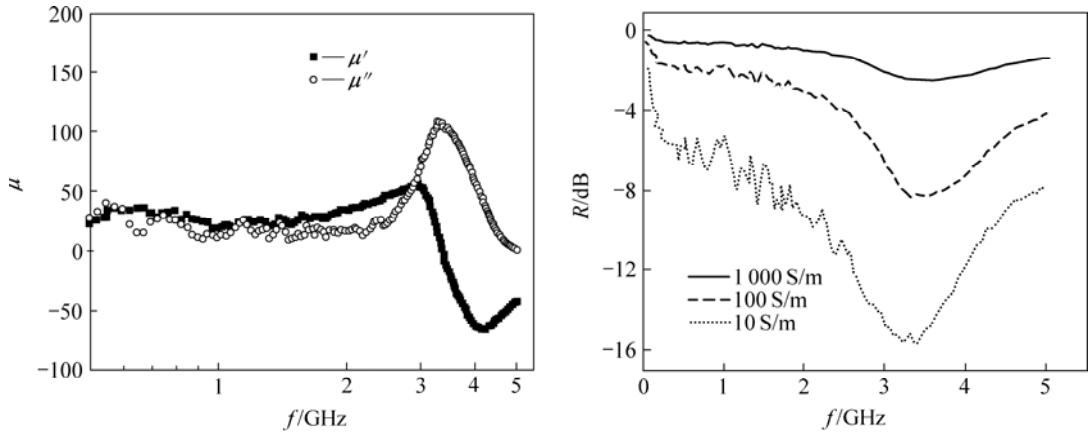
Fig.2 Complex permeability spectra and microwave absorbing ability of relaxed FeCoNbZrDy nanocrystalline film with different conductivities



(a) FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜磁谱; (b) 电导率对 FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜吸波性能的影响

图 3 FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜磁谱及其不同电导率时的吸波性能

Fig.3 Complex permeability spectra and microwave absorbing ability of FeCoNbZr-SiO₂ nano-granular film with different conductivities

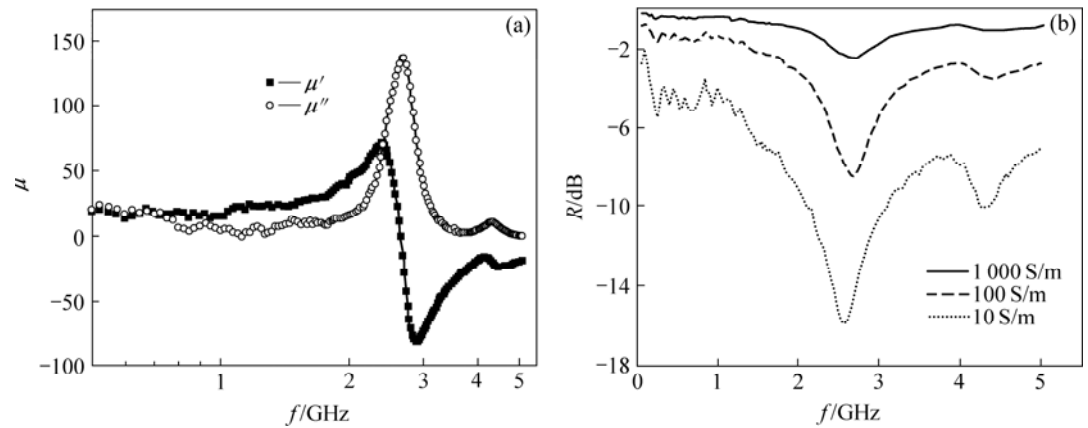


(a) 共振频率较高的 FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜磁谱;

(b) 电导率对共振频率较高的 FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜吸波性能的影响

图 4 共振频率较高的 FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜磁谱及其不同电导率时的吸波性能

Fig.4 Complex permeability spectra and microwave absorbing ability of FeCoNbZr-SiO₂ nano-granular film at high resonant frequency with different conductivities



(a) 双共振峰的 FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜磁谱; (b) 电导率对双共振峰型 FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜吸波性能的影响

图 5 双共振峰的 FeCoNbZr-SiO₂ 纳米颗粒膜磁谱及其不同电导率时的吸波性能

Fig.5 Complex permeability spectra and microwave absorbing ability of FeCoNbZr-SiO₂ nano-granular film at two resonant peaks and with different conductivities

上述计算结果表明, 金属磁性纳米膜的磁谱特性不同时, 电导率对薄膜材料吸波性能的影响规律有差异, 但降低电导率均能显著提高薄膜材料的吸波性能。

3 结论

a. 对于高磁导率金属磁性纳米膜, 当电导率低于 100 S/m 时, 10 μm 厚的吸波材料具有良好吸波性能, 即在 0.05~5 GHz 的宽频段反射率小于-4 dB。

b. 对弛豫型 FeCoNbZrDy 纳米晶膜, 电导率为 10 S/m 时, 在 0.05~5 GHz 宽频范围具有良好吸波性能, 峰值处小于-30 dB; 对共振型的纳米晶膜或纳米颗粒膜, 在对应共振频率附近有较强的吸收峰, 随着电导率降低, 宽频带吸波性能明显提高。

c. 电导率和微波磁导率共同决定金属磁性纳米膜微波吸收曲线特点, 有利于设计宽频带超薄型吸波材料。

参考文献:

- [1] 何华辉. 关于积极开展纳米吸波材料研究的若干建议[R]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
HE Hua-hui. Proposal about investigation on nanometer absorbing materials[R]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2001.
- [2] Yoshida S, Ono H, Ando S, et al. High-frequency noise suppression in downsized circuits using magnetic granular films[J]. IEEE Transaction on Magnetism, 2001, 37(4): 2401-2403.
- [3] Liu X M, Rantschler J O, Alexander C, et al. High-frequency behavior of electrodeposited Fe-Co-Ni alloys[J]. IEEE Transaction on Magnetism, 2003, 39(5): 2362-2364.
- [4] Ikeda K, Kobayashi K, Ohta K, et al. Thin-film inductor for gigahertz band with CoFeSiO-SiO₂ multilayer granular films and its application for power amplifier module[J]. IEEE Transaction on Magnetism, 2003, 39(5): 3057-3061.
- [5] Perrin G, Peuzin J C, Acher O. Control of the resonance frequency of soft ferromagnetic amorphous thin films by strip patterning[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81 (8): 5166-5168.
- [6] Shin J M, Kim Y M, Kim J, et al. Fabrication of nanocrystalline Fe-Co-Ta-N magnetic films with high saturation magnetization and excellent high-frequency characteristics[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(10): 6677-6679.
- [7] Kim K H, Jeong J H, Kim J, et al. High moment and high frequency permeability Fe-B-N nanocrystalline soft magnetic films[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Material, 2002, 239: 487-489.
- [8] Korenivski V, Dover R B. Magnetic films for GHz applications[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(8): 4878-4880.
- [9] 邓联文, 江建军, 冯则坤, 等. 高磁损耗型纳米多层膜研究[J]. 华中科技大学学报, 2004, 32(11): 67-70.
DENG Lian-wen, JIANG Jian-jun, FENG Ze-kun, et al. High magnetic loss nano-multilayer film for control of EMI[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2004, 32(11): 67-70.
- [10] 方俊鑫, 殷之文. 电介质物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
FANG Jun-xin, YIN Zhi-wen. Dielectric physics[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [11] Pennelli G. Conduction of metal-isolator-semiconductor structures with granular silicon thin films [J]. Thin Solid Films, 1999, 348(1/2): 157-164.
- [12] 周继承, 晏建武, 田 莉. 热处理对离子束溅射Ni-Cr薄膜性能和结构的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(5): 837-840.
ZHOU Ji-cheng, YAN Jian-wu, TIAN Li. Influence of rapid thermal process on the structure of and properties of Ni-Cr thin films fabricated by ion beam sputtering[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(5): 837-840.
- [13] Lagarkov A N, Sarychev A K, Smychkovich Y R, et al. Effective medium theory for microwave constant and magnetic permeability of conducting stick composites[J]. Journal of Electromagnetic Waves Application, 1992, 6(9): 1159-1176.
- [14] 彭显旭, 江建军, 张秀成, 等. 微带法测试薄膜 0.5~5 GHz 频段磁导率[J]. 功能材料, 2006, 37(2): 191-192.
PENG Xian-xu, JIANG Jian-jun, ZHANG Xiu-cheng, et al. A broad-band measurement for determining the complex permeability of thin films in 0.5-5 GHz using microstrip line method[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(2): 191-192.