

特约专栏

尖晶石结构磁介电材料的研究进展

王 棋, 张怀武, 金立川, 唐晓莉, 钟智勇

(电子科技大学 电子薄膜与器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘 要: 随着通信技术的发展, 对无限通信设备的集成度有了更高的要求, 天线小型化成为目前重要的研究方向。等磁介电材料是一种既具有磁导率又具有介电常数, 且磁导率和介电常数几乎相等的材料, 使用等磁介电材料作为天线的基板, 能有效的减小天线的尺寸, 提高带宽, 增加辐射效率。铁氧体是由 Fe_2O_3 和一种或多种金属氧化物复合而成, 具有较高的磁导率和介电常数, 由于其同时具有磁特性和介电特性, 是一种潜在的等磁介电材料。综述了近几年尖晶石结构磁介电材料的国内外研究进展, 着重讨论了掺杂改性对烧结温度、磁导率、介电常数、直流电阻等电磁特性的影响。最后指出目前研究中存在的问题, 并展望了该材料在未来发展的方向。

关键词: 磁介电材料; 磁导率; 介电常数

中图分类号: TM271 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2012)07-0037-05

Research Progress in Magneto-Dielectric Materials with Spinel Structure

WANG Qi, ZHANG Huaiwu, JIN Lichuan, TANG Xiaoli, ZHONG Zhiyong

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054)

Abstract: With developing of the communication technology, wireless communication systems have created an increased demand for being compact, antenna miniaturization attract much interest these years. Magneto-dielectric materials have almost equal values of real permeability and permittivity. Magneto-dielectric as a substrate for antennas is to miniaturize the size and enhance the bandwidth as well as radiation efficiency. Ferrite is a potential magneto-dielectric which possesses both magnetic and dielectric property simultaneously. Ferrites are materials in which Fe_2O_3 combined with one or more other metal oxides, and have high magnetic permeability and high electrical resistivity, so they can be applied in the high frequency. In this letter, the developing process of magneto-dielectric materials is reviewed, the effect of dopants on sintering temperature, permeability, permittivity, DC resistivity are discussed. At last we point out the magneto-dielectric material is a promising material for antenna miniaturization, and the development direction of magneto-dielectric materials.

Key words: magneto-dielectric materials; permeability; permittivity

1 前 言

随着通信技术的发展, 通信设备的小型化成为一种趋势, 因此, 如何减小天线小型化的尺寸而不改变其辐射性能, 成为目前研究的热点和难点^[1-6]。使用高介电材料($\epsilon_r \gg 1$, $\mu_r \approx 1$)能有效的减小天线尺寸, 然而会带来一系列的问题, 比如: 高介电材料会增加损耗角正切, 从而增加电磁波传播的反射损耗, 高介电材料还会导致带宽减小, 从而限制了天线的使用范围。磁介电材

料是一种既具有磁性又具有介电特性, 且磁导率($\mu_r > 1$)和介电常数($\epsilon_r > 1$)的值几乎相等的材料。使用磁介电材料作为天线基板, 能有效的减小天线的尺寸, 增大带宽和提高辐射特性。天线的尺寸依赖于使用频率 f 的波长:

$$\lambda = \frac{e}{f \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

式中 e 为电子电荷, ϵ_r 为材料的相对介电常数, μ_r 为材料的相对磁导率。因此, 磁介电材料的小型化因子 $n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$ 。根据电磁波的传播特性, 介质的阻抗为: $\eta = \sqrt{(\mu_0 \mu_r) / (\epsilon_0 \epsilon_r)}$, 当 $\epsilon_r = \mu_r$ 时, 阻抗值为: $\eta = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ 即为真空中的固有阻抗。因此, 使用磁介电材料作为天线的基板时, 基板材料的阻抗与真空匹配, 这

收稿日期: 2012-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(61071028, 51171038); 教育部博士点基金项目(20100185110624)

作者简介: 王 棋, 男, 1987 年生, 博士研究生

通讯作者: 钟智勇, 男, 1970 年生, 教授, 博士生导师

意味着基板与真空之间没有反射,将大大减小基板对能量的耗散。

自然界中大多数材料只具有磁特性或介电特性。铁氧体材料即具有磁性又具有介电性,是一种潜在的磁介电材料。为了获得较低的磁致损耗,材料的截止频率要远远大于使用频率。因此,有 3 类铁氧体可以用作磁介电材料:尖晶石型、石榴石型、六角型。其中尖晶石和石榴石型铁氧体的截止频率从几十到几百 MHz 不等^[7-8]。六角型铁氧体的截止频率可以高达微波频段^[9]。除了铁氧体材料,通常还会采用复合材料制备磁介电材料,即介电材料和磁性材料的复合。

目前,国内外对磁介电材料的研究工作主要集中于针对不同材料体系,如何制备出匹配的磁导率和介电常数,如何降低磁致损耗和介电损耗,如何提高使用频率等。为此,本文就这几个方面的研究成果进行综述。

2 材料的制备方法

磁介电材料的制备方法主要有固相法^[1-6]和液相法^[10-12]。固相法是传统的陶瓷制备方法,工艺简单、成熟,配料容易调整,原料要求不高,成本较低。但生产过程容易引入杂质,需要进行高温煅烧和烧结,能耗较高。液相法是原料在液相中混合反应生成产物,因此反应温度较低,纯度较高,粒径较小,分散性好。

固相法主要以氧化物为原料,经高温反应制得铁氧体,主要步骤是:混料、一磨、预烧、二磨、造粒、成型、烧结。共沉淀法是液相法制备磁介电材料的主要方法,其原理是在金属盐溶液中加入沉淀剂,控制沉淀条件生成前驱体,再经过滤、洗涤、干燥、煅烧得到产物。

3 国内外研究现状

目前国内外研究主要集中于如何降低铁氧体烧结温度,增加密度,降低损耗,提高使用频率以及制备匹配的磁导率和介电常数。

新加坡国立大学的 Kong^[1-6]及其合作者通过固相反应合成镁铁氧体、锂铁氧体和镍铁氧体作为宿主材料。通过掺杂获得理想的磁导率和介电常数。他们主要研究了掺杂对铁氧体微观结构、直流电阻、磁导率和介电常数的影响,制备出低频在 3~30 MHz 下,磁导率和介电常数为 9.5~15,匹配度($\sqrt{\mu_r/\epsilon_r}$)为 0.98~1.02(图 1a),磁致损耗和介电损耗(损耗角正切)小于 10^{-2} 的材料(图 1b)。

J. K. Ji 等^[14]采用固相法制备 Ni-Mn-Co 铁氧体,频率在 1~200 MHz 下,磁导率为 8~9,介电常数约为 7,

介电损耗小于 0.001,磁致损耗小于 0.01。D. Souriou 等^[15]采用共沉淀法制备 Ni-Zn-Co 铁氧体和环氧树脂的复合材料,频率在 100~700 MHz 下,磁导率为 3.5~4,介电常数为 4~5,磁致损耗小于 0.04,介电损耗小于 0.02。

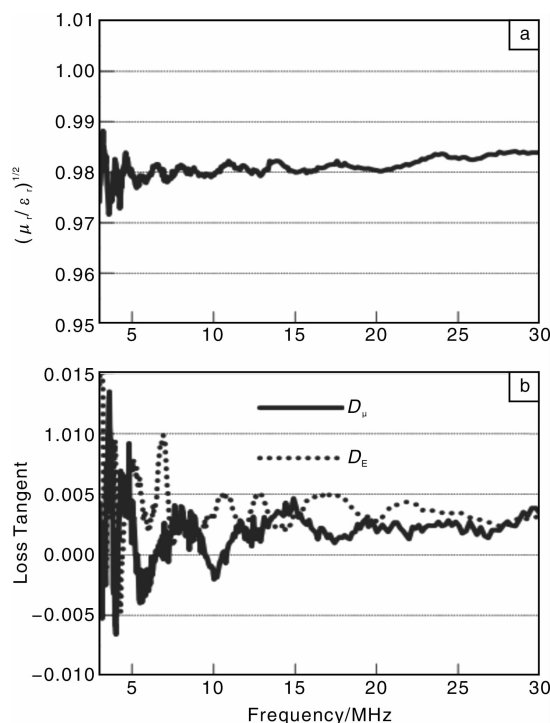


图 1 $\text{Ni}_{0.99}\text{Co}_{0.01}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$ 的磁介电特性

Fig. 1 Magneto-dielectric properties of the $\text{Ni}_{0.99}\text{Co}_{0.01}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$

3.1 降低烧结温度

由于在高温($>1100^\circ\text{C}$)时易生成 Fe^{2+} , Fe^{3+} 离子 d 轨道上有 5 个电子为半满状态,电子云对称分布极性较小,然而 Fe^{2+} 铁离子 d 轨道上有 6 个电子,破坏了这种对称性,极性大于 Fe^{3+} ,因此会带来更大的介电损耗^[5]。有文献报道^[17], Fe^{2+} 的含量增加 0.3%,直流电阻率将减小两个数量级。为了降低铁氧体的烧结温度,增加密度,通常掺入低熔点的 Bi_2O_3 和 CuO 作为助烧剂,利用其低熔点形成液相烧结,有效降低烧结温度,增加密度。液相法制备铁氧体材料,由于其反应产物粒径较小,分散性较好,也能有效地降低烧结温度。M. L. S. Teo 等^[4]向 Li 铁氧体中添加 Bi_2O_3 ,结果发现,未添加 Bi_2O_3 时, 1100°C 烧结 2 h,样品密度为理论密度的 92.1%,而添加 1% (质量分数,下同) 的 Bi_2O_3 时, 850°C 烧结 2 h,样品密度为理论密度的 95.4%,由此可见,添加 1% 的 Bi_2O_3 能有效降低了烧结温度,增加了密度(图 2)。C. Y. Liu 等^[18]对 LiZn 铁氧体的研究,也有近似报道。

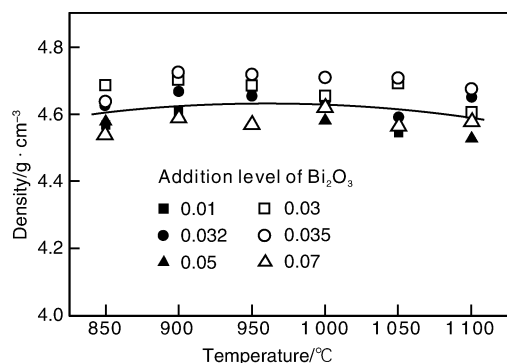


图2 $\text{Li}_{0.5-0.5x}\text{Co}_x\text{Fe}_{2.5-0.5x}\text{O}_4$ 铁氧体密度与烧结温度的关系

Fig. 2 Effect of sintering temperature on density of $\text{Li}_{0.5-0.5x}\text{Co}_x\text{Fe}_{2.5-0.5x}\text{O}_4$

进一步研究发现^[11], 随着 Bi_2O_3 含量的增加, 材料电阻率先减小后增大, 最后趋于不变。最小电阻率出现在 Bi_2O_3 含量为 0.2% 时, C. Y. Liu 等认为, 高温时 Bi_2O_3 为液相能溶解 Ca, Si 等杂质, 温度降低时, 这些液体回流到晶界的交界处, 由于 Bi_2O_3 含量少, 不能充满整个晶界, 因此, 对晶界有“清洁作用”, 减小了晶界的电阻率。

Kong 等^[2]也对 Mg 铁氧体进行了 CuO 的掺杂研究, 实验表明, 当添加 2.5% 的 CuO 时, 烧结温度可以降低 200 ~ 1 000 °C, 密度可以达到理论密度的 95%。并认为高温 (1 026 °C) 时, CuO 分解为 Cu_2O , 其熔点为 1 235 °C。在 Cu_2O 的存在下, 会形成一种低共熔点的合金, 形成液相烧结, 降低烧结温度。

Souriou 等^[15]采用共沉淀法制备 NiZnCo 铁氧体, 预烧温度 650 ~ 800 °C, 烧结温度 900 ~ 1 000 °C, 预烧后平均粒径为 28 nm, 粒径较小, 活性较高, 有效地降低了烧结温度 (图 3)。Thakur 等^[10-13]采用共沉淀法制备 NiZnCuCo 铁氧体也有类似的结果。

3.2 磁导率和介电常数的调节

虽然铁氧体材料既具有磁性又具有介电性, 但其磁导率远远大于介电常数, 因此, 要制备磁导率和介电常数匹配的磁介电材料, 通常需要降低铁氧体材料的磁导率。众所周知, Co 离子有较大的正的各向异性常数, 大多数尖晶石结构铁氧体的各向异性常数为负, 且绝对值较小。因此, 掺入少量的 Co 离子就能有效补偿或改变铁氧体的各向异性常数。例如 $(\text{Ni}_{0.2}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.6})_{1.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$ 的各向异性常数 K_1 为 -2.7×10^4 , $(\text{Ni}_{0.2}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.6})_{1.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$ 的各向异性常数 K_1 为 $+16.3 \times 10^4$ ^[16]。由于各向异性的增加, 磁导率减小, 能制备磁导率和介电常数匹配磁介电材料, 同时, 根据 Snoek 定理^[8], 由于磁导率的降低, 截止频率将增加, 因此其能适用于更

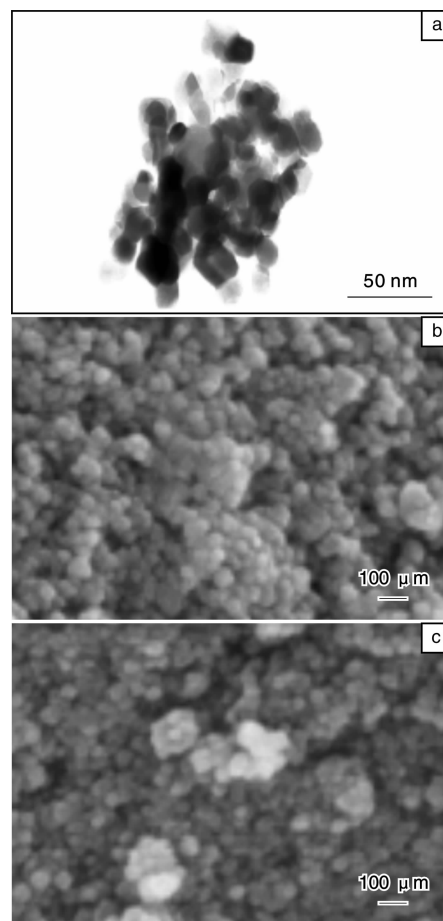


图3 800 °C 预烧后铁氧体颗粒的 TEM 像 (a), 900 °C (b) 和 950 °C (c) 烧结后的 SEM 像

Fig. 3 TEM image of the ferrite powder pre-sintered at 800 °C (a), SEM images of sintered at 900 °C (b), and at 950 °C (c)

高的频率。

Kong 等^[1]采用固相反应法向镍铁氧体中掺入 Co_3O_4 , 研究发现, 随 Co_3O_4 的掺入, 磁导率先增加后减小, 分析认为, 对于磁矩转动引起的磁导率可以表示为: $\mu_0 - 1 \propto M_s^2 / |K_1|$ (其中 M_s 为饱和磁化强度, K_1 为各向异性常数)。由 Slonczewski^[19]提出的单粒子模型, 在铁氧体这样的离子晶体中, 磁性粒子被阴离子包围, 因此, 总的磁晶各向异性为单个磁性粒子各向异性之和。在尖晶石铁氧体中, Ni, Fe 粒子的磁晶各向异性常数为负, 然而, Co 离子的磁晶各向异性常数为较大的正数, 因此, 添加少量 Co 离子时, 整个体系的磁晶各向异性常数最小, 磁导率最高, 当继续添加 Co 离子时, 体系的磁晶各向异性常数增大, 磁导率将减小。理论上对于 $\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$, 当 $x = 0.034$ 时, 磁晶各向异性最小, 磁导率最大, 但实验表明, $x = 0.01$ 时, 磁导率最大, 文献^[19]认为, 在高温时,

Co^{2+} 将氧化为 Co^{3+} , 同时形成阳离子空位, 产生局域的各向异性, 因此, 实际出现最大磁导率时, Co 离子浓度比理论值低。同时, Co_3O_4 的掺入还能有效地减小介电损耗和磁性损耗。最终通过调节 Co_3O_4 的掺入量, 制备的 $\text{Ni}_{0.99}\text{Co}_{0.01}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$, 频率在 3 ~ 30 MHz 时, 其磁导率为 11.5, 介电常数为 12, 磁损耗和节电损耗小于 0.01。

降低磁导率不仅可以通过掺入 Co_3O_4 来改变材料的各向异性常数, 还可以通过介电材料和磁性材料的复合来降低磁导率。R. V. Petrov 等^[20] 向 NiZn 铁氧体中添加钛酸锶钡(BST), 当添加质量为 2% 的 BST, 频率为 100 MHz 时, 小型化因子为 7 ~ 10, 损耗较低。S. H. Park 等^[21] 向 NiZn 铁氧体中添加硅胶制备有机复合材料, 当 NiZn 铁氧体质量为 40% 时, 在 1 ~ 161 MHz 频率范围内, 磁导率为 3.8, 介电常数为 2.2, 磁性损耗小于 0.003, 介电损耗小于 0.1, 有效的降低了 NiZn 铁氧体的磁导率, 提高了截止频率。

3.3 其他方面

为了满足磁介电材料高频下使用需求, 还必须增大电阻, 降低涡流损耗。Mn 离子的掺入能有效增大电阻率, 降低介电损耗。J. K. Ji 等^[9] 向通过固相法向 NiCo 铁氧体中掺入 Mn。Thakur 等^[7] 通过共沉淀法制备 NiZnCuCoMn 铁氧体。Rezlescu 等^[22] 向 NiZn 铁氧体中掺入 Mn, 研究发现, NiZnMn 铁氧体的电阻率为 $3.58 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$, 比 NiZn 铁氧体的大了两个数量级。

表 1 给出了各个主要研究者制备的磁介电材料的主要方法和参数。从表中可以看出, 固相法制备的磁介电材料小型化因子大, 但使用频率低。通过介电材料和磁性材料的复合能制备出高频的磁介电材料, 但其损耗较大。液相法能有效的降低烧结温度, 制备出较高频率磁介电材料, 但由于尖晶石结构铁氧体本身的限制, 很难将频率提高到 GHz, 因此, 磁介电材料进入实用化, 必须解决使用频率低, 损耗大这 2 个关键问题。

表 1 磁介电材料当前的研究水平

Table 1 The current research of magneto-dielectric materials

Material systems	Sintering temperature	ϵ_r	μ_r	$\tan\delta_\epsilon$	$\tan\delta_\mu$	Applied frequency	Preparation methods
$\text{Mg}_{0.85}\text{Co}_{0.05}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$	1100 °C	9.5	9.5	<0.01	<0.01	3 ~ 30 MHz	Solid phase method ^[3]
$\text{Ni}_{0.99}\text{Co}_{0.01}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$	1 050 °C	12	11.5	<0.015	<0.015	3 ~ 30 MHz	Solid phase method ^[1]
$\text{Li}_{0.5-0.5x}\text{Co}_x\text{Fe}_{2.5-0.5x}\text{O}_4$	≤ 950 °C	13 ~ 15	13 ~ 15	<0.01	<0.01	3 ~ 30 MHz	Solid phase method ^[6]
$\text{Ni}_{0.76}\text{Mn}_{0.24-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$	1 050 ~ 1 250 °C	~7 ~ 9	~7 ~ 9	<0.001	<0.01	<200 MHz	Solid phase method ^[14]
$\text{Ni}_{0.35}\text{Zn}_{0.35}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.05}\text{Cu}_{0.05}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$	900 °C	~6	~6	<0.03	<0.008	10 ~ 200 MHz	Codeposition method ^[10]
$\text{Ni}_{0.4}\text{Zn}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Cu}_{0.02}\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$	900 °C	~10.8	~6.5	<0.04	<0.006	10 ~ 200 MHz	Codeposition method ^[11]
NiZn ferrite(40%, mass fraction) + silica gel (60%, mass fraction)	—	3.8	2.2	<0.003	<0.1	1 ~ 161 MHz	Codeposition method ^[20]
$\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ + epoxy resin	<1 000 °C	3.5	4	<0.04	<0.02	1 ~ 700 MHz	Codeposition method ^[15]

4 结 语

近年来, 随着科学技术的发展, 磁介电材料的研究和应用, 有了较大的进展。从磁介电材料的研发趋势来看, 主要集中在如下 3 个方面: (1) 材料体系方面。从单一的铁氧体掺杂向铁氧体与有机材料复合和 Core/Shell 结构转变, 从尖晶石结构转向六角型结构^[23]; (2) 制备方法方面。从传统的固相法制备转向各种液相法制备; (3) 材料结构方面。从块体材料的制备转向薄膜材料的制备^[24-25]。

纵观目前对磁介电材料的研究现状, 如何从根本上降低磁致损耗和介电损耗, 提高截止频率, 是制备高质量磁介电材料的关键。我国在磁介电材料方面的研究较少, 与发达国家存在明显的差距。要制备出高质量的磁介电材料还任重道远。

参考文献 References

- [1] Chan K C, Xiao Tian Liew. $\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$ Ferrite Ceramics with Promising Magneto - Dielectric Properties [J]. *J Am Ceram Soc*, 2008(91): 3 937 - 3 942.
- [2] Kong L B, Li Z W. Magneto-Dielectric Properties of Mg-Cu-Co Ferrite Ceramics: I. Densification Behavior and Microstructure Development[J]. *J Am Ceram Soc*, 2007(90): 3 106 - 3 112.
- [3] Kong L B, Li Z W. Magneto-Dielectric Properties of Mg-Cu-Co Ferrite Ceramics II. Electrical, Dielectric, and Magnetic Properties [J]. *J Am Ceram Soc*, 2007(90): 2 104 - 2 112.
- [4] Teo M L S, Kong L B. Development of Magneto-Dielectric Materials Based on Li-Ferrite Ceramics I. Densification Behavior and Microstructure Development[J]. *J Alloys Compd*, 2008(459): 557 - 566.
- [5] Teo M L S, Kong L B. Development of Magneto-Dielectric Materials Based on Li-Ferrite Ceramics II. DC Resistivity and Complex Relative Permittivity[J]. *J Alloys Compd*, 2008(459): 567 - 575.

- [6] Teo M L S, Kong L B. Development of Magneto-Dielectric Materials Based on Li-Ferrite Ceramics III. Complex Relative Permeability and Magneto-Dielectric Properties[J]. *J Alloys Compd*, 2008(459): 576–582.
- [7] Tsutaoka T. Frequency Dispersion of Complex Permeability in Mn-Zn and Ni-Zn Spinel Ferrites and Their Composite Materials[J]. *J Appl Phys*, 2003(93): 2 789–2 796.
- [8] Nakamura T. Snoek's Limit in the High-Frequency Permeability of Polycrystalline Ni-Zn, Mg-Zn, and Ni-Zn-Cu Spinel Ferrites[J]. *J Appl Phys*, 2000(88): 348–353.
- [9] Li Z W, Chen L F, Ong C K. Studies of Static and High-Frequency Magnetic Properties for M-Type Ferrite $\text{BaFe}_{12-2x}\text{Co}_x\text{Zr}_x\text{O}_{19}$ [J]. *J Appl Phys*, 2002(92): 3 902–3 907.
- [10] Thakur A, Thakur P. Novel Magnetodielectric Nanomaterials with Matching Permeability and Permittivity for the Very-High-Frequency Applications[J]. *Scripta Materialia*, 2011(64): 205–208.
- [11] Thakur A, Thakur P. Smart Magnetodielectric Nano-Materials for the Very High Frequency Applications[J]. *J Alloys Compd*, 2011(509): 5 315–5 319.
- [12] Thakur A, Chevalier A, Mattei J L. Low-Loss Spinel Nanoferrite with Matching Permeability and Permittivity in the Ultrahigh Frequency Range[J]. *J Appl Phys*, 2010(108): 014 301–1–014 301–4.
- [13] Mattei J L, Laure Huitema. Suitability of Ni-Zn Ferrites Ceramics with Controlled Porosity as Granular Substrates for Mobile Handset Miniaturized Antennas [J]. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2011(47): 3 720–3 723.
- [14] Ji J K, Ahn W K. Miniaturized T-DMB Antenna with a Low-Loss Ni-Mn-Co Ferrite for Mobile Handset Applications[J]. *IEEE Magnetism Letters*, 2010(1): 5000104–5000104.
- [15] Souriou D, Mattei J L. Influential Parameters on Electromagnetic Properties of Nickel-Zinc Ferrites for Antenna Miniaturization [J]. *J Appl Phys*, 2010(107): 09A 518–1–09A 518–3.
- [16] Byun T Y, Byeon S C. Factors Affecting Initial Permeability of Co-Substituted Ni-Zn-Cu Ferrites[J]. *IEEE Tran Mag*, 1999(35): 3 445–3 447.
- [17] Verma A, Dube D C. Processing of Nickel-Zinc Ferrites via the Citrate Precursor Route for High Frequency Applications[J]. *J Am Ceram Soc*, 2005(88): 519–523.
- [18] Liu C Y, Lan Z W. Effects of Sintering Temperature and Bi_2O_3 Content on Microstructure and Magnetic Properties of LiZn Ferrites[J]. *J Magn Magn Mater*, 2008(320): 1 335–1 339.
- [19] Slonczewski J C. Origin of Magnetic Anisotropy in $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ [J]. *J Appl Phys*, 1958(29): 448–449.
- [20] Petrov R V, Tatarenko A S. Antenna Miniaturization with Ferrite Ferroelectric Composites[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2008(50): 3 154–3 157.
- [21] Park S H, Ahn W K. Electromagnetic Properties of Dielectric and Magnetic Composite Material for Antenna [J]. *Electronic Materials Letters*. 2009(5): 67–71.
- [22] Rezlescu E, Sachelarie L. Effect of Substitution of Divalent Ions on the Electrical and Magnetic Properties of Ni-Zn-Me Ferrites [J]. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2000(36): 3 962–3 967.
- [23] Xia Q. Investigation of Low Loss Z-Type Hexaferrites for Antenna Applications[J]. *J Appl Phys*, 2012(111): 063 921–1–063 921–4.
- [24] Yang G M, Xing X, Daigle A. Planar Annular Ring Antennas with Multilayer Self-Biased NiCo-Ferrite Films Loading [J]. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2010(58): 648–655.
- [25] Karilainen A O, Lkonen P M T. Experimental Studies on Antenna Miniaturization Using Magneto-Dielectric and Dielectric Materials [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2011(5): 495–205.

日本开发出能在室温下发白光的材料

日本物质和材料研究机构于2012年7月14日称,该机构研究人员开发出一种能在室温下发白光的材料,这种材料生产工艺简单,能涂在各种形状的底材表面,新材料有望作为下一代发光材料大幅简化照明装置等的制造流程。

物质和材料研究机构2012年7月14日发布的新闻公报称,照明装置的耗电量占到我们电力消耗总量的20%,为削减温室气体排放量,人们迫切需要照明领域材料和技术的革新,其中能发出白光的有机材料因为能代替白炽灯和荧光灯作为下一代照明的光源材料而备受关注。但现有的一些有机材料一旦涂到底材上并将溶媒蒸发后,发光材料中的分子就会相互凝集,导致发光性能不能充分发挥。

物质和材料研究机构高级研究员中西尚志等人首先开发出一种分子不会凝集、不挥发的荧光液体,这种液体不需要挥发性的有机溶媒就能发出蓝色荧光,再向这种液体中添加少量粉末状荧光材料,从而制成一种能发出高辉度白光的膏状材料。

公报称,新发光材料生产工艺简单,适用于各种形状的底材。而且这种材料经调整甚至能发出全彩色光,有望成为下一代可印刷电子领域的新材料。

相关论文预定刊登于德国《应用化学国际版》和英国《自然》杂志。

(来源:新华社)