

面向 5G 应用第 3 代半导体功率器件的高频低功耗 MnZn 铁氧体 研究进展

李兆程, 应 耀, 车声雷

(浙江工业大学材料科学与工程学院, 磁电功能材料研究所, 杭州 310014)

摘 要: 随着 5G 通信技术和第 3 代宽禁带半导体广泛的商用, 功率电子器件朝着高频化、小型化和高能效化的方向加速发展。MnZn 铁氧体作为功率电子器件的核心材料, 成为学术界和产业界在高频软磁材料方面研究的焦点。本综述主要介绍近年来 MnZn 铁氧体在高频化方向上最新的研究进展, 包括通过主成分设计、添加剂调控和低温烧结工艺等手段, 实现高频、宽温和低损耗等特性, 以及高频下 MnZn 铁氧体损耗的应力敏感性。随着高频损耗发生机制研究的深入, 今后 5 到 10 年内将会开发出更多的在 0.5 MHz 以上的高频和更高的磁通密度下表现出更低损耗的 MnZn 铁氧体新材料, 并迅速应用于通信电源等领域。

关键词: 软磁铁氧体; MnZn 铁氧体; 高频; 功率损耗

中图分类号: TB32; TB34 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)04-0949-08

网络出版时间: 2023-03-14



Research Progress on High-Frequency Low-Loss Mn-Zn Ferrites for Application of Third Generation Semiconductor Power Electronics in 5G Communication

LI Zhaocheng, YING Yao, CHE Shenglei

(Zhejiang University of Technology, College of Materials Science and Engineering, Research Center of Magnetic and Electronic Materials, Hangzhou 310014, China)

Abstract: With the development of 5G communication technology and the widespread commercial use of the third-generation wide bandgap semiconductors, the power electronic devices with higher frequency, miniaturization and higher energy efficiency become popular. MnZn ferrite as a high-frequency soft magnetic materials of power electronic devices has attracted attention recently. This review introduced the latest research progress on high frequency MnZn ferrites, including the realization of characteristics of high frequency, wide temperature and low loss through the main component design, additive regulation and low temperature sintering process. This review also represented the stress sensitivity of power loss in the high frequency MnZn ferrite. Some further researches on the mechanism of high frequency power loss could accelerate the development and application of low core loss high-frequency MnZn ferrite in this decade.

Keywords: soft magnetic ferrites; MnZn ferrite; high frequency; power loss

近年来, 随着 SiC、GaN 等第 3 代宽禁带半导体(WGB)在功率电子器件的商用, 将功率电子器件工作频率提升至 MHz 高频已经成为可能^[1]。随着

5G 通信技术和新能源汽车的迅猛发展, 功率电子器件也朝着高频化、小型化和高能效化的方向加速发展。功率电子器件(如开关电源变压器、DC-DC 转

收稿日期: 2022-08-31。 修订日期: 2022-11-14。

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2022YFE0109800); 国家自然科学基金资助项目(U1809215)。

第一作者: 李兆程(1995—), 男, 博士研究生。

通信作者: 应 耀(1979—), 男, 博士, 副教授;

车声雷(1965—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-08-31. Revised date: 2022-11-14.

First author: LI Zhaocheng (1995—), male, Doctoral candidate.

E-mail: zclee@zjut.edu.cn

Correspondent author: YING Yao (1979—), male, Ph.D., Associate Professor;

CHE Shenglei (1965—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: yying@zjut.edu.cn; cheshenglei@zjut.edu.cn

换器、AC–DC 转换器、逆变器)是电子和电力设备中最基础的元器件,承担着电能的传输、变压、转换、调节等功能,广泛地应用于通信、计算机、新能源、电动汽车、无线充电和大型数据中心等领域^[2]。以 5G 基站为例,由于 5G 基站频率带宽更大,天线收发通道更多,发射功率更大等技术因素,实测的 5G 基站耗电量为 4G 的 3~4 倍,且 5G 基站的分布更为密集,将带来更紧张的能源消耗压力^[3]。开关电源的高频低损耗化是解决 5G 基站耗电量的有效手段。另外,据估计全球现有的 1 000 万个数据中心每年产生超过 2 亿 t 的二氧化碳^[4],而 5G 设备的排放在未来会超过数据中心。提高功率电子器件的能效也是全球早日实现碳达峰和碳中和极为重要的组成工作。

尽管第 3 代宽禁带半导体可以使功率电子器件能够在更高频的 MHz 下工作,但是目前为止还没有软磁材料能够完全发挥宽禁带半导体的潜能^[5]。目前只有 MnZn 铁氧体、NiZn 铁氧体 2 种铁氧体和软磁复合材料(SMC)可以应用于 MHz 频段。NiZn 铁氧体的饱和磁通密度(B_s)和起始磁导率(μ_i)很低,而 SMC 材料在高频下损耗很高。因此它们都不适合应用于高频功率电子器件。MnZn 铁氧体软磁材料相比于其他软磁材料能够兼顾高 B_s 、高 μ_i 和低功耗,因此成为电能转换的关键材料,在 10~500 kHz 频率的功率电子器件中得到了广泛应用^[6-7]。然而,通常情况下当工作频率提升至 1 MHz 以上时,MnZn 铁氧体的功率损耗急剧增加,这将导致功率电子器件的发热和能效的降低。软磁材料无法匹配基于第 3 代半导体的功率电子器件也成为制约高频功率器件发展的关键因素^[8-9]。研发可应用于 MHz 高频的低损耗软磁材料也成为软磁材料行业和学术界共同关注的焦点和热点。降低 MnZn 铁氧体在 MHz 高频下功率损耗是高频软磁材料研发的一个关键课题。

2021 年,车声雷课题组张浩翔等的综述《中高频低损耗 MnZn 铁氧体材料研发进展》介绍了中高频低损耗 MnZn 铁氧体的研发历程,并提出了中高频低损耗铁氧体开发中有待解决的问题。本综述侧重从主成分设计、添加剂调控和烧结工艺优化等具体工艺原理和手段方面对近几年高频低损耗 MnZn 铁氧体研究工作进行总结和讨论,特别是对近 2 年学术界和业界为实现 MnZn 铁氧体高频、宽温和低损耗等特性所做的工作进行了着重介绍。还特别介绍了高频下 MnZn 铁氧体损耗应力敏感性的相关研究。

1 主成分调节

MnZn 铁氧体的功率损耗(P_{cv})根据其产生机制的不同可分为磁滞损耗(P_{hv})、涡流损耗(P_{ev})和剩余损耗(P_{rv})3 个部分,其关系式可以表示为^[10-11]:

$$P_{cv} = P_{hv} + P_{ev} + P_{rv} = K_H B_m^3 f + \frac{K_E D^2 B_m^2 f^2}{\rho} + P_{rv} \quad (1)$$

其中: K_H 和 K_E 为常数; B_m 为磁通密度; D 为晶粒尺寸; f 为频率; ρ 为电阻率。MnZn 铁氧体主成分的变化对磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗都有很大的影响,因此可以通过调节 MnZn 铁氧体的主成分来降低 P_{hv} 、 P_{ev} 和 P_{rv} ,从而降低材料的总损耗。MnZn 铁氧体磁滞损耗和磁晶各向异性常数 K_1 有关,当 $K_1=0$ 时,铁氧体的磁滞损耗和总损耗较小。Giles 等^[12]研究了 Co^{2+} 掺杂对 MnZn 铁氧体磁性能的影响,提出适量的 Co^{2+} 离子掺杂可以使 K_1 的温度变化曲线中出现 2 个 $K_1=0$ 点,此时损耗较小,并具有良好的温度稳定性。Tokatlidis 等^[13]通过优化 Co^{2+} 和 Mg^{2+} 掺杂,开发了在 25~115 °C 范围内保持较低损耗的高频 MnZn 铁氧体,损耗在 1 M/50 mT 和 3 M/30 mT 条件下分别低于 120 mW/cm³ 和 400 mW/cm³ 的 MnZn 铁氧体。

Wang 等^[14]对不同 Co 含量掺杂 MnZn 铁氧体的功率损耗及其温度特性进行了研究。图 1 为不同 Co 含量 MnZn 铁氧体的 P_{cv} - T 曲线。由图 1 可见,掺杂质量分数为 0.35% Co_3O_4 的 MnZn 铁氧体样品功率损耗最低,并在 0~140 °C 始终保持着很低的损耗,在 1 MHz/50 mT 和 3 MHz/10 mT 下,其功率损耗分别低于 120 kW/m³ 和 30 kW/m³。由损耗分离结果(图 2)可以看出, Co_3O_4 不仅仅有效地抑制了材料的磁滞损耗,同时极大抑制了涡流损耗。由于 Co^{2+} 离子在尖晶石晶格中占据八面体空位,抑制了晶格中 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 离子之间电子的跳迁,增大了 MnZn 铁氧体的晶粒内部电阻,从而减小了涡流损耗。

2 晶界添加剂调控

众所周知,适量的添加剂可以显著提高铁氧体的磁电性能^[15]。MnZn 铁氧体常用的添加剂主要可以分为 3 大类,第 1 类是能够溶解进入晶粒中改变磁性能的添加剂^[14];第 2 类是影响微观结构生长的添加剂^[16-17];第 3 类是能够偏析到晶界处进而改变 MnZn 铁氧体电阻率的添加剂^[18-19]。在高频 MnZn 铁氧体的开发中,通常以添加晶界添加剂构筑高电

阻晶界, 以达到降低高频涡流损耗的目的。Wu 等^[19]通过 0.1% CaCO_3 (质量分数) 和 0.01% (质量分数) V_2O_5 的复合掺杂, 制备了在 25 °C、3 MHz/10 mT 和 3 MHz/30 mT 损耗分别为 46 kW/m^3 和 664 kW/m^3

的 MnZn 铁氧体。Yan 等^[20]通过 La 等多元素掺杂, 开发出损耗在 5 MHz/10 mT 为 267 kW/m^3 的高频 MnZn 铁氧体, 发现相邻晶粒间拥有较大取向差 ($>25^\circ$) 更利于晶粒形成单畴。

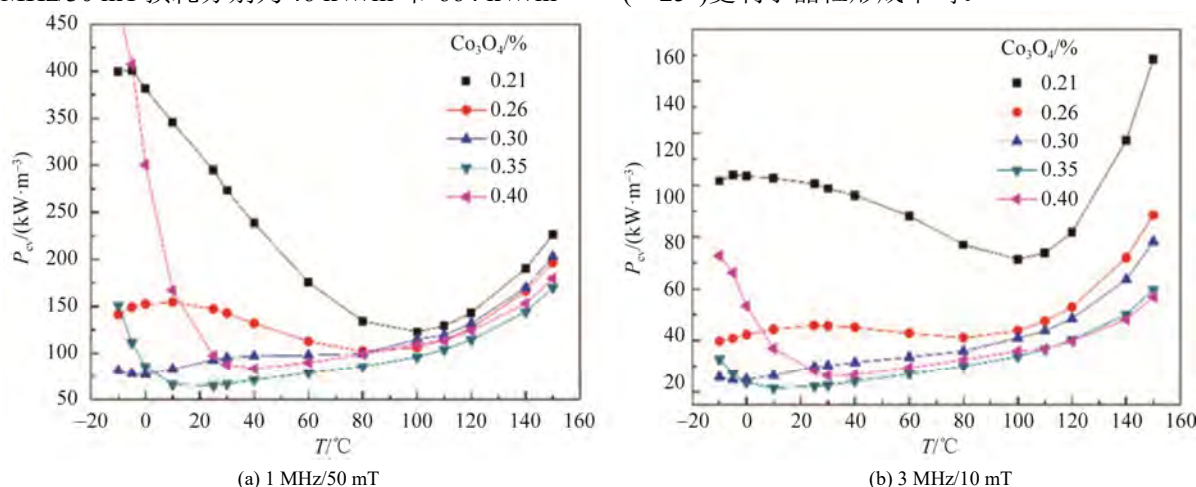


图 1 不同 Co 含量 MnZn 铁氧体的 P_{cv} - T 曲线^[14]
Fig. 1 P_{cv} - T curves of MnZn ferrites doped with different amounts of Co^[14]

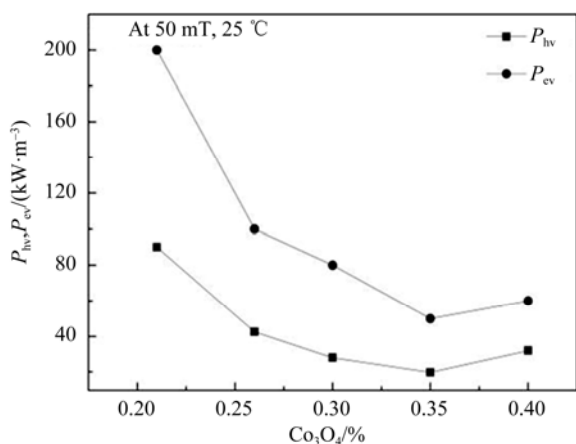


图 2 25 °C, 1 MHz/50 mT, P_{hv} 和 P_{cv} 随 Co_3O_4 质量分数的变化^[14]

Fig. 2 P_{hv} and P_{cv} with the variation of the Co_3O_4 content at 1 MHz/50 mT and 25 $^\circ\text{C}$ ^[14]

Wu 等^[21]研究了介电材料 $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) 作为添加剂, 对 MnZn 铁氧体磁性和介电性^[22-23]的影响, 当 CCTO 质量分数为 0.2 % 时, 25 °C、3 MHz/30 mT 条件下, 样品的 P_{cv} 最小, 为 495 kW/m^3 。从图 3 可以看出, P_r 在损耗中起主导作用。CCTO 质量分数为 0.2 % 的样品在所有样品中的 P_e 值最小, 其中总损耗也最小。因此, 涡流损耗的减少是该样品的损耗减少的主要原因。另外, Wu 等^[24]还研究了介电材料 BaTiO_3 作为添加剂对 MnZn 铁氧体磁性能的影响, 发现 BaTiO_3 能够显著抑制室温下的剩余损耗 P_{rv} 和高温下的涡流损耗 P_{ev} ^[24]。

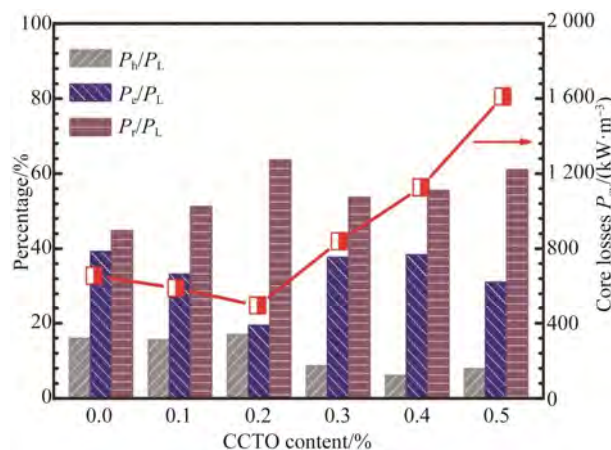


图 3 各部分损耗占比和总损耗值随 CCTO 含量的变化 (25 °C, 3 MHz/30 mT)^[21]

Fig. 3 Dependence of core loss and its corresponding each part on the amount of CCTO at 25 $^\circ\text{C}$, 3 MHz/30 mT^[21]

Ying 等^[25]研究了 Ta_2O_5 的添加对高频锰铁氧体损耗性能的影响, 开发了在 25~140 $^\circ\text{C}$ 下, 1~3 MHz 高频范围内具有低损耗的软磁铁氧体。添加 0.03% Ta_2O_5 (质量分数) 的铁氧体损耗性能最好, 25 $^\circ\text{C}$, 1 MHz/50 mT、2 MHz/50 mT 和 3 MHz/30 mT 的 P_{cv} 分别低至 41、94 kW/m^3 和 164 kW/m^3 , 并且在 25~140 $^\circ\text{C}$ 范围内保持良好的温度稳定性, 值得注意的是, Ta_2O_5 的加入显著地抑制了高温下的 P_{cv} , 并发现涡流损耗的降低是总损耗降低的主要原因。Ying 等^[25]测量了不同 Ta_2O_5 含量的样品阻抗谱, 并利用等效电路图拟合出晶界电阻 (R_{gb}) 和晶粒电阻

(R_g)的基础上,进一步讨论了 Ta_2O_5 添加对损耗的影响机制。通过分析样品中不同元素的相应分布,发现 Ta 元素偏析在晶界处,这导致晶界电阻增大,同时 Ta^{5+} 离子会取代部分晶界区域的 Fe^{3+} 离子,形成 $Ta^{5+}-Fe^{2+}$ 离子对,减少 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 之间跃迁电子的数量,降低了晶粒电阻。晶界电阻和晶粒电阻的增大是涡流损耗降低的主要原因。

在高频下,由于涡流效应的增强, P_{ev} 会急剧增加。通过在烧结过程中掺入晶界相,如 CaO 、 SiO_2 、 Nb_2O_5 、 HfO_2 和 ZrO_2 ,形成高电阻的晶界可以降低 P_{ev} ,并降低 P_{cv} ^[26–28]。然而,大多数的添加剂是非磁性的。在铁氧体材料中引入这些非磁性相,虽然能够增加晶界电阻,减小涡流损耗,但同时会增加晶界的有效厚度,导致晶粒之间的长距磁耦合被削弱^[29–30]。因此这些添加剂的添加往往会导致初始磁导率(μ_i)降低^[31]。Andalib 等^[32–33]研究了添加同时具有磁性和高绝缘性的 $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)纳米颗粒对 MnZn 铁氧体磁性的影响。发现添加 YIG 纳米颗粒可以使铁氧体在 500 kHz/30 mT 下的 P_{cv} 大幅度降低 76.9% 的同时, μ_i 只减小 24.5%。

Ying 等^[34]也研究了 YIG 纳米添加剂对 MnZn 铁氧体高频下磁性能的影响。相较于未添加 YIG 的样品,适量添加 YIG 纳米添加剂可以使样品在 1 MHz/50 mT 和 3 MHz/10 mT (25 °C) 条件下功率损耗分别降低 56.4% 和 36.6%,同时 μ_i 反而提高了 13.9%。在非磁性(或磁性)晶界模型中,多晶铁氧体的初始磁导率同时受晶粒和晶界的影响,可以由公式(2)表示^[29,35]:

$$\mu_i = \frac{\mu_G D_{ave}}{\frac{\mu_G}{\mu_{GB}} \delta + D_{ave}} \quad (2)$$

其中: μ_G 为晶粒的固有磁导率; μ_{GB} 和 δ 分别为晶界的磁导率和厚度; D_{ave} 为晶粒平均粒径。通常,晶界相的存在会增加晶界的厚度从而削弱相邻晶粒之间的磁耦合,导致 μ_i 减小。图 4 为 MnZn 铁氧体的 μ_i 和 f_r 随添加的 YIG 质量分数的变化。从图 4 中可以看出,适量范围内的 YIG 添加量,使得 μ_i 增大。而 YIG 的添加导致 μ_i 增加的原因主要有 2 点。首先,磁性 YIG 纳米颗粒的添加,在晶界处形成磁性晶界相。由于含 YIG 样品的 μ_{GB} 大于未添加的非磁性晶界样品($\mu_{GB}=1$),因此添加 YIG 纳米颗粒会使 μ_i 提高。另外,YIG 的添加会促进 MnZn 铁氧体致密化并增加 B_s ,这也会使 μ_i 提高。因此,磁性晶界相的形成和 B_s 的增加共同导致了 μ_i 的增加。

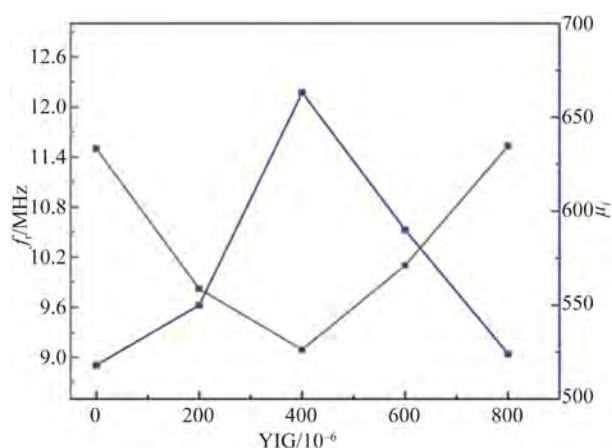


图 4 MnZn 铁氧体的 μ_i 和 f_r 随 YIG 质量分数的变化
Fig. 4 Variation of μ_i and f_r with the YIG content^[34]

图 5 为 MnZn 铁氧体的 R_{gb} 和 P_{cv} 随 YIG 质量分数的变化。由图 5 可见,YIG 的质量分数为 0.06% 时,晶界电阻最大,涡流损耗最低,降低了 MnZn 铁氧体损耗。由于纳米 YIG 材料不仅具有磁性,还有很强的绝缘性,使铁氧体晶界电阻增大。Ying 等^[34]使用了磁性 YIG 纳米颗粒作为添加剂,在降低涡流损耗的同时,不引入新的非磁性相,从而避免了 μ_i 的降低,为 MnZn 铁氧体性能调控提供了新的思路。

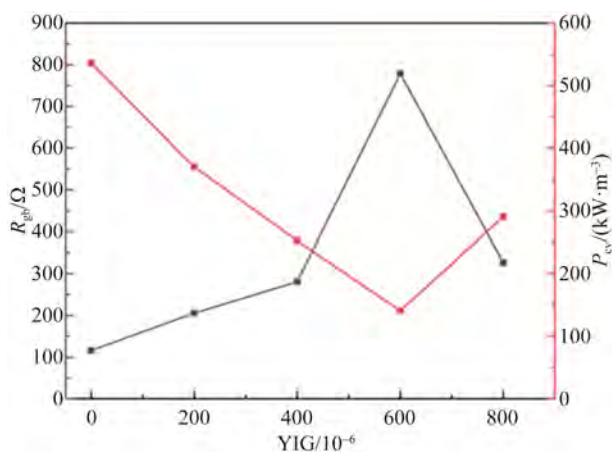


图 5 1 MHz/50 mT 条件下, MnZn 铁氧体 R_{gb} 和 P_{cv} 随 YIG 质量分数的变化^[34]

Fig. 5 Variation in R_{gb} and P_{cv} with the YIG content of MnZn ferrites at 1 MHz/50 mT^[34]

3 高频 MnZn 铁氧体的低温烧结制备工艺

铁氧体材料的晶粒尺寸变小时,内部包含的磁畴会相应的减少。铁氧体晶粒尺寸小于某尺寸时,整个晶体成为 1 个单畴,这个尺寸称为单畴的临界

尺寸。当晶粒大于临界尺寸时, 铁氧体晶粒内具有多畴结构, 在磁化过程中存在畴壁位移和磁畴转动 2 种磁化机制。然而小于临界尺寸时, 铁氧体晶粒内部为单畴结构, 不存在畴壁, 没有畴壁位移磁化过程, 只有磁畴转动磁化过程。MnZn 铁氧体在高频应用时会产生畴壁共振, 造成剩余损耗增加^[36]。中子去极化实验表明, 多晶 MnZn 铁氧体的单畴晶粒理论值为 3~4 μm 。故可以通过细化晶粒来抑制铁氧体在高频下的剩余损耗。低温烧结是细化晶粒的有效方法, 对于减少生产成本和能源消耗有重要意义。Miyoshi 等^[37]分别在 950 $^{\circ}\text{C}$ 和 1000 $^{\circ}\text{C}$ 烧结得到了平均晶粒尺寸为 0.7 μm 和 1.6 μm 的样品, 然而很难得到致密化的样品。液相烧结助剂可以在相对较低的烧结温度促进铁氧体致密化, Papazoglou 等^[38]通过添加 $\text{Zn}_4\text{O}(\text{BO}_2)_6$ 作为烧结助剂, 烧结温度为 1100 $^{\circ}\text{C}$, 制备的样品在 400 kHz/50 mT 和 100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的损耗为 70 kW/cm^3 。Handa 等^[39]研究了 LiBO_2 对其晶粒尺寸的影响。结果表明, LiBO_2 的加入促进了晶粒的生长。Hirota 等^[40]先通过介质搅拌磨机, 研磨共沉淀粉末, 得到的铁氧体粉末具有很高的烧结活性, 再在 900 $^{\circ}\text{C}$ 烧结时添加 0.1 % (质量分数) 的硼硅酸锂玻璃, 最后得到了致密化铁氧体, 密度大于理论值的 98%。上述研究说明添加烧结辅助剂是获得致密化铁氧体的有效方法。

Ying 等^[41]研究了以 LiBO_2 作为烧结助剂的低温烧结工艺, 制备出晶粒尺寸为 2.6 μm 左右并具有良好的致密性的 MnZn 铁氧体。该铁氧体在 1 MHz 条件下具有低功耗和宽温稳定特性。 LiBO_2 的质量分数为 0.05%, 温度为 1020 $^{\circ}\text{C}$ 烧成的样品, 1 MHz/30 mT (25 $^{\circ}\text{C}$) 的功率损耗为 310 kW/m^3 。 LiBO_2 的加入有效地促进了样品在烧结时的致密化和晶粒的生长。当 LiBO_2 的质量分数从 0.05% 增加到 0.07% 时, 样品的空隙减少, 具有致密的微观结构。随着 LiBO_2 的添加, 样品密度可以达到 4.82 g/cm^3 , 相对密度达到 95.6%, 达到了较高的致密化程度。

4 应力对高频 MnZn 铁氧体的性能影响

软磁铁氧体在制备过程中会产生残余应力, 在加工成磁性器件的过程中, 由于绕线、封装、固定等一系列机械动作都会对磁芯产生外加应力。比如, 绕组将使磁芯受到约 2 MPa 的压应力, 封装固化过程中由于树脂体积收缩能够产生约 10 MPa 的压应力。器件在使用过程中由于磁芯的磁致伸缩效应以及发热后与封装材料热膨胀系数的差异也会产生应

力。应力的存在会对软磁铁氧体材料的 μ_i 、 P_{cv} 和 B_s 等性能产生影响^[42]。

Li 等^[43]研究了高频下应力对 MnZn 铁氧体功率损耗的影响。如图 6 所示, 随着施加压力的增加, 功率损耗不断增大, 并且随着频率的增加, 压力对损耗的影响会愈发明显。 P_{hv} 起源于包括畴壁位移和磁畴旋转在内的不可逆磁化过程。当晶界处存在封闭孔隙时, 压应力在畴壁范围内会产生局部各向异性应力^[44]。局部各向异性应力阻碍了畴壁的位移, 增强了不可逆磁化强度, 从而导致了磁滞损失 P_{hv} 增加。

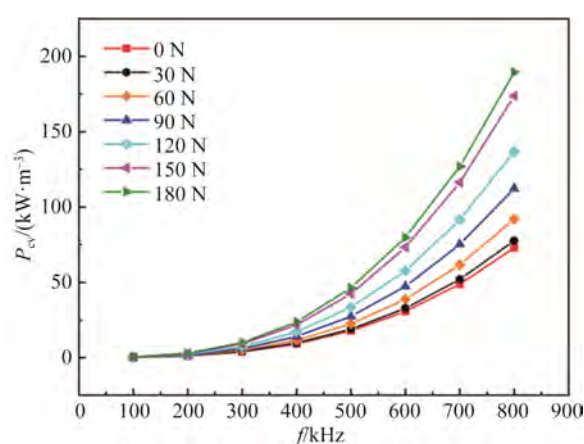


图 6 不同压力下, MnZn 铁氧体功率损耗随频率的变化曲线^[43]
Fig. 6 Frequency dependence of P_{cv} for the MnZn ferrite under different compressive stresses^[43]

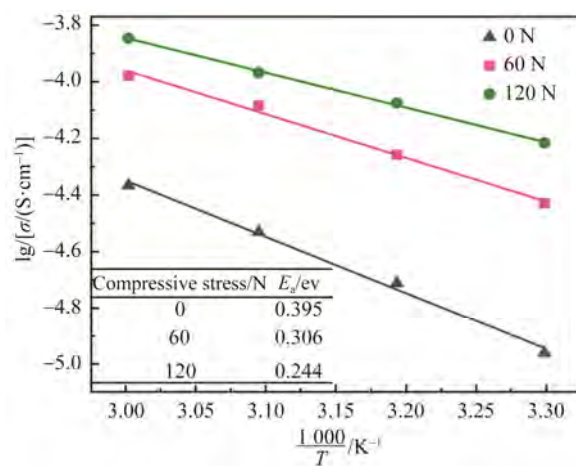


图 7 不同压力下的 $\lg\sigma$ 与 $1000/T$ 的关系^[43]
Fig. 7 Absolute temperature ($1000/T$) dependence of the conductivity ($\lg\sigma$) for the Mn-Zn ferrite under different compressive stresses^[43]

Li 等^[43]发现晶粒电阻和晶界电阻随应力的增加而减小, 导致涡流损耗增加。尖晶石铁氧体的传

导机制主要是占据八面体位置的 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 之间的电子跳迁, 其电导率遵循 Arrhenius 定律, 由下式表示^[45–48]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a / k_B T) \quad (3)$$

其中: σ_0 为指数前因子; k_B 为 Boltzmann 常数; T 为绝对温度; E_a 为活化能。图 7 为不同压力下的 $\lg\sigma$ 与 $1000/T$ 的关系。由图 7 可见, 应力的施加降低了 MnZn 铁氧体的活化能, 因此 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 之间电子

跳跃所需的能量减少, 电阻率减小, 从而使涡流损耗的总损耗增加。

业界和学术界近年来在高频低损耗 MnZn 铁氧体研发上取得了一些重要的成果, 其中日立金属、TDK、东磁、天通、飞磁等公司开发的 MnZn 功率铁氧体产品在中高频下有良好的性能表现。表 1 对近年来对业界和学术界研发的一些典型高频 MnZn 功率铁氧体的性能参数进行总结。

表 1 论文和商用的 MnZn 铁氧体在 MHz 高频下损耗性能参数

Table 1 P_{cv} s of MnZn ferrites at MHz frequencies in commercial products and literatures under different conditions [7,13–14,25,49–50]

Sample	$P_{cv}/(\text{kW}\cdot\text{m}^{-3})$ at 1 MHz/50 mT			$P_{cv}/(\text{kW}\cdot\text{m}^{-3})$ at 3 MHz/10 mT			$P_{cv}/(\text{kW}\cdot\text{m}^{-3})$ at 3 MHz/30 mT		
	25 °C	80 °C	100 °C	25 °C	80 °C	100 °C	25 °C	80 °C	100 °C
N. Wang	65		96	22		34			
X. Hu	41	74	78	16	22	25	164	233	256
A. Hussain				20* ¹		60			
S. Tokatlidis		87* ²						319* ²	
X. Wang				34		66			
3F46 (Ferroxcube)			150			50			500
PC50 (TDK)			450						
PC200(TDK)	145		180	40		60			
TP5 (TDG)			500						
TP5E(TDG)	450		300	250		150			
ML91S (Hitachi)			105			156			
DMR50B (DMEGC)			510			260			

*¹ and *² represent the values measured at 20 and 85 °C, respectively.

5 结语

随着 5G 通信技术的发展和第 3 代半导体大规模的商用, 高频低损耗 MnZn 铁氧体的开发已经迫在眉睫。降低高频下功率损耗需要从主配方、添加剂和烧结工艺 3 方面入手。调节主配方, 如通过 Co^{2+} 掺杂调节磁晶各向异性常数 K_1 , 降低磁滞损耗, 改善温度稳定性。引入添加剂, 构筑高电阻晶界可以减小铁氧体的涡流损耗。开发新的工艺, 如低温致密化烧结工艺, 细化铁氧体晶粒, 使晶粒大小达到单畴尺寸以下, 也是降低高频下功率损耗的重要手段。

目前, 高频下的损耗形成机制, 尤其是剩余损耗的形成机制, 还没有建立完备的理论。在基础研究方面有必要对高频下剩余损耗的形成机制进行进一步深入研究, 从而为高频损耗的降低提高理论指导。随着 5G 通信、新能源电动车和大型数据中心等发展, 功率电子器件的应用场景更加个性化和多

样化, 对软磁铁氧体材料软磁性能要求更高, 对磁性能的稳定性和可靠性也提出了更高的要求。现有 MHz 高频 MnZn 铁氧体工作的最大磁通密度一般在 30 mT 或 50 mT, 相对较低, 仍需开发更高工作磁通密度的产品, 以满足功率器件更高传输功率密度的要求。同时有必要结合功率电子器件的实际应用场景, 开发出具有更宽的温度稳定性范围以及具有良好耐应力性能等具有特定性能的高频铁氧体。

参考文献:

- [1] 王京平, 段庆娃. 功率变换器高频磁元件用铁氧体材料[J]. 技术与应用, 2022, 1: 175–177.
WANG Jingping, DUAN Qingwa. Technol Appl (in Chinese), 2022, 1: 175–177
- [2] KOGIAS G, ZASPALIS V T. Temperature stable MnZn ferrites for applications in the frequency region of 500 kHz[J]. Ceram Intern, 2016: S0272884216002224.
- [3] 罗金花. 5G 基站配套基础设施节能降耗技术研究[J]. 江西通信科技, 2020(4): 4.
LUO Jinhua. Jiangxi Commun Sci Technol (in Chinese), 2020(4): 4.

- [4] ANDALIB P, HARRIS V. Grain boundary engineering of power inductor cores for MHz applications[J]. *J Alloys Compd*, 2019, 832: 153131.
- [5] SILVEYRA J M, FERRARA E, et al. Soft magnetic materials for a sustainable and electrified world[J]. *Science*, 2018, 362(6413): eaao0195.
- [6] LIU D, CHEN X, YING Y, et al. MnZn power ferrite with high Bs and low core loss[J]. *Ceram Int*, 2016, 42(7): 9152–9156.
- [7] 张浩翔, 王能超, 诸葛凯, 等. 中高频低损耗 MnZn 铁氧体材料研发进展[J]. *磁性材料及器件*, 2021, 52(3): 85–89.
ZHANG Haoxiang, WANG Nengchao, ZHUGE Kai, et al. *J Magn Mater Device* (in Chinese), 2021, 52(3): 85–89.
- [8] 韩志全. 软磁铁氧体研究国内外近期动态[J]. *磁性材料及器件*, 2010, 41(2): 1–10.
HAN Zhiquan. *J Magn Mater Device* (in Chinese), 2010, 41(2): 1–10.
- [9] 韩志全. 软磁铁氧体生产国内外近期动态[J]. *磁性材料及器件*, 2010, 41(1): 1–35.
HAN Zhiquan. *J Magn Mater Device* (in Chinese), 2010, 41(1): 1–35.
- [10] WU G H, YU Z, TANG Z, et al. Effect of CaCO_3 and V_2O_5 on the microstructure and magnetic property of MnZn ferrites[C]// 2018 IEEE Intern Magn Conf (INTERMAG). IEEE, 2018.
- [11] SUN K, LAN Z W, YU Z, et al. Analysis of losses in NiO doped MnZn ferrites[J]. *J Alloys Compd*, 2009, 468(1/2): 315–320.
- [12] GILES A D, WESTENDORP F F, The effect of cobalt substitutions on some properties of manganese Zinc ferrites[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1976, 9(14): 2117–2122.
- [13] TOKATLIDIS S, KOGIAS G, ZASPALIS V T. Low loss MnZn ferrites for applications in the frequency region of 1–3 MHz[J]. *J Magn Magn Mater*, 2018: S0304885317331062.
- [14] WANG N C, YING Y, et al. Development of Mn-Zn power ferrite with low losses over a broad temperature range for applications in the high frequency region of 0.5–3.0 MHz – Science Direct[J]. *Ceram Int*, 2021, (15): 47.
- [15] 余忠, 兰中文, 孙科, 等. 添加钛和锡对锰锌铁氧体微结构和高频性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2006, 34(7): 818–822.
YU Zhong, LAN Zhongwen, SUN Ke, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2006, 34(7): 811–822
- [16] 孙玉坤, 李冬云, 高朋召, 等. 复合添加剂 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{--MoO}_3\text{--Nb}_2\text{O}_5$ 对高磁导率 Mn–Zn 铁氧体微观结构与磁性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(9): 1297–1301.
SUN Yukun, LI Dongyun, GAO Pengzhao, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2016, 44(9): 1297–1301.
- [17] SHOKROLLAHI H, JANGHORBAN K. Influence of additives on the magnetic properties, microstructure and densification of Mn–Zn soft ferrites–science direct[J]. *Mater Sci Eng: B*, 2007, 141(3): 91–107.
- [18] SUN K, WANG J, YANG Y, et al. Influence of $\text{Ta}_2\text{O}_5\text{--Co}_2\text{O}_3$ co-doping on the magnetic property of NiMgCuZn ferrites[J]. *Phys: B Condens Matter*, 2015(476): 122–128.
- [19] WU G H, YU Z, TANG Z, et al. Effect of CaCO_3 and V_2O_5 composite additives on the microstructure and magnetic property of MnZn ferrites[J]. *IEEE Trans on Magn*, 2018, 54(11): 1–7.
- [20] YAN M, YI S B, FAN X, et al. High-frequency MnZn soft magnetic ferrite by engineering grain boundaries with multiple-ion doping[J]. *J Mater Sci Technol*, 2021, 79: 165–170.
- [21] WU G H, YU Z, SUN K, et al. Effect of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ dopant on the magnetic and dielectric properties of high-frequency MnZn power ferrites[J]. *J Magn Magn Mater*, 2020, 513(11): 167095.
- [22] GUO R D, YU Z, et al. Effects of Bi_2O_3 on FMR linewidth and microwave dielectric properties of LiZnMn ferrite[J]. *J Alloys Compd*, 2014, 589(3): 1–4.
- [23] TEO M, KONG L B, LI Z W, et al. Development of magneto-dielectric materials based on Li-ferrite ceramics. II. DC resistivity and complex relative permittivity[J]. *J Alloys Compd*, 2008, 459(1/2): 567–575.
- [24] WU G H, YU Z, SUN K, et al. Ultra-low core losses at high frequencies and temperatures in MnZn ferrites with nano- BaTiO_3 additives–science direct[J]. *J Alloys Compd*, 2020, 821: 153573.
- [25] YING Y, HU X, LI Z C, et al. Low power loss manganese ferrites with the addition of Ta_2O_5 for MHz applications[J]. *J Magn Magn Mater*, 2022, 561: 169699.
- [26] SUN B, CHEN F, XIE D, et al. A large domain wall pinning effect on the magnetic properties of ZrO_2 added Mn–Zn ferrites[J]. *Ceram Int*, 2014, 40(4): 6351–6354.
- [27] LEE J, KIM D, FLEIG J, et al. Geometry and electrical properties of grain boundaries in manganese zinc ferrite ceramics[J]. *J Am Ceram Soc*, 2004, 87(10): 1895–1902.
- [28] ZNIDARSIC A, DROFENIK M. High-resistivity grain boundaries in CaO-doped MnZn ferrites for high-frequency power application[J]. *J Am Ceram Soc*, 1999, 82(2): 359–365.
- [29] JOHNSON MT, VISSER EG. A coherent model for the complex permeability in polycrystalline ferrites[J]. *IEEE Trans on Magn*, 1990, 26(5): 1987–1989.
- [30] ZASPALIS V T, TSAKALOUDI V, KOLENBRANDER M. The effect of dopants on the incremental permeability of MnZn-ferrites[J]. *J Magn Magn Mater*, 2007, 313(1): 29–36.
- [31] HSIANG H, HSI C, LIN R L, et al. Addition of a minor amount of Co_2Y effects on the microstructure, magnetic properties and DC-bias superposition characteristics of low-fire NiCuZn ferrites[J]. *Mater Chem Phys*, 2015, 151(151): 295–300.
- [32] ANDALIB P, HARRIS V G. Grain boundary engineering of power inductor cores for MHz applications[J]. *J Alloys Compd*, 2019, 832(8): 153131.
- [33] ANDALIB P, CHEN Y, HARRIS V G. Concurrent core loss suppression and high permeability by introduction of highly insulating intergranular magnetic inclusions to MnZn ferrite[J]. *IEEE Magn Lett*, 2018, 9(11): 1–5.
- [34] YING Y, FENG J W, et al. Effect of a YIG nanoparticle additive on the magnetic properties of MnZn ferrites for MHz frequency applications[J]. *J Am Ceram Soc*, 2023, 106(1): 251–258
- [35] PANKERT J. Influence of grain boundaries on complex permeability in MnZn ferrites[J]. *J Magn Magn Mater*, 1994, 138(1/2): 45–51.
- [36] ZAAG P. New views on the dissipation in soft magnetic ferrites[J]. *J Magn Magn Mater*, 1999, 196–197(1–3): 315–319.
- [37] MIYOSHI Y, OKAMOTO N, KAGEYAMA K. Preparation of Mn-Zn Ferrites Having Fine Grain Size[J]. *J Jpn Soc Powder Powder Metall*, 2009, 39(11): 1011–1014.
- [38] PAPAZOGLU P, ELEFTHERIOU E, ZASPALIS V T. Low sintering temperature MnZn-ferrites for power applications in the frequency region of 400 kHz[J]. *J Magn Magn Mater*, 2006, 296(1): 25–31.
- [39] HANDA S, OHSHIMA Y, NAKASATO Y. Magnetic properties and magnetization process of low temperature sintering MnZn ferrites[J]. *J Jpn Soc Powder Powder Metall*, 2006, 53(3): 231–236.
- [40] HIROTA K, AOYAMA T, ENOMOTO S, et al. Microstructures and magnetic and electric properties of low-temperature sintering Mn–Zn ferrites without and with addition of lithium borosilicate glass[J]. *J*

- Magn Magn Mater, 1999, 205(2): 283–289.
- [41] YING Y, XIONG X B, et al. Low temperature sintered MnZn ferrites for power applications at the frequency of 1 MHz[J]. J Eur Ceram Soc, 2021, 41(12): 5924–5930.
- [42] 沈鑫腾, 应耀, 王能超, 等. 软磁铁氧体磁性能的应力敏感性及其研究进展[J]. 磁性材料及器件, 2022, 53(1): 106–111.
SHEN Xinteng, YING Yao, WANG Nengchao, et al. J Magn Mater Device (in Chinese), 2022, 53(1): 106–111.
- [43] LI Z C, YING Y, et al. Effect of compressive stress on power loss of Mn–Zn ferrite for high-frequency applications[J]. Ceram Int, 2022, 48(12): 17723–17728.
- [44] LE F, et al. Effect of pressure on soft magnetic materials[J]. IEEE Trans Magn, 1981, 17(6): 3129–3134.
- [45] VARASTEGANI N, YOURDKHANI A, EBRAHIMI S, et al. Varistor and electrical properties of MgO. $(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{1-x}(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x$ ceramics[J], J Eur Ceram Soc, 2020, 40(4): 1325–1329.
- [46] LUO G, HONG Y, ZHOU W, et al. Effect of chromium substitution on structural, electrical and magnetic properties of NiZn ferrites[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2020, 30(7): 1895–1903.
- [47] LORD H, PARKER R, Electrical resistivity of nickel ferrite[J]. Nature, 1960, 188(4754): 929–930.
- [48] AHMED M, ATEIA M, SALAH L, et al. Structural and electrical studies on La^{3+} substituted Ni–Zn ferrites[J]. Mater Chem Phys, 2005, 92(2/3): 310–321.
- [49] HUSSAIN A. BAI G Bai, et al. Co_2O_3 and SnO_2 doped MnZn ferrites for applications at 3–5 MHz frequencies[J]. Ceram Int, 2019, 45(9): 12544–12549.
- [50] WANG X, YI S, et al. Correlating the microstructure and magnetic properties of MnZn power ferrites via Co_2O_3 and MoO_3 co-doping for MHz applications[J]. J Magn Magn Mater, 2021, 538(11): 168324.