

2023 年度青岛市科学技术奖（自然科学奖）提名公示

项目名称：5G/6G 通讯用微波陶瓷的晶格动力学研究及新材料新器件研发

提名者及提名意见：

提名者：山东科技大学

提名意见：我单位认真审阅了该项目提名书及其附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目均符合青岛市科学技术奖励的填写要求。按照要求，我单位和项目完成单位及完成人所在工作单位都已对该项目的拟提名材料情况进行了公示，公示期间无异议。

该项目针对材料研究中存在的“炒菜”现象和普遍采用的“试错”方法，以晶格动力学为根本出发点，对 5G/6G 通讯用微波陶瓷元器件基础理论、关键材料与核心技术进行了深入研究，取得了下列创新成果：1) 通过微波陶瓷晶格动力学研究深入认识了材料的内禀性质，从原子/分子层面阐明了介电响应机制，揭示了其微结构根源，半定量地建立了构效关系；2) 以此理论为指导，研发了 30 多个可实用化的性能优异的面向毫米波/亚毫米波的新材料新体系；3) 利用研发的上述材料，提出了滤波器和天线等微波陶瓷原型器件的设计方法，开发出满足各运营商不同频段基站需求的滤波器、微带谐振天线及 WIFI-6/E 模组，为上述中低介电常数新材料体系在 5G/6G 通讯上应用提供了原型器件与示范。这些创新性的研究成果产生了良好的经济和社会效益，研发的新材料在深圳顺络电子等企业得到应用，实现了产业化应用。我单位认真审阅了该项目的推荐书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目符合山东省科学技术奖励委员会办公室的填写要求。

提名等级：青岛市自然科学一等奖

项目简介：

由山东科技大学、桂林理工大学、杭州电子科技大学和齐鲁工业大学合作完成的“5G/6G 通讯用微波陶瓷的晶格动力学研究及新材料新器件研发”项目，多年来在国家自然学科基金和山东省自然科学基金等 30 多个项目支持下，对微波介质陶瓷基础理论（含内禀性质、介电响应机制、构效关系）以及 5G/6G 通讯用微波陶瓷新材料新体系和新型元器件开发等方面进行了深入系统的研究，获得

了重要进展。

5G 技术是下一代移动通信、雷达、导航、远程医疗、WIFI、蓝牙、物联网及武器装备和电子对抗等通信技术的主要发展方向，是全球向数字化、网络化、智能化转型的基石，在军事和民用领域具有重要的战略意义。随着 5G 网络规模化商用步入快车道，针对 6G 通信的研发布局已全面拉开帷幕，带来新的技术趋势，微波介质陶瓷相关材料和器件的研究面临着诸多挑战与机遇。当今微波通信和雷达技术快速发展，微波技术向着更高的毫米波和亚毫米波频段延伸；而 5G 技术就是工作在毫米波频段，国际电信联盟宣布的频谱中的部分毫米波频段或可用于 6G 技术。面对层出不穷的微波陶瓷新材料及 5G/6G 技术的高标准和严要求，要加深对新型微波陶瓷基础理论的理解和诠释，研究适用于 5G/6G 技术的微波陶瓷新材料，掌握 5G/6G 介质陶瓷器件关键技术。

本项目针对微波陶瓷材料研究中存在的“炒菜”现象和普遍采用的“试错”方法，以晶格动力学为根本出发点，对 5G/6G 通讯用微波介质陶瓷元器件基础理论及关键材料与核心技术进行了深入研究，取得了下列创新成果：

1) 结合第一性原理方法剖析声子特性，对声子模式进行了精确指认和描述，突破了无机非金属氧化物材料在复杂氧环境下晶格振动模式难以标准化的难题。利用四参数模型拟合了微波陶瓷的介电性质，揭示了红外声子模式与陶瓷介电性能之间的关系；以声子模式为媒介建立了多种结构微波陶瓷新材料新体系的组分-工艺-结构-性能关系（构效关系）。对微波陶瓷晶格动力学的理论研究，有利于深入诠释其在本征条件下的内禀性质，为架构结构性能调控的精准物理模型提供了部分数据支撑，便于从材料科学的高度指导微波陶瓷新材料的设计。

2) 通过组分裁剪及结构调控实现温度系数的有效调节和品质因数的大幅度提升，开发了如钙钛矿基固溶体陶瓷、钼基钨基低共熔点单相陶瓷、磷酸盐硅酸盐系列陶瓷及 B 位无序的锂基尖晶石陶瓷等 30 多个性能优异的中低介电常数新材料，为 5G/6G 通讯开发了一系列具有自主知识产权的高品质微波陶瓷。

3) 基于新材料与 5G/6G 通讯需求，提出了微波陶瓷原型器件的设计方法，开发出满足各运营商不同频段基站需求的 Sub6GHz 谐振器、波导滤波器、基板和微带谐振天线与 6G 毫米波滤波器以及 WIFI-6/E 模组，为上述中低介电常数新材料体系在 5G/6G 通讯上应用提供了原型器件与示范。

该项目解决了无微波陶瓷在复杂氧环境下声子模式难以标准化的难题,推动了微波陶瓷晶格振动光谱学研究,开发了系列高性能微波材料和原型器件。研究成果获得国内外同行专家的广泛关注和高度评价,部分材料成功实现产业化。

代表性论文专著目录: *通讯作者

- 1) Chao Xing, Jianzhu Li, Jing Wang, Huiling Chen, Hengyang Qiao, Xunqian Yin, Qing Wang, Ze-ming Qi, Feng Shi*, Internal Relations between Crystal Structures and Intrinsic Properties of Non-Stoichiometric $Ba_{1+x}MoO_4$ Ceramics, *Inorganic Chemistry*, 2018, 57(12): 7121-7128.
- 2) En-Cai Xiao, Jianzhu Li, Jing Wang, Chao Xing, Mei Guo, Hengyang Qiao, Gang Dou*, Feng Shi*, Phonon characteristics and dielectric properties of $BaMoO_4$ ceramic, *Journal of Materiomics*, 2018, 4(4): 383-389.
- 3) En-cai Xiao, Zhikai Cao, Jianzhu Li, Xue-Hui Li*, Mengting Liu, Zhenxing Yue, Ying Chen, Guohua Chen, Kaixin Song, Huanfu Zhou, Feng Shi*, Crystal structure, dielectric properties, and lattice vibrational characteristics of $LiNiPO_4$ ceramics sintered at different Temperatures, *Journal of the American Ceramic Society*, 2020, 103(4): 2528-2539.
- 4) Qianbi Lin, Bing Liu, Hadi Barzegar Bafrooei, Di Zhou, WeitaoSu, Feng Shi, Dawei Wang, Huixin Lin, Ian M.Reaney, Vibrational spectroscopy and microwave dielectric properties of $AY_2Si_3O_{10}$ (A = Sr, Ba) ceramics for 5G applications, *Ceramics International*, 2020, 46(1): 1171-1177.
- 5) Huanfu Zhou, Xiaobin Liu, Xiuli Chen, Liang Fang, Yiliang Wang, $ZnLi_{2/3}Ti_{4/3}O_4$: A new low loss spinel microwave dielectric ceramic, *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, 32(2): 261-265.

主要完成人情况:

1) 石锋, 男, 教授; 第一完成人, 多晶/非晶山东省高校重点实验室主任、齐鲁工业大学先进陶瓷材料研究所所长。项目完成时单位为山东科技大学, 现工作单位为齐鲁工业大学(山东省科学院)。对本项目主要贡献: 主要完成微波陶瓷晶格动力学研究, 包括揭示声子特性、剖析介电响应机制和微结构根源, 以声子模式为媒介构建结构-性能关系, 获得组分裁剪和工艺参数变化对微波陶瓷材

料进行协调改性的重要指南。

2) 周焕福, 男, 教授; 第二完成人, 发展规划处处长。项目完成时单位为桂林理工大学, 现工作单位为桂林理工大学。对本项目主要贡献: 从材料科学的角度出发, 开展新型锂基尖晶石陶瓷的缺陷、有序/无序相变及微波介电性能研究, 获得了一系列面向毫米波/亚毫米波应用的新型介质材料; 诠释了 LTCC 陶瓷的低温烧结机理及介质与银电极的界面反应机制等基础科学问题, 开发的部分材料成功实现产业化。

3) 宋开新, 男, 教授; 第三完成人, 无行政职务。项目完成时单位为杭州电子科技大学, 现工作单位为杭州电子科技大学。对本项目主要贡献: 从移动通信技术向微波频带高频段发展需求出发, 选择甚低介电常数镁基堇青石单相组分为研究基础, 在调控堇青石晶体结构内 $[\text{Si}_4\text{Al}_2\text{O}_{18}]$ 四面体和外 $[\text{Mg}_6\text{O}_{36}]$ 八面体基元六元环对称性与圆度过程中, 研发出一系列适用于 5G/6G 通讯使用的新型温度稳定的微波介质陶瓷材料。

4) 窦刚, 男, 副教授; 第四完成人, 无行政职务。项目完成时单位为山东科技大学, 现工作单位为山东科技大学。对本项目主要贡献: 以声子模式为媒介构建了材料的工艺-组分-结构-性能之间的内在关系。

5) 郭梅, 女, 教授; 第五完成人, 无行政职务。项目完成时单位为山东科技大学, 现工作单位为山东科技大学。对本项目主要贡献: 对提高介电性能测试精度做出了贡献, 保证了结构-性能关系的建立。

6) 徐越, 男, 副教授, 第六完成人, 无机非金属材料工程系系主任。项目完成时单位为齐鲁工业大学, 现工作单位为齐鲁工业大学。对本项目主要贡献: 协助第一完成人在结构调控和性能优化方面做出了贡献, 成功研发了钙钛矿基、钒酸盐、钨酸盐、钼酸盐和磷酸盐等多个高性能微波介质陶瓷新材料, 开拓了 Al 电极在 LTCC 技术中的应用, 论证了 Al 电极取代 Ag 电极的可能性。

7) 张灵翠, 女, 讲师, 第七完成人, 无行政职务。项目完成时单位为齐鲁工业大学, 现工作单位为齐鲁工业大学。对本项目主要贡献: 以声子模式为媒介构建了材料的工艺-组分-结构-性能之间的内在关系, 研发出钒酸盐、钨酸盐等一系列新型超低温烧结微波介质陶瓷材料。

8) 沈燕, 女, 讲师, 第八完成人, 无行政职务。项目完成时单位为齐鲁工

业大学，现工作单位为齐鲁工业大学。对本项目主要贡献：对提高介电性能测试精度做出了贡献，保证了结构-性能关系的建立。

9) 赵金博，男，讲师，第九完成人，无行政职务。项目完成时单位为齐鲁工业大学，现工作单位为齐鲁工业大学。对本项目主要贡献：协助第一完成人在结构调控和性能优化方面做出了贡献，研发了部分新材料和新器件。