**项目公示信息**

项目名称：钼基微波介质陶瓷本征低烧机理及其介电性能调控机制

完成单位：西安交通大学、西安工业大学、广东风华高新科技股份有限公司、中国科学技术大学

完成人：周迪、庞利霞、夏颂、郝澍钊、戚泽明、党明召

项目简介：

微波介质陶瓷因其良好的电学、力学、热学及工艺特性，广泛应用于无线通讯系统，如卫星直播电视、全球定位卫星、无线局域网、个人通讯系统及雷达等领域。该研究团队长期坚持在微波介质陶瓷新材料与原型器件开发与应用方领域，围绕新材料-原型器件-基础理论展开了富有特色的研究工作。该成果围绕4G/5G通讯领域中面临的微波器件集成化、小型化等亟需解决的问题，研究介电常数系列本征低温烧结钼基微波介质陶瓷，**利用MoO4四面体的不同连接方式，在Li2O-MoO3、Bi2O3-MoO3二元体系，(Li2O,Na2O)-Bi2O3-MoO3三元体，(Li2O,Na2O,K2O)-Bi2O3-MoO3-V2O5四元体系中构建了本征低烧的尖晶石型、温度稳定型白钨矿型及多元复合型本征低温烧结钼基微波介质陶瓷。利用红外反射光谱及THz谱拟合计算复介电常数ε\*的方法，将振动模式与其对介电性能的贡献联系起来，从而揭示了晶格结构、极化贡献及宏观介电性能的关系**。通过丝网印刷、热等静压的方法制备出多层的超低温共烧电容器原型器件。该成果推动了微波介质陶瓷在4G/5G通讯器件集成制备技术中的应用，对本征低烧低损微波介质陶瓷的研发具有重要科学意义和应用价值。

主要发现点有：

**1．开发了多款低K值本征低温烧结微波介质陶瓷，其中Li2MoO4陶瓷可以在540摄氏度下致密烧结，介电常数5.5、Qf值高达46,000GHz，与美国Ferro公司商用A6m材料（5G技术中LTCC主流材料、粉体及浆料禁运）相比，该体系烧结温度降低了36%，介电常数减小了10%，损耗降低一个数量级；其中尖晶石结构NaAgMoO4陶瓷烧结温度低至400摄氏度，为目前报道之最，其介电常数为7.9，Qf值为**33,000GHz；基于该系列钼基本征低烧陶瓷，实现了低于300摄氏度的冷烧结技术。

**2. 在(Li2O,Na2O)-Bi2O3-MoO3三元体系中，开发了多款温度稳定型中K值本征低温烧结微波介质复合陶瓷。利用其中正温度系数的Bi2Mo2O9和负温度系数的Bi2Mo3O12可以设计制备Bi2O3-2.2MoO3组分的复合陶瓷，其烧结温度为620摄氏度，介电常数35，Qf=12000GHz，温度系数近零；利用正温度系数的(Na0.5Bi0.5)MoO4及负温度系数的Bi2Mo3O12可以设计温度稳定型的0.8(Na0.5Bi0.5)MoO4-0.2 Bi2Mo3O12，烧结温度为680摄氏度，介电常数为29.8，Qf=11,800GHz。该系列三元体系中温度系数互补的几个单相陶瓷为设计温度稳定型本征低烧微波介质陶瓷提供了多种解决方案。**

**3．采用碱金属离子（Li+、Na+、 K+、Ag+）、碱土金属离子（Ba2+、Sr2+、Ca2+）及三价离子（Bi3+、Ln3+系）联合占据白钨矿结构八配位的A位，采用小离子半径的三价离子Fe+3、Ga+3、In+3，五价离子V5+、Sb5+等、六价离子Mo6+、W6+等占据白钨矿结构四配位的B位，辅以缺陷调控及复合陶瓷等方式，拓展了一系列A位有序无序、B位有序无序构型的新型白矿结构本征低烧微波介质陶瓷，为相关研究提供了理论依据。**

**4．高K微波介质陶瓷可以有效减小微波器件的尺寸，具备本征低烧结温度的高K值微波介质陶对LTCC领域尤为重要。本项目利用Lyddane–Sachs–Teller理论，采用一三价复合离子占据A位，五六价复合离子占据B位的方式，成功将白钨矿结构的相变温度调整至室温附近，从而在室温附近获得了高介电常数；进一步采用温度系数TCF互补陶瓷叠层共烧及大颗粒共烧的方法在室温至120度范围构建了介电常数>70，Qf>8,000GHz，谐振频率温度系数TCF<±20ppm/℃的本征低烧微波介质陶瓷。**

**5．提出了利用红外反射光谱及THz谱拟合计算复介电常数ε\*的方法，将振动模式与其对介电性能的贡献联系起来，从而揭示了晶格结构、极化贡献及宏观介电性能的关系。**

该项目5篇代表性论文发表在**Journal of the American Ceramic Society、ACTA Materialia、Journal of the European Ceramic Society、Journal of Materials Chemistry C**等业内一流学术期刊，被来自23个国家的260余名同行在37种期刊的328篇文章引用，**SCI他引450次**，研究成果得到世界陶瓷科学院院士、中国科学院院士、美国陶瓷学会会士、芬兰技术科学院院士、IEEE UFFC铁电成就奖获得者等知名学者的引用和高度评价。该项目主要完成人周迪在国际学术会议上做特邀报告20余次，获2012年**全国百篇优秀博士论文提名**，2016年获**陕西省青年科技新星称号**；2018年起担任电子元器件关键材料与技术专业委员会委员；2019年起担任中国电子学会元件分会委员；入选英国皇家化学会2019年度Top 1% 高被引中国作者；2020年起担任**美国陶瓷学会会刊副编**、**材料研究快报编委及先进电介质编委；2020年入选国家级青年人才计划；2020年获得电子元器件关键材料专委会青年才俊奖；2021年起担任国际应用陶瓷技术杂志副编、ACS应用材料与界面杂志顾问委员会成员、中国电子学会高级会员、电气与电子工程师协会高级会员**（IEEE Senior Member）；2021年获得陕西省教育教学成果一等奖1项（第三完成人）、特等奖1项（第九完成人）；2022年获高等教育（本科）国家级教学成果奖、“深化通专融合普遍提升表达思辨素养，依托国家平台精准赋能拔尖双创人才”（第十完成人）；**2023年获第十五届中国硅酸盐学会青年科技奖；2023年获西安交通大学研究生教育优秀导师**。近年来主持国家自然科学基金3项、装备发展部项目、陕西省国际合作项目、华为公司横向课题等，在微波介质材料结构性能调节、低温共烧陶瓷技术应用、新型介质谐振器设计等方面取得一系列新颖的研究成果，**在国际知名期刊发表科技论文300余篇，总引用次数14000余次（H因子=64）。**

**主要论文专著目录**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 论文专著名称 | 刊名 | 作者 | 发表时间 | 通讯作者 | 第一作者 |
| 1 | Microwave Dielectric Ceramics in Li2O-Bi2O3-MoO3 System with Ultra-Low Sintering Temperatures | Journal of the American Ceramic Society | 周迪、Clive Randall、汪宏、庞利霞、姚熹 | 2010 | 周迪 | 周迪 |
| 2 | Structure, spectral analysis and microwave dielectric properties of novel x(NaBi)(0.5)MoO4-(1-x)Bi2/3MoO4 (x=0.2 similar to 0.8) ceramics with low sintering temperatures | Journal of the European Ceramic Society | 郝澍钊、周迪、Fayaz Hussain、刘文凤、苏进展、王大伟、王秋萍、戚泽明、Charanjeet Singh、Sergei Trukhanov | 2020 | 周迪 | 郝澍钊 |
| 3 | Novel ultra-low temperature co-fired microwave dielectric ceramic at 400 degrees and its chemical compatibility with base metal | Scientific Reports | 周迪、庞利霞、戚泽明、姚熹 | 2014 | 周迪 | 周迪 |
| 4 | Microwave dielectric properties of (ABi)(1/2)MoO4 (A = Li, Na, K, Rb, Ag) type ceramics with ultra-low firing temperatures | Materials Chemistry and Physics  | 周迪、Clive Randall、庞利霞、汪宏、郭靖、张高群、吴颖、郭珂婷、税利、姚熹 | 2011 | 周迪 | 周迪 |
| 5 | Ferroelastic phase transition compositional dependence for solid-solution [(Li0.5Bi0.5)(x)Bi1-x][MoxV1-x]O-4 scheelite-structured microwave dielectric ceramics | Acta Materialia  | 周迪、屈卫国、Clive Randall、庞利霞、汪宏、吴新光、郭靖、张高群、税利、王秋萍、刘汉臣、姚熹 | 2011 | 周迪 | 周迪 |
| 6 | Ultra-low temperature co-fired ceramics with adjustable microwave dielectric properties in the Na2O-Bi2O3-MoO3 ternary system: a comprehensive study | Journal of Materials Chemistry C | 郝澍钊、周迪、庞利霞、党明召、孙世宽、周涛、Sergei Trukhanov、Alex Trukhanov、Antonio Sergio Bezerra Sombra、李强、张秀群、夏颂、Moustafa A. Darwish | 2022 | 周迪、党明召 | 郝澍钊 |
| 7 | Phase Evolution, Phase Transition, Raman Spectra, Infrared Spectra, and Microwave Dielectric Properties of Low Temperature Firing (K0.5xBi1-0.5x)(MoxV1-x)O-4 Ceramics with Scheelite Related Structure | Inorganic Chemistry | 周迪、庞利霞、郭靖、汪宏、姚熹、Clive Randall | 2011, | 周迪 | 周迪 |
| 8 | Low temperature firing microwave dielectric ceramics (K(0.5)Ln(0.5))MoO4 (Ln =Nd and Sm) with low dielectric loss | Journal of the European Ceramic Society | 周迪、庞利霞、郭靖、张高群、吴颖、汪宏、姚熹 | 2011 | 周迪 | 周迪 |

**主要知识产权证明目录**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权名称 | 国家（地区） | 授权号 | 授权日期 | 证书编号 | 权利人 | 发明人 |
| 1 | 发明专利 | 一种超低温烧结的复合微波介质陶瓷材料及其制备方法 | 中国 | ZL201911052856.2 | 2021-01-19 | 4212524 | 西安交通大学 | 周迪、郝澍钊、郭欢欢、吴芳芳、李文艺、李睿韬、任佳佳 |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 8 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 9 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 10 |  |  |  |  |  |  |  |  |

**注意：主要论文专著+主要知识产权的条目数不得超过10项！**

**完成人合作关系情况汇总表**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 合作方式 | 合作关系人及排名 | 合作时间 | 合作成果 |
| 1 | 论文合著 | 周迪/第一完成人、庞利霞/第二完成人 | 2010 | Microwave Dielectric Ceramics in Li2O-Bi2O3-MoO3 System with Ultra-Low Sintering Temperatures  |
| 2 | 论文合著 | 郝澍钊/第四完成人、周迪/第一完成人 | 2020 | Structure, spectral analysis and microwave dielectric properties of novel x(NaBi)(0.5)MoO4-(1-x)Bi2/3MoO4 (x=0.2 similar to 0.8) ceramics with low sintering temperatures |
| 3 | 论文合著 | 周迪/第一完成人、庞利霞/第二完成人、戚泽明/第三完成人 | 2014 | Novel ultra-low temperature co-fired microwave dielectric ceramic at 400 degrees and its chemical compatibility with base metal |
| 4 | 论文合著 | 周迪/第一完成人、庞利霞/第二完成人 | 2011 | Microwave dielectric properties of (ABi)(1/2)MoO4 (A = Li, Na, K, Rb, Ag) type ceramics with ultra-low firing temperatures |
| 5 | 论文合著 | 周迪/第一完成人、庞利霞/第二完成人 | 2011 | Ferroelastic phase transition compositional dependence for solid-solution [(Li0.5Bi0.5)(x)Bi1-x][MoxV1-x]O-4 scheelite-structured microwave dielectric ceramics |
| 6 | 论文合著 | 郝澍钊/第四完成人、周迪/第一完成人、庞利霞/第二完成人、党明召/第六完成人、夏颂/第三完成人 | 2022 | Ultra-low temperature co-fired ceramics with adjustable microwave dielectric properties in the Na2O-Bi2O3-MoO3 ternary system: a comprehensive study |
| 7 | 论文合著 | 周迪/第一完成人、庞利霞/第二完成人 | 2011 | Phase Evolution, Phase Transition, Raman Spectra, Infrared Spectra, and Microwave Dielectric Properties of Low Temperature Firing (K0.5xBi1-0.5x)(MoxV1-x)O-4 Ceramics with Scheelite Related Structure |
| 8 | 论文合著 | 周迪/第一完成人、庞利霞/第二完成人 | 2011 | Low temperature firing microwave dielectric ceramics (K(0.5)Ln(0.5))MoO4 (Ln =Nd and Sm) with low dielectric loss |
|  |  |  |  |  |