http://pmse.scu.edu.cn

构建2D/3D致密的声子传输网络协同提高微波基板的导热性能

张立欣[1,2]，王维文[3]，沈 杰[1,4]，韩伏龙[2]，金 霞[2]，郑胜杰[2]

（1.武汉理工大学 材料科学与工程学院，湖北 武汉 430070；2. 中国电子科技集团公司第四十六研究所，天津 300220；
3. 阜阳师范大学 物理与电子工程学院，安徽 阜阳 236031；4. 湖北隆中实验室，湖北 襄阳 441022）

摘要：随着“5G”时代的到来和信息技术革命的深入，电子元器件正朝着高集成化、小型化、高功率化和高性能化方向发展，要求器件具有更好的散热性。文中将具有高导热性能的六方氮化硼(h-BN)作为2D陶瓷填料，并与3D形貌的SiO_2协同引入到聚四氟乙烯(PTFE)基微波基板中，二者相互搭接，成功构建了致密的声子传输网络，相较于单一填料，极大地提高了介质层的热导率(由0.6 W/(m·K)提升到1.196 W/(m·K)，提高了99.33%)。与此同时，微波基板仍然保持了PTFE介质层较低的介质损耗、合适的介电常数和较高的剥离强度。当h-BN添加量达到26%时，介质层的热导率达到了1.196 W/(m·K)，介质损耗因子为0.0008，剥离强度为1.072 N/mm。为新型高导热基板介质层的开发提出了一种通过构建2D/3D协同致密声子网络，进而提高基板导热性能的思路。

关键词：聚四氟乙烯；六方氮化硼；微波基板；声子传输网络；协同作用
中图分类号：TN604 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555(2024)10-0137-07

随着电子技术的飞速发展和“5G”时代的到来，电子元器件正朝着小型化、集成化和高功率化方向发展[1~4]。在微波范围内使用的覆铜板(Copper clad laminate，CCL)也被称为微波基板，微波基板使用环境中波长短、能量高，产生的大量热量来不及释放，会在局部聚集，使器件的稳定性、安全性和可靠性大大降低[5,6]。因此，提高PTFE复合介质基板的导热性能对新一代高功率器件的发展至关重要[7~10]。

六方氮化硼(h-BN)由于高的理论导热系数(25~30 W/(m·K))、低的相对介电常数(~4)、高电阻率(10^{16}~10^{18} Ω·cm，禁带宽度为5.0~6.0 eV)、无毒性和良好的力学性能等优势，常被添加到聚合物基体中用于增强复合材料的导热性能[11~13]。其机理是片状h-BN暴露的(002)晶面能够提高声子的传输速率，进而增强复合材料的导热性能。张晓星[14]和毕世杰[15]等分别将h-BN填充到环氧树脂中以改善环氧树脂复合材料的导热性能。但是，在CCL复合体系中，单一h-BN填料很难大幅提高其导热性能，只有大量添加h-BN时，h-BN相互搭接才能形成致密的导热网络，进而极大提高CCL的导热性能。然而，过量的填料会引起基板力学性能和介电性能的恶化。因此，设计添加多维度填料，使不同填料之间的搭接效率大大提高，在添加较少填料的基础上就可以实现较高的导热性能，但是，考虑到不同填料之间介电性能、热膨胀系数与力学性能的不匹配性，设计这种多维度填料系统的复合材料具有很大的难度，目前在CCL领域还未见报道。

为解决上述问题，提高高频微波基板的导热性能，将2D片层状的h-BN和3D球状的SiO_2协同引入到PTFE基体中，2D片层结构和3D颗粒之间通过互相搭接形成连续的声子传输网络，可以提高介质层的导热性能；2D/3D相互搭接形成的统一整体也可

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0196
收稿日期：2024-01-01
基金项目：湖北省自然科学基金杰出青年基金(201CFA067)；湖北襄阳隆中实验室开放基金(2024KF-04)
通讯联系人：沈杰，主要从事无机/聚合物材料及其应用的研究，E-mail: shenjie@whut.edu.cn；
王维文，主要无机/聚合物材料在能源/电子行业的应用研究，E-mail: 13281261532@163.com

以有效提高介质层的剥离性能，进而解决上述力学性能的问题。本文以低介电损耗的PTFE为树脂基体，h-BN和SiO_2为增强材料，协同增强材料的导热性能。研究表明，具有最佳h-BN/SiO_2填充比例的微波基板显示出1.196 W/(m·K)的热导率，相比未添加h-BN的样品，其热导率提升了99.33%。通过对微波基板的表面形貌、导热率、介电损耗、剥离性能、热膨胀系数、吸水率等指标的测试，建立了材料结构与性能之间的关系，为高导热微波基板的开发提出了一种合理的思路。

1 实验部分

1.1 主要原料

采用美国杜邦公司生产的固含量为60%的Disp 30型PTFE乳液为树脂基体；氮化硼（BN，Standard Platelets，D_{50}为16 μm）由圣戈班公司（Saint-Gobain）提供；采用壹石通公司生产的SiO_2（D_{50}为15 μm）陶瓷粉。

1.2 实验方法

为兼顾信号传播速率和器件尺寸的要求，介电常数为3.50的微波基板在电子行业具有较大的应用前景，基于此，本文开发了具有高导热系数、介电常数为3.50的微波基板。第1步，将50 g硅烷偶联剂分散于450 g乙醇中，搅拌120 min充分混合，配制得到改性溶液；在混合机器中，分别将180 g改性溶液均匀喷洒在1200 g h-BN陶瓷粉上，将240 g改性溶液均匀喷洒在1600 g SiO_2陶瓷粉上，分别在80 ℃烘干4 h，并过80目筛网，得到改性h-BN陶瓷粉和改性SiO_2陶瓷粉。第2步，将38% PTFE（折算干粉质量）+ 62%改性陶瓷粉混合（Tab.1），再通过絮凝-干燥-预成型等操作，采用成型仪器将胚体反复成型，制成厚度1 mm的生基片。第3步，将2层生基片叠层，双面覆以铜箔，放置在高温真空层压机中，在380 ℃和20 MPa下热压烧结，制备得到具有不同h-BN/SiO_2比例的微波基板，样品名称和陶瓷粉添加量如Tab.1所示。

1.3 测试与表征

除了剥离测试，所有的测试都是基于表面铜箔被腐蚀后的介质层进行的。

1.3.1 形貌表征：采用液氮脆断和溅射喷金方法制备SEM断面测试样品，使用德国蔡司公司SUPRA 55VP场发射扫描电镜分析样品的微观形貌。加速电压为15 kV。

1.3.2 导热系数测试：采用ASTM C518标准测试介质层的导热系数。

1.3.3 吸水率测定：采用IPC-TM-650 2.6.2法测试复合基板材料的吸水率。

1.3.4 剥离强度测试：采用吉林冠腾WDW-50型万能拉力机测试基板的剥离强度。

1.3.5 介电常数测定：参考国标GB/T 12636-1990，采用美国Agilent公司网络分析仪配合带状线测试夹具对样品在X波段(8~12 GHz)的介电常数进行测试。

2 结果与讨论

2.1 h-BN-SiO_2/CCL的压延制备过程

信号传播速率与介电常数的平方根成反比，介电常数越小，信号传播速度就越快；另一方面，器件的尺寸与介电常数的平方根成反比，介电常数越大，越有利于器件的小型化。因此，实际应用时需要兼顾信号传播速率和器件尺寸的要求，在某些特定领域，介电常数为3.50的微波基板具有重要应用价值，市场上代表性产品有美国Rogers的TC350/TC350 Plus，Taconic公司的RF-35A2等。为实现高品质电子产品国产化替代，本文开发了具有高导热系数、介电常数为3.50的微波基板，并对其各项指标进行了表征。

Tab. 1 Different contents of h-BN and SiO_2 for different samples

Name of sample	w(h-BN)/%	w(SiO_2)/%	w(PTFE)/%
h-BN-SiO_2/CCL-0	0	62	38
h-BN-SiO_2/CCL-1	22	40	38
h-BN-SiO_2/CCL-2	26	36	38
h-BN-SiO_2/CCL-3	30	32	38
h-BN-SiO_2/CCL-4	34	28	38

为了开发上述具有3.50介电常数（D_k）的微波基板，本文采用先进的压延工艺，如Fig.1所示，先利用KH792和PTMS对SiO_2和h-BN陶瓷粉进行改性；再通过混合絮凝-干燥-预成型等操作，采用成型仪器将胚体反复成型，制成厚度1 mm的生基片；数层生基片叠成一定厚度，双面覆以铜箔，放置在高温真

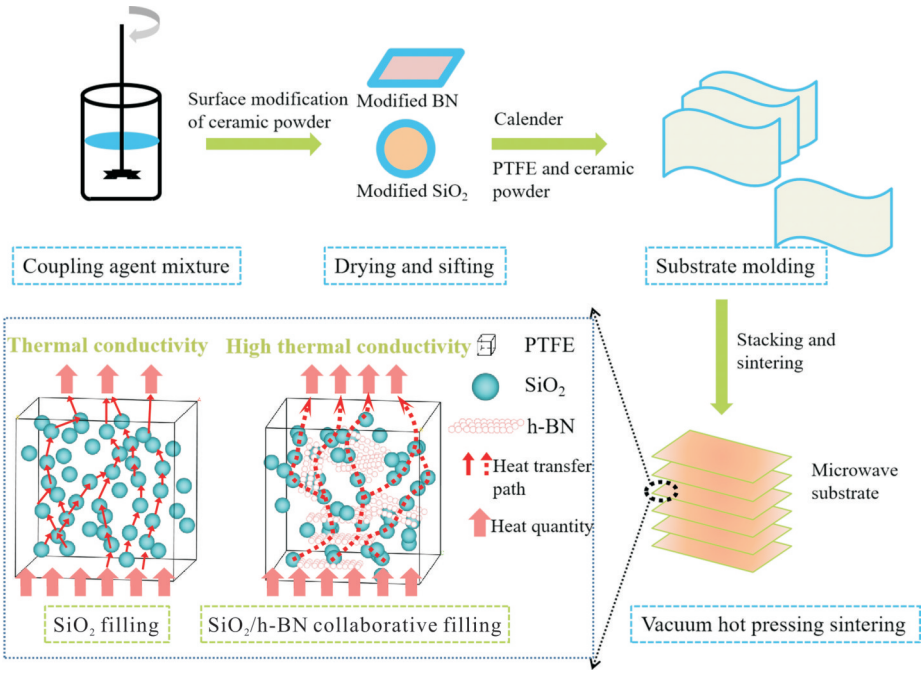


Fig. 1 Preparation method and diagrammatic illustration for h-BN-SiO_2/CCL

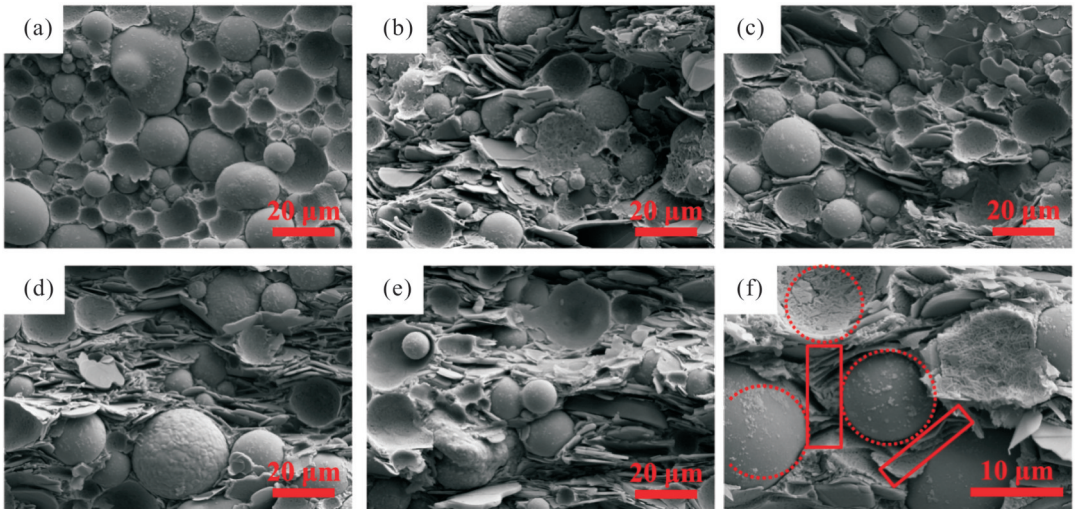


Fig. 2 SEM images of h-BN-SiO_2 filled PTFE: (a) h-BN-SiO_2/CCL-0; (b) h-BN-SiO_2/CCL-1; (c, f) h-BN-SiO_2/CCL-2; (d) h-BN-SiO_2/CCL-3; (e) h-BN-SiO_2/CCL-4

空层压机中层压，得到了不同h-BN含量的微波基板（h-BN-SiO_2/CCL-x，x=0,1, 2, 3, 4），样品命名如Tab.1所示。

2.2 h-BN-SiO_2/CCL的微观形貌分析

Fig.2显示了不同h-BN添加量的基板的脆断面的扫描电镜图，保持所有样品中（SiO_2+h-BN）陶瓷填料总含量不变，Fig.2(a~e)中，h-BN添加量逐渐提高，Fig.2(f)为Fig.2(c)的局部放大图。从图中可以看出，不含h-BN的基板中，存在大量SiO_2/PTFE界面，从而产生大量界面热阻，说明单一填料只有在极高的填充量下才能大幅提升复合材料的导热率；当添加一定量的h-BN后，从Fig.2(f)看出，2D的h-BN和3D的SiO_2相互搭接，形成了致密的声子传输网络，有利于热量的传输。

一般认为，热量在材料中的传导是通过声子作为载体进行的，而声子在材料中的传播与晶格振动有关，这也就是为什么晶体材料的热导率普遍高于高分子材料的原因。为了提高高分子材料的导热

性，采用单一填料填充的方法制备复合材料，但是效果并不理想，因为此时复合材料内部热阻主要是基体和填料之间的界面热阻，只有当颗粒填充量足够多时，颗粒之间通过互相搭接形成连续的声子传输网络，复合材料的导热性才会大幅提高。然而，大量的陶瓷颗粒填充物必然会带来基板力学性能的大幅度下降，为此，本文采用2D和3D（h-BN和SiO_2）协同填充的方式，在较低的2D/3D填料填充量下，就可以形成非常致密的声子传输网络，进而获得高导热性能，较低的填充量可以使力学性能和介电性能得到保证（如Fig.1）。Zhang等[9]的研究也发现，在PPO复合材料中，2种尺寸颗粒相互搭接形成的声子网络可以有效提高介质层的导热性能，而本文所用的2D/3D协同，提高了填料之间相互搭接的程度，可以极大提高介质层的导热性能。

2.3 h-BN-SiO_2/CCL的导热性能分析

Fig.3为不同h-BN含量的微波基板的导热性能。从图中可以看出，仅有SiO_2单一填料填充的基板表现出0.6 W/(m·K)的导热系数，添加22%的h-BN后，材料表现出1.026 W/(m·K)的导热系数，相比于未加h-BN的基板，导热系数具有大幅度提升；进一步优化配方中h-BN的添加量，结果表明，当h-BN添加量为26%时，导热系数达到最大，为1.196 W/(m·K)；当继续增大h-BN的添加量至30%和34%时，导热系数反而降低，分别为1.093 W/(m·K)和0.973 W/(m·K)，原因是SiO_2是球形填料，对PTFE基体具有更好的填充性，过程不易产生宏观缺陷/气孔等，适当比例的h-BN可以和SiO_2相互协同搭接成致密的3D导热网络；当进一步增大片层状h-BN的含量（同时降低SiO_2的含量）会导致复合材料的流动性降低，进而使材料不均匀性增大，宏观气孔等缺陷增多，增加了声子散射程度，降低了材料的导热性能，Ge在他们的研究工作中也发现了类似的现象[7, 13]。总之，通过填充适量的h-BN可以显著提升微波基板的导热性能，通过之前的分析认为，h-BN和SiO_2填料相互搭接，球形SiO_2和片层状h-BN产生协同作用，建立了一个新的导热路径，同时声子自由程大幅降低，形成了致密的导热网络，最终提高了基板的导热性能。

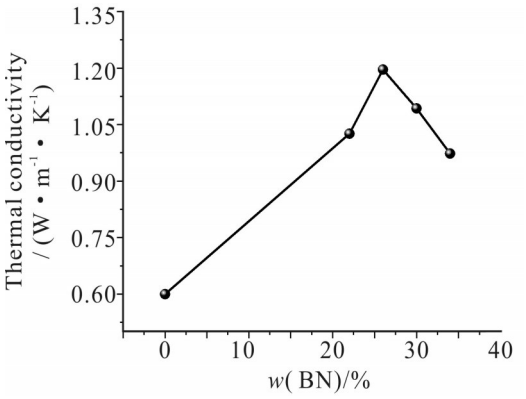


Fig. 3 Effect of different contents of h-BN on thermal conductivity of h-BN/SiO_2-CCL-x

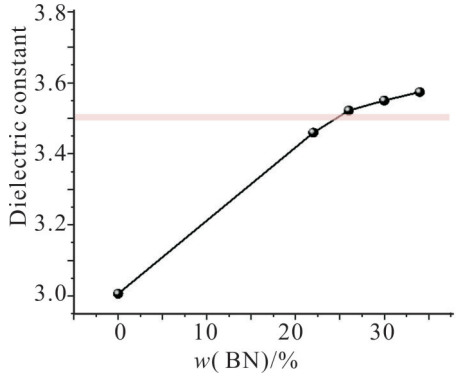


Fig. 4 Effect of different contents of h-BN on dielectric constant of h-BN/SiO_2-CCL-x

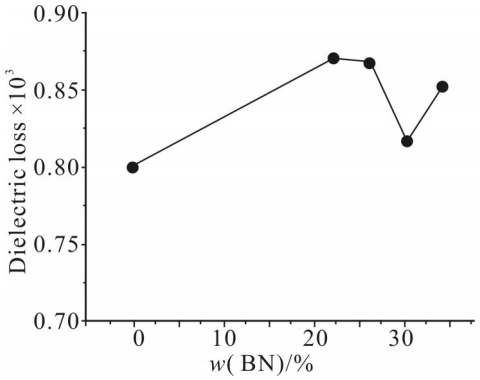


Fig. 5 Effect of different contents of h-BN on dielectric loss of h-BN/SiO_2-CCL-x

2.4 h-BN-SiO_2/CCL的介电性能分析

为了表征上述微波基板的介电性能，对其做了介电常数（D_k）测试和介电损耗（D_f）分析。如Fig.4所示，单一SiO_2填充基板的D_k=3.0065，提高h-BN含量，同时降低SiO_2的添加量，介电常数线性增加，这主要是由于h−BN（D_k≈4.0）的介电常数略高于SiO_2（D_k≈3.9），二者作为调节因子在PTFE基体（D_k≈2.1）的基础上具有较好的调节性。在h-BN填充量达到

26%时，h-BN/SiO_2-CCL-2 的 D_k=3.5221，和要求的3.50典型值很接近，差别在±0.05以内。另外，从介电损耗分析可以看出，PTFE基的微波基板的D_f均在0.0008~0.0009之间（Fig.5），相对于市场上的产品和文献报道，该损耗非常低，在高频器件中具有巨大的潜在应用价值。

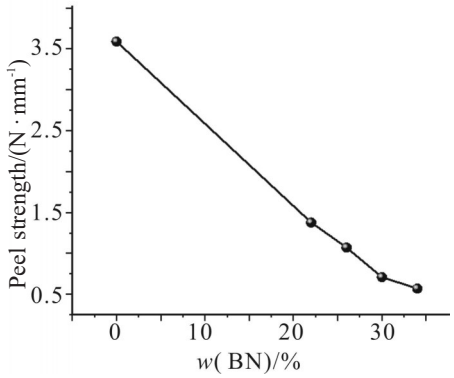


Fig. 6 Effect of different contents of h-BN on peel strength of h-BN/SiO_2-CCL-x

2.5 h-BN-SiO_2/CCL的剥离强度、密度和热膨胀系数分析

除了上述微波基板的电气性能和导热性能，基板对剥离性能和吸水性也具有一定的要求，如Fig.6所示。通过压延工艺制备的单一SiO_2填料的基板具有很高的剥离强度，为3.59 N/mm，然而，随着h-BN的添加量增多，基板的剥离强度线性下降。h-BN添加量为22%时剥离强度为1.379 N/mm，h-BN添加量为26%时剥离强度为1.072 N/mm，当h-BN填充量进一步增加到30%和34%时，剥离强度分别降至0.710 N/mm和0.570 N/mm。基板的剥离性能随h-BN添加量的增加逐渐下降，原因是h-BN为片层状形貌，对层间Z轴的结合强度具有较大的影响，不同产品和不同应用场景对基板的剥离强度具有不同的要求，一般剥离强度大于0.6 N/mm就可以用于进一步的PCB加工。

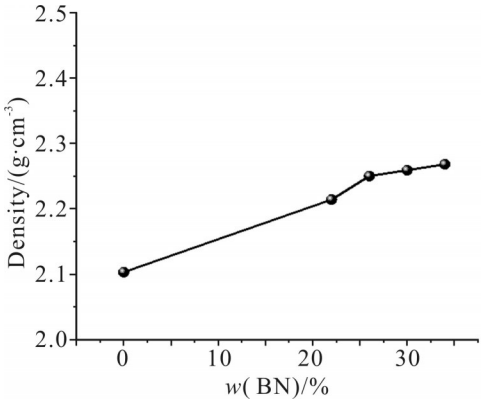


Fig. 7 Effect of different contents of h-BN on density of h-BN/SiO_2-CCL-x

如Fig.7所示，随着陶瓷粉中h-BN含量的增加，样品的密度线性增加，这主要是因为h-BN的密度比较高，（SiO_2的密度为1.44 g/cm^3，h-BN的密度为2.25 g/cm^3）。值得注意的是，h-BN质量分数从22%增加到26%时，密度增大幅度明显高于h-BN质量分数从26%增加到30%和34%，后期密度增速放缓可能是因为过多h-BN填充导致复合材料的流动性降低，产生了部分气孔和缺陷，这部分分析与过多h-BN导致导热性能较差的分析一致。

h-BN/SiO_2-CCL的热膨胀系数如Fig.8所示。可以看出，单一SiO_2作填料时，基板在X，Y，Z方向上的导热系数都比较低，分别为17.71/13.67/18.44，引入h-BN后，Z轴方向上的热膨胀系数明显增大，X与Y方向上的热膨胀系数略有增大，这可能与h-BN的片层状结构和本文所采用的压延工艺相关，因为物料

Tab. 2 Thermal conductivity, dielectric properties, peel strength, density and thermal expansion coefficient characterization of different samples

Name of sample	Thermal conductivity /(W·m^{-1}·K^{-1})	Dielectric constant (D_k)	Dielectric loss(D_f)×10^3	Peel strength /(N·mm^{-1})	Density /(g·cm^{-3})	Coefficient of thermal expansion×10^6 /℃$^{-1}$
h-BN-SiO_2/CCL-0	0.6	3.0065	0.8	3.59	2.103	17.71/13.6718.44
h-BN-SiO_2/CCL-1	1.026	3.4596	0.8712	1.379	2.214	18.03/14.79/90.74
h-BN-SiO_2/CCL-2	1.196	3.5221	0.8675	1.072	2.250	18.93/16.23/91.01
h-BN-SiO_2/CCL-3	1.093	3.5501	0.8186	0.71	2.259	19.42/17.53/91.31
h-BN-SiO_2/CCL-4	0.973	3.5737	0.8523	0.57	2.268	19.87/18.41/91.54

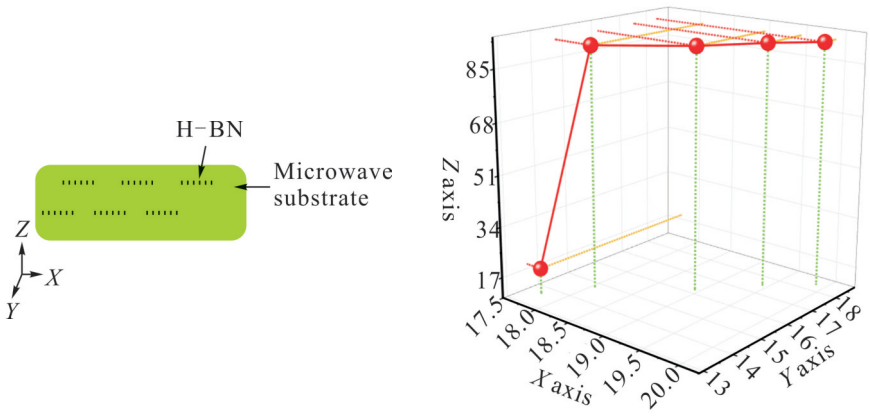


Fig. 8 Effect of different contents of h-BN on coefficient of thermal expansion of h-BN/SiO_2-CCL-x

是沿着*X*,*Y*方向反复压延直至得到目标厚度的生基片,在压延过程中片层状h-BN会倾向于沿着*X*/*Y*轴方向取向排列,对*X*/*Y*面具有增强作用,造成*X*/*Y*轴方向的形变更加困难,所以*X*,*Y*方向的热膨胀系数明显小于*Z*轴。综合上述基板的微观形貌分析、导热性能、介电性能、剥离性能、密度和热膨胀系数表征(结果总结于Tab.2中),可以认为,h-BN/SiO_2-CCL-2具有较好的微波基板综合性能。

3 结论

本文通过混合絮凝-干燥-粉碎-预成型-压延等工艺流程,利用h-BN与SiO_2之间的协同作用,使其在微波基板内部相互搭接形成致密的导热通路,极大促进了材料内部的导热性能。为进一步揭示声子对材料热导率的提升作用,建立明确的构性关系,文章对材料的微观形貌、导热性能、介电性能、力学性能等进行了充分的表征,声子在2D/3D填料搭接形成的传输网络中传输,可以极大提高材料的导热性能。此外,除了导热性能,作为实际应用的微波基板还需要具备基本的介电性能与力学性能,为此,本文还系统研究了SiO_2/h-BN陶瓷填料对微波基板导热性能、介电性能和剥离性能等指标的影响:(1) 相较于单一的SiO_2填料,SiO_2/h-BN填料系统可以通过协同作用形成非常致密的2D/3D声子传输网络,进而获得了高导热性能;(2) 开发了具有介电常数为3.50的微波基板,同时具有较低的介电损耗(~0.0008),同时具有较高的导热性能和较好的剥离性能;(3) 当SiO_2/h-BN添加量为36%/26%时,微波基板的导热性能达到最大,为1.196 W/(m·K),同时具有良好的介电性能(D_k=3.5221,D_f=0.0008675)和剥离性能(1.072 N/mm)。

参考文献:

[1] Wang C, Wen N, Zhou G, *et al*. Incorporation of tin on copper clad laminate to increase the interface adhesion for signal loss reduction of high frequency PCB lamination [J]. Applied Surface Science, 2017, 422: 738-744.

[2] Shen X, Wang Z, Wu Y, *et al*. Effect of functionalization on thermal conductivities of graphene/epoxy composites [J]. Carbon, 2016, 108: 412-422.

[3] Zhan Y, Ren Y, Wan X, *et al*. Dielectric thermally conductive and stable poly (arylene ether nitrile) composites filled with silver nanoparticles decorated hexagonal boron nitride [J]. Ceramics International, 2017, 44: 2021-2029

[4] 张立欣, 王丽婧, 张伟, 等. 石英纤维含量对聚四氟乙烯基高介微波复合介质基板性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(11): 82-87.
Zhang L X,Wang L J, Zhang W, *et al.* Effect of fiber content on the properties of polytetrafluoroethylene/ $CaTiO_3$ microwave composites[J].Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(11): 82-87.

[5] Guo Y P, Ohsato H, Kakimoto K I. Characterization and dielectric behavior of willemite and TiO_2- doped willemite ceramics at millimeter- wave frequency [J]. Journal of European Ceramics Society, 2006, 26: 1827-1830.

[6] Ohsato H, Tsunooka T, Sugiyama T, *et al*. Forsterite ceramics for millimeterwave dielectrics [J]. Journal of Electroceramics, 2006, 17: 445-450.

[7] Ge M N, Zhang J F, Zhao C L, *et al.* Effect of hexagonal boron nitride on the thermal and dielectric properties of polyphenylene ether resin for high-frequency copper clad laminates[J]. Materials and Design, 2019, 182: 108028.

[8] Tan Y H, Yan X Y, Tang X, *et al.* Dielectric and thermal properties of GFs/PTFE composites with hybrid fillers of Al_2O_3 and hBN for

microwave substrate applications [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2021, 32: 23325-23332.

[9] Zhang W W, Lu C, Ge M N, *et al*. Surface modified and gradation-mixed Al_2O_3 as an effective filler for the polyphenylene oxide (PPO) insulative layer in copper clad laminates[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31: 21602-21616.

[10] Xiao H, Huang Z X, Zhang Z P, *et al.* Highly thermally conductive flexible copper clad laminates based on sea- island structured boron nitride/polyimide composites[J]. Composites Science and Technology, 2022, 230: 109087.

[11] 高梦岩, 庞淇, 翟磊, 等. 聚酰胺酸低黏化制备导热BN/PI复合薄膜[J]. 绝缘材料, 2022, 56(2): 46-53.
Gao M Y, Pang Q, Zhai L. Preparation of thermally conductive BN/PI composite films by low- viscosity poly(amic acid) [J]. Insulating Material, 2022, 56(2): 46-53.

[12] 张惠娟, 王涛, 孟维晓. 氮化硼填充导热绝缘塑料的研究及应用[J]. 塑料工业, 2019, 47(6): 22-26.
Zhang H J, Wang T, Meng W X. Research and application of boron nitride filled thermal conductive and electrical insulating plastics [J]. China Plastics Industry, 2019, 47(6): 22-26.

[13] Ge M N, Li Q Q, Zhang J F, *et al*. Enhancing thermal conductivity of the insulating layer of high frequency copper clad laminates via incorporating surface modified spherical hBN fillers[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31:4214-4223.

[14] 张晓星, 胡国雄, 伍云健, 等. 氮化硼纳米片改性环氧树脂导热与介电性能的研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 645-651.
Zhang X X, Hu G X, Wu Y J, *et al*. Study on the thermal and dielectric properties of epoxy resin modified by boron nitride nanosheets[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 645-651.

[15] 毕世杰, 李喆, 盛戈皞. 氮化硼纳米片取向对环氧复合材料导热及绝缘性能的影响[J]. 绝缘材料, 2023, 56(5): 14-19.
Bi S J, Li Z, Sheng G H. Effects of BN nanosheet orientation on thermal conductivity and insulating properties of epoxy composite [J]. Insulating Material, 2023, 56(5): 14-19.

Improvement of the Thermal Conductivity of Microwave Substrate by Constructing a 2D/3D Dense Phonon Transmission Network

Lixin Zhang[1,2], Weiwen Wang[3], Jie Shen[1,4], Fulong Han[2], Xia Jin[2], Shengjie Zheng[2]

(*1.School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. The 46th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300220, China; 3. School of Physics and Electrical Engineering, Fuyang Normal University, Fuyang 236031, China; 4. Hubei Longzhong Laboratory, Xiangyang 441022, China*)

ABSTRACT: With the advent of "5G" and deepening of the information technology revolution, electronic components are developing in the direction of high integration, miniaturization, high power and high performance, requiring devices to have better heat dissipation. In this study, hexagonal boron nitride (h-BN) with high thermal conductivity was used as 2D ceramic filler, and was introduced into the polytetrafluoroethylene (PTFE)-based microwave substrate in collaboration with 3D-like SiO_2. The two components were bonded to each other, and successfully constructed a dense phonon transport network. The thermal conductivity of the dielectric layer is greatly improved (from 0.6 W/(m · K) to 1.196 W/(m · K), an increase of 99.33%). In this process, the use of advanced calendering process, through the mixed flocculation - drying - grinding - mixing - preforming - calendering process, can improve the uniformity of the medium layer, to avoid the use of glass fiber cloth brought about by the "glass fiber braid effect". At the same time, the microwave substrate maintains the low dielectric loss, suitable dielectric constant and high stripping strength of PTFE dielectric layer. When the h-BN addition reaches 26%, the thermal conductivity of the dielectric layer reaches 1.196 W/(m · K), the dielectric loss factor is 0.0008675, and the stripping strength is 1.072 N/mm. In this paper, a new idea of 2D/3D collaborative construction of dense phonon network was proposed for the development of a new dielectric layer of high thermal conductivity substrate to improve the thermal conductivity of microwave substrate.

Keyword: polytetrafluoroethylene; hexagonal boron nitride; microwave substrate; phonon transport network; synergistic effect