2024年8月

文章编号: 2095-4980(2024)08-0842-09

# 等效介电模型在太赫兹有线传输材料开发中的应用

高成喆,冷晋,黄刚,施奇武\*

(四川大学 材料科学与工程学院,四川 成都 610065)

摘 要:太赫兹频段作为下一代通信技术的重要备选频段,面临随着载波频段提高而信号衰减急剧增加的挑战。太赫兹波的有线传输技术是解决这一问题的有效手段,而对材料介电性能进行精准调控和优化,开发太赫兹频段高性能有线传输材料成为关键。本文通过聚合物材料改性,利用太赫兹时域光谱系统对复合材料的介电特性进行测试,研究了传统介电常数等效模型在太赫兹频段材料开发中的应用。基于太赫兹频段材料的极化特性和响应机制,提出一种预估太赫兹频段复合材料介电常数和损耗角正切的模型和方法,为开发新型太赫兹有线传输材料及其性能调控提供了科学的模型引导。

# Application of equivalent dielectric model for investigating terahertz wired transmission materials

GAO Chengzhe, LENG Jin, HUANG Gang, SHI Qiwu\*

(School of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

**Abstract:** The terahertz frequency band, as an important alternative for the next generation of communication technologies, faces the challenge of rapid signal attenuation with increasing carrier frequency. Terahertz wired transmission technology is an effective means to address this issue, and precise control and optimization of material dielectric properties is the key to developing high-performance wired transmission materials in the terahertz frequency range. This paper modifies polymer materials and uses a terahertz time-domain spectroscopy system to test the dielectric properties of composite materials, studying the application of traditional dielectric constant equivalent models in the development of terahertz band materials. Based on the polarization characteristics and response mechanisms of terahertz band materials, a model and method for estimating the dielectric constant and loss tangent of composite materials in the terahertz frequency range is proposed, providing a scientific model guidance for the development of new terahertz wired transmission materials and their performance regulation.

**Keywords:** terahertz communication; polymer modification; polarization response characteristics; equivalent dielectric model

太赫兹波(0.1~10 THz)具有传输速率高、容量大、穿透性强等优势,已成为第六代通信技术的主要备选频段 之一<sup>[1]</sup>。由于具有较高的载波频段,太赫兹信号在自由空间损耗将更为严重,且易受大气中水汽、极性分子吸收 干扰,在许多应用场景下需借助光纤、波导等有线方式对太赫兹信号进行传输<sup>[2-5]</sup>。当前太赫兹光纤的研究主要 集中在通过结构设计将太赫兹波引导至芯部进行传输,存在尺寸较大、柔性差以及加工困难等问题,制约着太 赫兹光纤产品的实际应用<sup>[6-9]</sup>。因此,开发低损耗、柔性的太赫兹传输材料,进而实现高约束、低传输损耗的光 纤是当前研究中的难点与挑战。 材料介电性能调控是有线传输材料在开发过程中的关键环节,非极性或弱极性材料的介电常数和损耗角正 切相对较低<sup>[10]</sup>。为提高材料对电磁波的约束能力,同时保持较低的传输损耗,传输材料通常需具有高介电常数 和低损耗角正切的介电性能。通过对二元及多元材料进行掺杂改性,实现复合材料组分之间介电性能调控,是 当前传输材料获得理想介电性能的一种有效解决方案<sup>[11]</sup>。在低损耗光波段光纤芯部材料开发过程中,研究人员 尝试在高纯石英中掺杂钛和锗等元素,提高传输材料介电常数,进而实现全内反射传输<sup>[12]</sup>。在微波频段,研究 人员选用低损耗聚合物作为基体,在聚合物中进行无机填料掺杂改性,获得了高介电常数、低损耗的理想介电 性能<sup>[13-14]</sup>。

在太赫兹有线传输材料的开发中,介电性能对于信号传输的影响同样至关重要。介电常数的实部(D<sub>k</sub>)决定了 信号在传输材料中约束能力和传输速度,较高的D<sub>k</sub>有助于将信号更好地束缚到较小尺寸的芯部,减小传输器件 尺寸,实现太赫兹传输器件小型化,但过高的D<sub>k</sub>也会导致信号传输速率变慢<sup>[10]</sup>。因此,在太赫兹传输材料的优 化设计当中,需要合理、精确地调控材料介电常数,同时最大程度地降低损耗角正切(D<sub>f</sub>),进而降低传输损耗。 由于太赫兹频段应用时间相对较晚,当前太赫兹传输材料的开发研究主要集中于材料筛选,而对传输材料进行 改性调控的研究较为缺乏;且由于太赫兹频段材料介电性能测试较为复杂,测试精确度较低<sup>[15-16]</sup>,在太赫兹传 输材料开发中进行介电性能调控的研究工作还鲜有报道。在微波频段下,研究人员为实现材料介电性能的精确 调控,开发了许多等效介电常数计算模型,为复合材料介电调控及性能优化提供了极大便利<sup>[17-18]</sup>,但这些模型 计算侧重点不同,且普遍对材料种类及极性没有明确限定,使计算值与实验值存在较大偏差。而在太赫兹频段 下,科学准确的等效介电模型更为缺乏,这在某种程度上极大制约了太赫兹传输材料的发展与应用。

本文基于材料在太赫兹频段的极化响应机制进行解析,选用非极性聚丙烯(Polypropylene, PP)作为基体,具 有不同极性的钛酸钡(BaTiO<sub>3</sub>)、氮化硼(BN)作为掺杂相,对现有介电常数等效模型在太赫兹频段下的科学性和准 确性进行实验验证,分析掺杂填料的极性强弱对于模型准确性的影响。基于复合材料多组分协同效应,提出一 种太赫兹频段复合材料损耗角正切预测模型,通过实验验证及损耗因子修正,等效模型具有较好的准确性。等 效介电模型的开发为太赫兹频段材料介电性能调控提供了科学的理论支撑,将进一步推动新型太赫兹光纤等有 线传输材料及器件的开发研制,进而推动太赫兹科学在通信、传感、检测系统等领域的应用。

# 1 聚合物材料改性及复合样品制备

#### 1.1 聚合物基体共混改性

共混改性工艺是当加工温度达到聚合物熔点后,聚合物基体呈现熔体状态,具有一定的流动性,掺杂相通 过剪切搅拌后均匀地分散至聚合物基体中,进而实现填料颗粒在基体中的复合与调控<sup>[17-19]</sup>。本文选用 PP-T30S (中石化)作为聚合物基体,选取 BN(粒径约10 µm,广州有色金属集团有限公司)、BaTiO<sub>3</sub>(粒径约2 µm,雨木(宁 波)新材料有限公司)作为掺杂相。利用密闭式混炼机对聚合物基体和陶瓷填料进行共混改性,通过调控混炼过程 中的混炼转速及剪切力场,实现陶瓷填料在聚合物基体中的均匀分散,进而完成聚合物材料共混改性。

#### 1.2 聚合物复合材料成型

将不同掺杂浓度的聚合物改性材料装入设计成型的模具中进行塑化,待复合材料完全塑化后施加压力,利 用聚合物基体熔体流动性,将聚合物及掺杂相颗粒充满模腔。保压一段时间后,将模具中的聚合物复合样品进 行水冷固化,即完成聚合物复合样品片材制备,制备的聚合物复合样品片材直径50 mm,厚度为1.5 mm。

### 2 聚合物基复合材料测试分析

#### 2.1 XRD测试&FTIS测试

为描述热加工后样品物相演化情况,分别对 PP-T30S 聚合物基体以及 PP-T30S+20 vol%BN、PP-T30S+20 vol%BaTiO<sub>3</sub>两种复合样品进行 X 射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)表征测试。XRD测试结果如图 1(a)所示,由于 PP-T30S 结晶性较高,两种不同类型填料掺杂的聚合物复合样品,均显示出填料组分的衍射峰和聚丙烯基体的衍射峰,并没有出现其他杂质峰,说明此共混改性过程仅为物理复合,并未发生其他化学反应。

为进一步探究共混改性过程,利用傅里叶红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIS)对 PP-T30S 聚合物基体以及 PP-T30S+20 vol% BN、PP-T30S+20 vol% BaTiO<sub>3</sub>两种复合样品进行测试。如图 1(b)所示,FT-IR 谱图中 2 837 cm<sup>-1</sup>、2 867 cm<sup>-1</sup>、2 917 cm<sup>-1</sup>、2 950 cm<sup>-1</sup>处吸收峰分别对应于—CH<sub>2</sub>—对称伸缩振动、—CH<sub>3</sub>对称 伸缩振动、—CH<sub>2</sub>—不对称伸缩振动、—CH<sub>3</sub>不对称伸缩振动; 1 376 cm<sup>-1</sup>、1 455 cm<sup>-1</sup>分别对应于—CH<sub>3</sub>对称变 形振动、一CH<sub>2</sub>一弯曲振动。上述特征吸收峰均产生于聚丙烯基体的有关结构。在 PP+20 vol% BN 复合材料的红 外谱图中,在 810 cm<sup>-1</sup>和1 370 cm<sup>-1</sup>处出现了明显的特征吸收峰,分别对应于 h-BN 的拉伸振动和 N-B-N 的变形 振动。在 PP+20 vol% BaTiO<sub>3</sub>复合材料的红外谱图中,在 515 cm<sup>-1</sup>处出现狭窄而强烈的特征吸收峰,这是由于钛 酸钡结晶体结构中的 Ti-O 键振动引起的。综上所述,复合材料红外图谱显示,在原先聚丙烯特征吸收峰基础 上,出现了明显的掺杂填料特征吸收峰,这也说明了此共混改性过程为物理过程,并未发生其他化学反应。



Fig.1 XRD patterms and FT-IR spectra of polymer matrix and composite materials 图1 聚合物基体及复合材料 XRD、FT-IR 谱图

### 2.2 SEM 测试

为研究陶瓷填料在聚合物基体中的分散特性,分别选取不同掺杂浓度的PP-T30S+BaTiO<sub>3</sub>/BN复合样品进行扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)测试分析,观测掺杂相填料在基体中的复合形态,如图2所示。SEM测试结果表明,随着掺杂浓度的提高,填料在复合材料中的占比增加。在10 vol%掺杂量以下,两种复合材料中填料分散较为均匀,而随着掺杂浓度的进一步提高,两种复合材料填料均出现了部分团聚的情况。这种团聚情况在20 vol%掺杂量下尤为明显。但在15 vol%及20 vol%掺杂量下,BaTiO<sub>3</sub>颗粒填料的分散性要优于BN片材填料。这是由于类球形填料流动性好,更利于填料在基体中的流动分散。BN片材填料由于本身二维材料结构,流动性差,即使在高温下,高掺杂量的片材填料也难以随着聚合物熔体而流动分散,会出现大面积堆叠的情况,这在实际应用中是极为不利的。



Fig.2 SEM images of PP-T30S matrix doped with BaTiO<sub>3</sub>/BN composite material 图 2 PP-T30S 基体掺杂 BaTiO<sub>3</sub>/BN 复合材料 SEM 照片

# 2.3 介电性能太赫兹时域光谱测试

为研究聚合物及聚合物复合材料在太赫兹频段下的介电常数(D<sub>k</sub>)和损耗角正切(D<sub>f</sub>)指标,利用太赫兹时域光 谱系统对样品光学参数进行提取,通过算法处理计算样品在太赫兹频段下的介电性能。采用透射式太赫兹时域 光谱测试介电性能,通过两端光电导天线进行太赫兹波的辐射和接收,分别提取太赫兹波透过空气及透过待测 样品后的时域光谱,对时域光谱进行傅里叶变换,得到参考信号频域数据S<sub>f</sub>(ω)和样品信号的频域数据S<sub>s</sub>(ω)。太 赫兹波透过样品的时域谱数据和频域谱数据如图3所示。随着填料掺杂含量的增加,太赫兹信号被探测到的时间 延迟增加,这表明随着填料含量的增加,样品材料折射率和介电常数的调控效果呈上升趋势。而随着填料掺杂 含量的增加,时域谱数据的极值差和频域谱数据中的幅值强度都出现了下降趋势,这表明随着掺杂含量的增加, 复合样品的太赫兹吸收和介电损耗也相应升高。



Fig.3 Time domain spectral data and frequency domain spectral data of PP-T30S/BaTiO<sub>3</sub>,PP-T30S/BN 图 3 PP-T30S/BaTiO<sub>3</sub>和PP-T30S/BN复合样品的时域谱与频域谱数据

为进一步计算填料掺杂后复合样品的介电常数和损耗角正切指标,将提取到的原始时域光谱和傅里叶变换 后的频谱数据做进一步算法处理。由于傅里叶变换后的频域数据为复数,由*S*<sub>s</sub>(ω)与*S*<sub>r</sub>(ω)即可得到频域数据的幅 值比ρ(ω)及二者相位差φ(ω):

$$\frac{S_{s}(\omega)}{S_{r}(\omega)} = \rho(\omega) e^{-j\phi(\omega)}$$
(1)

由样品信号和参考信号幅值比 $\rho(\omega)$ 及二者相位差 $\phi(\omega)$ ,可进一步计算样品折射率 $n_s(\omega)$ 和吸收系数 $\alpha(\omega)$ :

$$n_{\rm s}(\omega) = \phi(\omega) \frac{C_0}{d} + 1 \tag{2}$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2}{d} \ln \frac{4n_s(\omega)}{\rho(\omega) (n_s(\omega) + 1)^2}$$
(3)

式中: C<sub>0</sub>为真空中光速; d为样品厚度。

利用样品折射率 n<sub>s</sub>(ω)和吸收系数 α(ω),即可求得样品复介电常数的实部及虚部,进而求得材料损耗角正切:

$$\varepsilon'(\omega) = \left(n_{s}(\omega)\right)^{2} - \left(\frac{C_{0}\alpha(\omega)}{2\omega}\right)^{2}$$
(4)

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{C_0 n_s(\omega) \alpha(\omega)}{\omega}$$
(5)

聚合物复合材料介电测试结果如图4所示。随着填料掺杂含量的增加,复合材料D<sub>k</sub>和D<sub>f</sub>均呈现不断升高的趋势。由于BaTiO<sub>3</sub>填料极性较强,复合材料D<sub>k</sub>调控效果较为明显,当掺杂含量为20 vol%时,D<sub>k</sub>由基体的2.30

提升至5.69(@0.2~1 THz)。但受限于BaTiO<sub>3</sub>填料本身的高损耗特性, *D*<sub>f</sub>出现较为明显的增加,由纯基体的4.03×10<sup>-4</sup>增加至3.89×10<sup>-2</sup>(@0.25~0.35 THz)。这主要来源于BaTiO<sub>3</sub>本身的高介电损耗,过高的损耗角正切在有线传输中带来难以接受的传输损耗。BN填料本身极性相对较弱,复合材料*D*<sub>k</sub>调控随掺杂浓度增加变化较为缓慢。当掺杂含量为20 vol%时,*D*<sub>k</sub>由纯基体的2.30提升至2.82,并没有出现较大幅度的增加;*D*<sub>f</sub>由4.03×10<sup>-4</sup>增加至1.53×10<sup>-3</sup>(@ 0.25~0.35 THz),在提高介电常数的同时,仍保持较低的介电损耗。综上所述,随着填料掺杂浓度的增加,复合材料*D*<sub>k</sub>和*D*<sub>f</sub>均呈现有规律的上升趋势。这表明太赫兹频段下复合材料介电性能调控具有多元协同效应特征,有必要提取等效模型对复合材料介电性能进行模拟验证,从而实现太赫兹复合材料介电性能的优化调控。



Fig.4 Dielectric constant test data and loss tangent test data of PP-T30S/BaTiO<sub>3</sub>, PP-T30S/BN 图4 PP-T30S/BaTiO<sub>3</sub>和PP-T30S/BN复合样品的介电常数及损耗角正切测试数据

# 3 介电模型验证与机理解析

# 3.1 介电常数等效介电模型

当前较为成熟的等效介电常数模型包括 Maxwell-Garnett 模型、Lichtenecker 模型以及 Jayasundere-Smith 模型<sup>[14,20]</sup>,见式(6)~(8):

$$\frac{\varepsilon_{\rm c} - \varepsilon_{\rm m}}{\varepsilon_{\rm c} + 2\varepsilon_{\rm m}} = V_{\rm f} \frac{\varepsilon_{\rm f} - \varepsilon_{\rm m}}{\varepsilon_{\rm f} + 2\varepsilon_{\rm m}} \tag{6}$$

$$\ln\left(\varepsilon_{\rm c}\right) = (1 - V_{\rm f})\ln\left(\varepsilon_{\rm m}\right) + V_{\rm f}\ln\left(\varepsilon_{\rm f}\right) \tag{7}$$

$$\varepsilon_{\rm c} = \frac{\varepsilon_{\rm m} (1 - V_{\rm f}) + \varepsilon_{\rm f} V_{\rm f} \left[ \frac{3\varepsilon_{\rm m}}{\varepsilon_{\rm f} + 2\varepsilon_{\rm m}} \right] \left[ 1 + \left( \frac{3V_{\rm f} (\varepsilon_{\rm f} - \varepsilon_{\rm m})}{\varepsilon_{\rm f} + 2\varepsilon_{\rm m}} \right) \right]}{1 - V_{\rm f} + V_{\rm f} \left[ \frac{3\varepsilon_{\rm m}}{\varepsilon_{\rm f} - 2\varepsilon_{\rm m}} \right] \left[ 1 + \left( \frac{3V_{\rm f} (\varepsilon_{\rm f} - \varepsilon_{\rm m})}{\varepsilon_{\rm f} + 2\varepsilon_{\rm m}} \right) \right]}$$
(8)

式中: $\varepsilon_{c}$ 、 $\varepsilon_{m}$ 、 $\varepsilon_{f}$ 分别为复合材料、聚合物基体以及陶瓷填料的介电常数; $V_{f}$ 为填料所占的体积分数。

这些等效介电模型已在低频下(<10 GHz)得到广泛验证,具有较好的理论指导性。由于太赫兹频段材料改性 及调控研究较为缺乏,且受限于材料测试手段,当前针对太赫兹频段复合材料介电性能的研究工作并不深入, 太赫兹频段下介电模型准确性验证还鲜有报道。

根据上述计算模型,在模拟计算过程中需明确聚合物基体、陶瓷填料的介电常数及所占体积分数,但很多 陶瓷填料在太赫兹频段的介电常数并不详细,而极性较强的陶瓷填料对于太赫兹波具有强吸收特性,这对于实 验测试带来了极大困难。基于材料介电性能随频率演变规律分析,材料介电性能在吉赫兹(GHz)和太赫兹(THz) 频段下具有很好的一致性,材料极化机制并不会出现变化<sup>[21-22]</sup>。因此,在本文模拟工作中,两种填料的介电常 数指标来源于参考文献中的报道数据,BN填料*D*<sub>k</sub>为6<sup>[23]</sup>,BaTiO<sub>3</sub>填料*D*<sub>k</sub>为200~300<sup>[24-25]</sup>(本工作仿真数据选用 220),聚合物基体介电常数来源于太赫兹时域光谱测试值,*D*<sub>k</sub>为2.30(@0.25~0.35 THz。

基于上述聚合物材料改性介电调控实验,对不同类型等效介电常数模拟结果进行验证,复合介电常数测试数据与模型计算数据比对效果如图 5(a)~(b)所示。分别将强极性 BaTiO<sub>3</sub>填料掺杂和弱极性 BN 填料掺杂的复合样品介电常数测试值,与3种介电常数模型的计算值进行对比。由图5可见,对于BaTiO<sub>3</sub>掺杂样品,Maxwell-Garnett模型和 Jayasundere-Smith模型计算值与实验值均出现较为明显的偏差,而Lichtenecker模型与实验值具有相当好的匹配度。对于弱极性 BN 掺杂样品,3种模型计算值与实验值整体偏差不大,Lichtenecker模型在与实验值的匹配上达到最优效果,在准确性上具有明显优势。



 Fig.5 Comparative analysis of dielectric property test values and model values of polymer composite materials

 图5 聚合物复合材料介电性能测试值与模型值对比分析

对上述测试结果做进一步分析。对不同频段下材料极化响应机理进行解析,如图6(a)~(b)所示,在低频下 (kHz、MHz),取向极化和界面极化对材料的介电性能产生主要影响。低频下外电场对电偶极矩的力矩作用极为 显著,使之倾向于定向排列,即发生取向极化。而复合材料中,多组分之间极性不同,导致载流子聚集在界面 处,从而发生界面极化,这都对材料介电性能产生重要影响。基于上述结果分析,由于太赫兹频段较高,对介 电指标产生显著影响的界面极化、取向极化等极化模式不再敏感,材料极化响应主要来源于复合材料中两组分 中的电子极化和原子极化等本征极化<sup>[22]</sup>。因此,分析认为Lichtenecker模型与实验结果的高度匹配,主要来源于

第 22 卷

该频段更多考虑各组分本征极化强弱对复合材料介电性能的影响。

# 3.2 损耗角正切等效介电模型

在电磁传输材料介电性能调控中,保持尽量低的介电损耗十分重要。当前的研究工作中,复合材料D<sub>f</sub>指标仍无法较好地进行模拟预测。从材料极化特性上看,低频下(kHz、MHz),材料受界面极化、取向极化影响明显,导致介电常数和损耗角正切出现较大干扰波动<sup>[22]</sup>,如图6所示,在这些频段下利用等效介电模型计算和模拟损耗角正切极为困难,制约着复合材料损耗角正切计算模型的构建与应用。



Fig.6 Schematic diagram of dielectric evolution law and polarization response model of polymer composite materials at different frequencies 图6 聚合物复合材料在不同频率下介电演变规律及极化响应模型的示意图

本文基于材料极化特性进行解析,在太赫兹频段下构建复合材料损耗角正切等效介电模型。在模型构建中, 遵循复合材料协同效应的一般规律,考虑基体和填料极性强弱对复合材料损耗角正切的影响,模型如式(9)所示:

$$\tan \delta_{\rm c} = \sum V_{\rm f}(\tan \delta_i) \tag{9}$$

式中 δ<sub>i</sub>为介质损耗角,反映电介质内单位体积中能量损耗的大小。

根据 BN 和 BaTiO<sub>3</sub>极性强弱以及在其他频段 D<sub>f</sub>指标参考,本文模拟工作中 BN 填料的 D<sub>f</sub>设定为 0.004<sup>[26]</sup>, BaTiO<sub>3</sub>填料的 D<sub>f</sub>设定为 0.1<sup>[24-25]</sup>,聚合物基体的 D<sub>f</sub>设定为实验测试值 0.000 4(@250~350 GHz。模型计算数据与实 验数据对比结果如图 5(c)~(d)所示。在 5 vol%低含量填料掺杂时,模型计算值与实验值具有很好的一致性,但随 着掺杂含量的提高,实验测试值普遍高于模型计算值,且随掺杂含量的增加,二者偏差不断加大。根据聚合物 复合材料 SEM 测试结果分析,随着掺杂含量的不断增加,极性填料出现局部团聚的现象,并在团聚体周围产生 很多孔隙缺陷,导致填料团聚界面及孔隙边界处出现载流子聚集<sup>[19]</sup>,带来额外的损耗角正切增加。

针对填料团聚带来的损耗角正切异常增加,在原有模型基础上,设置修正因子对模型进行修正,提高模型 准确性。修正后模型如式(10)所示。由于填料团聚主要与掺杂含量有关,且不同极性填料所带来的影响效果不 同。根据测试结果显示,对于极性较强的BaTiO<sub>3</sub>填料,随着其在聚合物基体中的掺杂含量增加,损耗角正切增 加更为显著。鉴于此,修正因子由掺杂含量V<sub>f</sub>与常数c两部分组成,其中常数c的大小反映了掺杂相的极性强 弱。本文模拟工作中,BaTiO<sub>3</sub>填料体系模拟时,c值设置为1.5;BN填料体系模拟时,c值设置为1.15。由图5(c) ~(d)可知,修正后的模型计算数据与实验数据具有非常好的一致性,模型匹配度显著提高。在模型构建中充分考 虑填料极性对复合材料介电性能的影响,保证了等效模型计算的科学性和准确性。

$$\tan \delta_{\rm c} = \left[ \sum V_{\rm f}(\tan \delta_{\rm i}) \right] (V_{\rm f} + c) \tag{10}$$

# 4 结论

本文选取非极性聚合物作为基体,分别选用强极性BaTiO<sub>3</sub>填料和弱极性BN填料作为掺杂相进行聚合物材料改性。通过调控基体与填料的复合形态,实现复合材料介电性能调控。两种填料体系下,复合材料D<sub>k</sub>由基体的2.30分别提升至5.69和2.82。利用太赫兹时域光谱系统对聚合物改性材料D<sub>k</sub>及D<sub>f</sub>进行测试,与现有D<sub>k</sub>等效模型计算数据进行比对分析,结果表明,Lichtenecker模型对于强极性填料和弱极性填料均具有很好的准确性及匹配

# 第8期 高成喆等:等效介电模型在太赫兹有线传输材料开发中的应用

度。基于材料在太赫兹频段极化机制解析,提出了一种适用于太赫兹复合材料D<sub>f</sub>模拟计算的等效模型,考虑填料团聚及填料本身极性强弱对整体介电性能的影响,在原有模型基础上设定修正因子,修正后的等效模型与实验测试值对比,模型的科学性及准确性显著提高。本文提出的等效介电模型用于复合材料开发及介电调控,为当前太赫兹频段有线传输材料的开发研究提供了一条新思路。

# 参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, HAN Chong, HU Zhifeng, et al. Terahertz band communication: an old problem revisited and research directions for the next decade[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022,70(6):4250–4285. doi:10.1109/TCOMM.2022.3171800.
- [2] HE Menghui, CHEN Zhangxiong, ZENG Jiafu, et al. Design, fabrication, and characterization of a single-polarization single-mode flexible hollow waveguide for low loss millimeter wave propagation[J]. Optics Express, 2022, 30(6):10178-10186. doi:10.1364/ OE.453515.
- [3] HE Menghui, ZENG Jiafu, CHEN Zhangxiong, et al. Low-loss flexible polarization-maintaining hollow waveguide for linearly polarized 100 GHz radiation transmission and subwavelength imaging[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022,40(20):6712-6718. doi:10.1109/JLT.2022.3189668.
- [4] NALLAPPAN K, CAO Yang, XU Guofu, et al. Dispersion-limited versus power-limited terahertz communication links using solid core subwavelength dielectric fibers[J]. Photonics Research, 2020,8(11):1757-1775. doi:10.1364/prj.396433.
- [5] WEIDENBACH M, JAHN D, REHN A, et al. 3D printed dielectric rectangular waveguides, splitters and couplers for 120 GHz[J]. Optics Express, 2016,24(25):28968-28976. doi:10.1364/OE.24.028968.
- [6] LU Dunke, WAN Minggui, LI Zhiwei, et al. Photonic bandgap terahertz fibers based on honeycombed tubes[J]. Optics Express, 2021,29(26):43516-43530. doi:10.1364/OE.433608.
- [7] PHANCHAT N, TALATAISONG W, KLOKKOU N, et al. Extruded TOPAS hollow-core anti-resonant fiber optimized for THz guidance at 0.9 THz[J]. Optics Express, 2022,30(8):13059-13069. doi:10.1364/OE.450550.
- [8] SULTANA J,ISLAM M S,CORDEIRO C M B,et al. Hollow core inhibited coupled antiresonant terahertz fiber: a numerical and experimental study[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2021,11(3):245-260. doi:10.1109/TTHZ.2020. 3031727.
- [9] TALATAISONG W,GORECKI J,PUTTEN L D V,et al. Hollow-core antiresonant terahertz fiber-based TOPAS extruded from a 3D printer using a metal 3D printed nozzle[J]. Photonics Research, 2021,9(8):1513-1521. doi:10.1364/PRJ.420672.
- [10] NISHIMURA I, FUJITOMI S, YAMASHITA Y, et al. Development of new dielectric material to reduce transmission loss[C]// 2020 IEEE the 70th Electronic Components and Technology Conference(ECTC). Orlando, FL, USA: IEEE, 2020:641-646. doi: 10.1109/ECTC32862.2020.00106.
- [11] SIBI N, INDUJA I J, SURENDRAN K P, et al. Natural garnet reinforced high density polyethylene composites for sustainable microwave substrates[J]. Materials Research Bulletin, 2018(106):478-484. doi:10.1016/j.materresbull.2018.06.002.
- [12] TAMURA Y,SAKUMA H,MORITA K,et al. The first 0.14 dB/km loss optical fiber and its impact on submarine transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018,36(1):44-49. doi:10.1109/JLT.2018.2796647.
- [13] TAKAHASHI S, IMAI Y, KAN A, et al. High-frequency dielectric and mechanical properties of cyclo-olefin polymer/MgO composites[J]. Polymer Bulletin, 2015,72(7):1595-1601. doi:10.1007/s00289-015-1358-8.
- [14] TAKAHASHI S, IMAI Y, KAN A, et al. Effects of hollow Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> particles addition on dielectric properties of isotactic polypropylene-HW composites[J]. Materials Science and Engineering:B, 2016(209):51-55. doi:10.1016/j.mseb. 2016.01.010.
- [15] DUANGRIT N, HONG B B, BURNETT A D, et al. Terahertz dielectric property characterization of photopolymers for additive manufacturing[J]. IEEE Access, 2019(7):12339-12347. doi:10.1109/ACCESS.2019.2893196.
- [16] WANG Yi, SHANG Xiaobang, RIDLER N M, et al. Material measurements using VNA-based material characterization kits subject to thru-reflect-line calibration[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020, 10(5):466-473. doi: 10.1109/TTHZ.2020.2999631.
- [17] TAKAHASHI S,IMAI Y,KAN A,et al. Preparation and characterization of isotactic polypropylene/MgO composites as dielectric materials with low dielectric loss[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2013, 121(1416):606-610. doi:10.2109/jcersj2. 121.606.
- [18] ZHENG Liu,ZHOU Jing,SHEN Jie, et al. The dielectric properties and dielectric mechanism of perovskite ceramic CLST/PTFE composites[J]. Journal of Materials Science—Materials in Electronics, 2017,28(16):11665-11670. doi:/10.1007/s10854-017-6969-4.
- [19] XIE Zilong, LIU Dingyao, WU Kai, et al. Improved dielectric and energy storage properties of polypropylene by adding hybrid

fillers and high-speed extrusion[J]. Polymer, 2021(214):123348. doi:10.1016/j.polymer.2020.123348.

- [20] PENG Haiyi, REN Haishen, DANG Mingzhao, et al. Novel high dielectric constant and low loss PTFE/CNT composites[J]. Ceramics International, 2018,44(14):16556-16560. doi:10.1016/j.ceramint.2018.06.077.
- [21] PRATEEK, THAKUR V K, GUPTA R K, et al. Recent progress on ferroelectric polymer-based nanocomposites for high energy density capacitors: synthesis, dielectric properties, and future aspects[J]. Chemical Reviews, 2016, 116(7): 4260-4317. doi: 10. 1021/acs.chemrev.5b00495.
- [22] WANG Lu, YANG Jing, CHENG Wenhua, et al. Progress on polymer composites with low dielectric constant and low dielectric loss for high-frequency signal transmission[J]. Frontiers in Materials, 2021(8):774843. doi:/10.3389/fmats.2021.774843.
- [23] TAKAHASHI S, IMAI Y, KAN A, et al. Dielectric and thermal properties of isotactic polypropylene/hexagonal boron nitride composites for high-frequency applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014(615):141-145. doi:10.1016/j.jallcom. 2014.06.138.
- [24] SHEMATILO T N,GERING M O,KULESHOV G E,et al. Dielectric properties of 3D-printing Ba containing ABS composites at THz frequency range[C]// 2020 the 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Buffalo,NY,USA:IEEE, 2020:1-2. doi:10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370484.
- [25] MOSKALENKO V D, SHEMATILO T N, DOROZHKIN K V, et al. Sub-THz absorbers based on BaTiO<sub>3</sub>/epoxy composites[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2021,1989(1):012034. doi:10.1088/1742-6596/1989/1/012034.
- [26] LEIST J, NAFTALY M, DUDLEY R. Investigation of hexagonal boron nitride by terahertz time-domain spectroscopy[C]// Imaging and Applied Optics Congress. Tucson, Arizona, USA: Optica Publishing Group, 2010. doi:10.1364/AIO.2010.ATuC3.

## 作者简介:

高成喆(1999-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为低损耗太赫兹传输材料及光纤器件研发.email:gaochengzhe@stu.scu.edu.cn.

冷 晋(1996-),男,在读博士研究生,主要研究方向为太赫兹耦合器、天线仿真设计及器件开发.

**黄** 刚(2000-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为聚合物材料改性及全介质超材料器件开发.

施奇武(1985-),男,博士,教授,博士生导师,主 要研究方向为材料与太赫兹波交互作用多学科交叉领域.

# 2023年《太赫兹科学与电子信息学报》优秀论文

秦晓雨,邓 彬,董 俊,等	国防科技大学	《太赫兹雷达直升机旋翼目标微动特性研究》
牛昭然,蔡志鹏,张 岩	首都师范大学	《太赫兹表面等离激元的研发与应用》
赵小龙,贺永宁,崔万照	西安交通大学; 中国空间技术研究院西安分院	《微带电路无源互调干扰问题综述》
宋佳乐,万显荣,张 勋,等	武汉大学	《基于非均匀采样的DTMB-A信号模糊函数抑制方法》
彭明阳,张 晨,张更新,等	南京邮电大学	《低轨星座的跳波束资源调度策略》
王 东,王光清,成 艳,等	上海师范大学	《基于狄拉克半金属的太赫兹探测器研究进展简介》