

聚酰亚胺在 5G/6G 通信应用中的高频介电特性表征

劉浩男*, 澤田梨々花, 津留崎義元, 安藤慎治

东京科学大学 应用化学系, 日本东京都目黒区大岡山 2-12-1, 152-8552

*Email: liu@mct.isct.ac.jp

面向新一代高速无线通信(5G/6G)对低介电常数(D_k)与低介电损耗因子(D_f)高分子材料的迫切需求,本研究系统分析了数十种芳香族聚酰亚胺(PI)的高频介电特性,涵盖含氟、含硫及生物基等结构多样的分子体系,测量频率范围覆盖10–330 GHz,重点分析其频率与湿度依赖性,以及与分子结构和聚集态结构之间的关联性。通过应用宽频Fabry–Pérot型平板谐振腔^[1,2]、可变湿度圆柱谐振腔^[3,4]以及可控湿度条件下的傅里叶变换红外光谱(FT-IR)装置,本研究明确了PI在高频条件(>10 GHz)下的极化机制及水分吸收引发的介电耗散行为,进而提出了用于材料设计的量化结构优化指标。实验结果显示,在10–330 GHz范围内,所有PI样品的 D_k 均随频率增加而单调下降,并逐渐趋近于近红外波段的折射率平方(n^2);尽管水分子吸收在约20 GHz附近出现共振峰, D_f 整体呈线性上升趋势,反映出主导耗散机制逐渐由水诱导的偶极弛豫转向高频骨架振动吸收。为进一步量化结构对 D_f 的影响程度,引入了频率敏感系数(k_{Df})与湿度敏感系数(h_{Df})两个参数,分别表征 D_f 对频率与湿度的响应强度,并揭示其与主链刚性、取代基极性、空间位点等结构参数之间的依赖关系。为进一步验证湿度依赖性机制,结合可控湿度下的FT-IR谱图分析,系统考察了水分吸收特征区与 D_f 之间的关联。结果表明,红外吸收峰强度不仅与吸湿量密切相关,更与 D_f 变化呈现高度一致的主曲线关系。谱峰分解进一步指出,自缔合水通过与酰亚胺羰基形成氢键,增强了分子链段的局部松弛性,从而显著提升了GHz频段下的介电损耗。所提取的谱学参数可作为评估水分诱导 D_f 的量化指标。综上,本研究构建了“分子结构–红外响应–极化机制–介电特性”的多尺度关联分析框架,系统阐明了水分子对PI介电损耗行为的影响机制,并提出了面向宽频率、低 D_f 聚酰亚胺材料的结构设计与评价方法,为5G/6G高频电子器件用高分子绝缘材料的分子设计与工程应用提供理论依据。

关键词: 聚酰亚胺; 介电损耗; 频率依赖性; 湿度响应; 极化机制分析

参考文献

- [1] EM Labs Inc., Japan, www.emlabs.jp.
- [2] H. Liu, R. Sawada, S. Yanagimoto, Y. Yanagimoto, S. Ando, *Appl. Phys. Lett.* **2024**, *124*, 232903.
- [3] R. Sawada, S. Ando, *J. Phys. Chem. C* **2024**, *128*, 6979–6990.
- [4] Y. Tsurusaki, R. Sawada, H. Liu, S. Ando, *Macromol. Rapid Commun.* **2025**, *46*, 2401113.