

高周波広帯域 (10~330 GHz) の誘電特性で極めて低い周波数依存性と湿度依存性を示す高フッ素化ポリイミド

東京科学大物質¹・EM ラボ(株)² ○劉 浩男¹・澤田 梨々花¹・柳本 舎那²・柳本 吉之²・安藤 慎治¹

<諸言> 5G および次世代 6G 通信においては、ミリ波帯 (30~300 GHz) で低誘電率 (D_k)・低誘電正接 (D_f) を示す絶縁材料が不可欠であり、ポリイミド (PI) が耐熱性・機械的強度に優れ、過酷な環境下でも安定なことから有望視されている。しかし、100 GHz を超える周波数領域の高分子の誘電特性は十分に解明されておらず、6G 用途への適用にはさらなる検討が求められる。最近われわれは、フッ素化による D_k ・ D_f の低減および吸湿性抑制効果を解析し^[1]、一部のフッ素化 PI (FPI) が 25~330 GHz で高い周波数安定性を示すことを報告した^[2]。本研究では、フッ素含有率 27 wt%以上の 10F および 6F ベースの FPI (Fig. 1) を新たに合成し、10~330 GHz における誘電特性および湿度依存性を詳細に評価した。

<実験> ポリアミド酸薄膜の熱イミド化により FPI の自立膜を作製した。10 GHz における D_k ・ D_f の相対湿度 (RH) 依存性は、Anritsu 社製 VNA (MS46122B) に AET 社製空洞共振器 (TE011 モード) を接続し、自作の調湿チャンバー内で測定した。25~330 GHz における D_k ・ D_f の周波数依存性は、Keysight Technologies 製 PNA ミリ波システム (N5290A) に周波数拡張モジュールを接続し、EM ラボ社製 Fabry-Perot 共振器群を用いて測定した。

<結果と考察> 10 GHz における D_k ・ D_f の RH 依存性評価 (Fig. 1a,b, 23 °C) では、60% RH の環境下でも FPI は $D_k < 2.8$, $D_f < 0.01$ を維持した。一方、市販 PI の Kapton-H は D_k が 3.6 近くまで上昇し、 D_f も約 0.02 に達した。これにより、FPIs が湿度による誘電特性の劣化に対して高い耐性を示し、湿潤環境下での使用に極めて有利であることが示された。また、25~330 GHz の周波数分散特性 (Fig. 1c, 20 °C, 45% RH) から、GHz 帯において D_k は系統的に減少し、 D_f は異なる傾きで直線的に増加することが明らかとなったが、低周波域で低 D_f を示す PI であっても、高周波域では同様の特性を維持するとは限らない。また、測定周波数帯では D_f に明確な吸収ピークが観測されないことから、誘電分散の主要因は THz 領域に存在する振動緩和過程と考えられる。Kapton-H は 330 GHz において $D_k \sim 3.4$, $D_f \sim 0.015$ ^[2] を示したのに対し、FPI はさらに優れた特性を示し、特に高フッ素化 FPI は 130 GHz で $D_k < 2.8$, $D_f < 0.01$, 330 GHz においても $D_f < 0.015$ を維持した。即ちフッ素原子の低分極性および低吸水性に加えて、高周波数域での双極子緩和を効果的に抑制する分子設計により、FPI が 5G/6G 通信周波数帯において卓越した誘電特性を発揮することが明らかとなった。

<謝辞> TFBZ ジアミンをご提供いただいたセイカ(株)に感謝いたします。

<文献> [1] Sawada *et al.* *J. Phys. Chem. C*, **2024**, 128, 6979. [2] Liu *et al.* *Appl. Phys. Lett.* **2024**, 124, 232903.

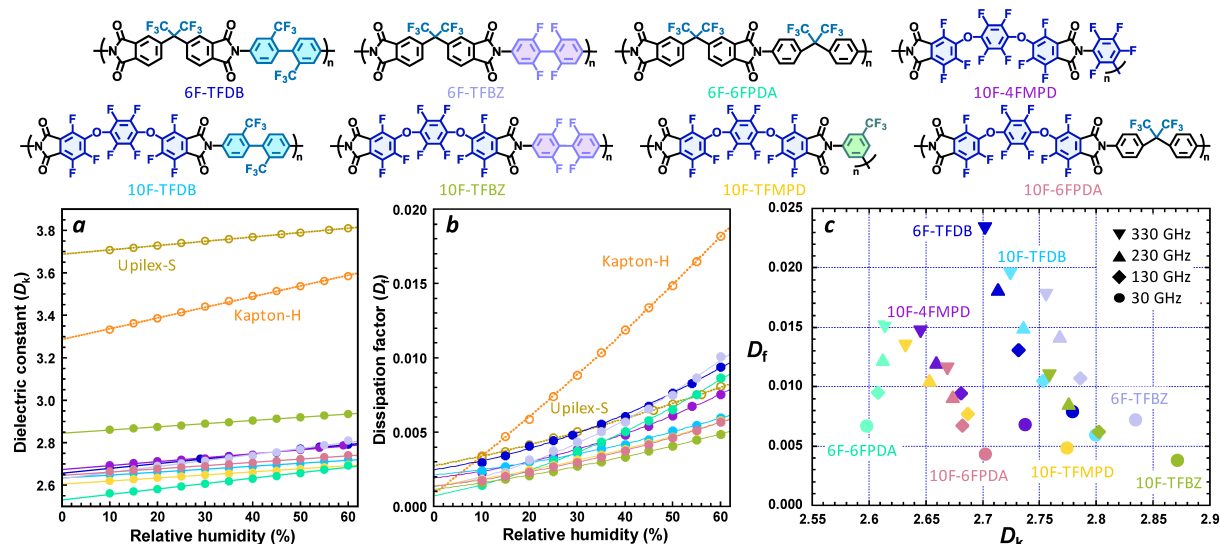


Fig. 1. Chemical structures of FPIs and their (a,b) humidity- and (c) frequency-dependent dielectric properties.

Highly Fluorinated Polyimides Exhibiting Extremely Low Frequency and Humidity Dependence in High-Frequency Broadband (10~330 GHz) Dielectric Properties

Haonan Liu¹, Ririka Sawada¹, Shana Yanagimoto², Yoshiyuki Yanagimoto², Shinji Ando¹ (¹School of Materials and Chemical Technology, Science Tokyo, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan ²EM Labs Inc., 1-4-13 Mizukasadori, Nagata-ku, Kobe, Hyogo 653-0842, Japan)

¹Tel & Fax: +81-3-5734-2889, E-mail: liu@mct.isct.ac.jp