

5G・6G 移動体通信応用に向けたポリイミドの広帯域 (10–330 GHz) 誘電特性評価

東京科学大物質 ○劉 浩男・澤田 梨々花・津留崎 義元・安藤 慎治

EM ラボ(株) 柳本 舎那・柳本 吉之

<緒言> 5G および次世代 6G 移動体通信技術の進展に向けて、ミリ波帯 (30–300 GHz) において低誘電率 (D_k)・低誘電正接 (D_f) を示す絶縁材料が不可欠であるが、ポリイミド (PI) は耐熱性・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 を超える周波数域での高分子の誘電特性は解明されておらず、6G 用途への適用にはさらなる検討が必要である。これまで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]、一部の高フッ素化 PI (FPI) が ~330 GHz の広帯域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、市販 PI、バイオ由来 PI、FPI、および硫黄含有 PI (SPI) を対象に、10–330 GHz における誘電特性を系統的に調査した。

<結果と考察> ポリアミド酸薄膜の熱イミド化により PI の自立膜を作製した。10 GHz、20 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 (10–60% RH, 23 °C)。10F-PIs および 3S-3S は、60% RH の高湿環境下においても、 $D_f < 0.005$ を維持した (Fig. 1a)。6F-PIs は比較的高い RH 依存性を示したが、これは 10F-PIs に比して自由体積が大きくフッ素密度が低いいため、 $D_f \sim 0.5$ (10 GHz) を示す水の誘電特性の影響を受けやすいことに起因すると考えられる。一方、3S-3S の RH 依存性が 10F-PIs に比べさらに小さいことは特筆すべきで、これは回転自由度の高いチオエーテル結合が分子鎖の凝集を促進し、かつ S 原子の低い電気陰性度が水分子の侵入を抑制しているためと推察される。

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 (20 °C, 45% RH)。 D_f は周波数とともに傾きの異なる直線的な増加傾向を示した (Fig. 1b)。即ち、低周波域において低 D_f を示す PI であっても、高周波域において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。実際、10F-TFDB および 6F-TFDB は、330 GHz に至るまで D_f の増加が顕著であり、TFDB 構造がサブ THz 帯に特徴的な吸収を有する可能性が示唆される。一方、10F-TFBZ および 10F-pTFBZ は、側鎖 (-F) が小さくかつ剛直なジアミン構造により、 D_f の周波数依存性が小さくサブ THz 帯での緩和吸収が効果的に抑制されていると考えられる。特に 10F-pTFBZ は、F 原子によりイミド-フェニル結合の回転運動も抑制されることから、330 GHz において $D_f = 0.0089$ と極めて低い値を示した。すなわち、フッ素原子の低分極性および低吸湿性に加え、サブ THz~THz 領域での双極子緩和や分子振動吸収を抑制する分子設計により、10F-pTFBZ に代表される FPIs によって 5G/6G 通信に求められる高周波誘電特性が実現可能であることが示された。

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

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

Broadband (10–330 GHz) Dielectric Characterization of Polyimides for 5G/6G Mobile Communication Applications

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

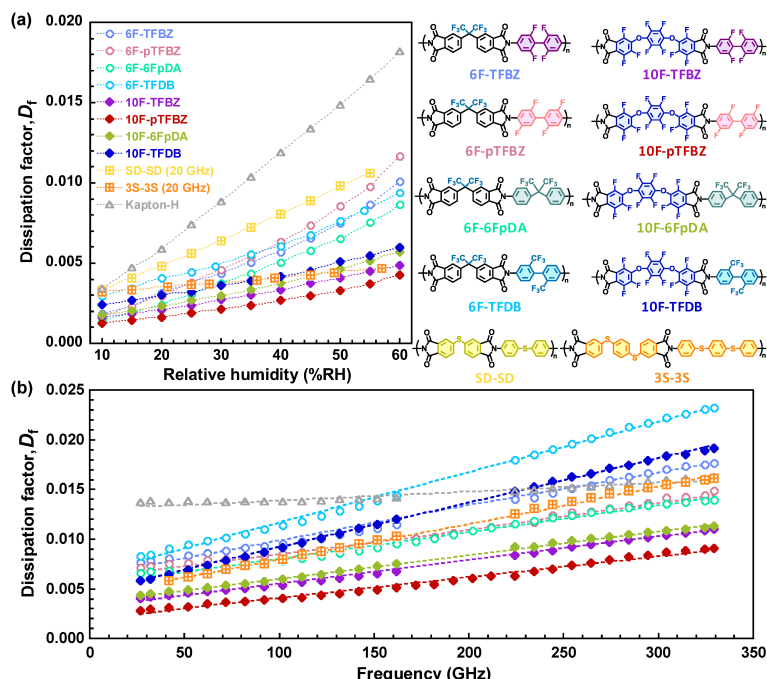


Fig. 1. Chemical structures of FPIs and SPIs, and their (a) humidity- and (b) frequency-dependent dissipation factor (D_f).