

Beyond 5G (6G) 応用に向けたポリイミドの誘電特性解析

東京科学大・物質理工 ○安藤 慎治・澤田梨々花・劉 浩男

第5～6世代(5G～6G)の無線通信技術の急速な発展に伴い、その動作周波数域は従来のサブGHz帯から数十GHz、さらに数百GHzのミリ波～サブTHz帯へと拡大しつつある。このような高周波域において、低誘電率(D_k)および低誘電損失率(D_f)を示す絶縁材料を実現することは、高速パッケージ基板、アンテナ誘電体層、高周波デバイスにとって極めて重要であるが、計測機器が高価なこともあり、低誘電材料の設計指針は確立されていない。現在、熱可塑性液晶ポリマー(LCP)が、低い吸水率と優れた誘電特性により量産されているが、耐熱性、化学的安定性、電気絶縁性、機械的強度、薄膜加工性などからポリイミド(PI)に代表されるスーパーエンプラが次世代低誘電材料として期待される。但し、Kaptonに代表される従来の芳香族PIは大きな分極率と高い吸湿性に起因して、 D_k が高く D_f の湿度依存性が大きいいため応用が制限される。

われわれは13種のPI群(図1)の10GHzにおける誘電挙動を電子分極と双極子分極の2つの機構に分離して体系的に整理し¹⁾、 D_k が単位体積あたりの電子分極率と極性基比率(Polar%)に、また D_f がPI面内の双極子分極($P_{d(TE)}$)と高い相関にあることを明らかにした(図2)。さらに自作装置により誘電特性の相対湿度(RH)依存性を計測したところ²⁾、すべてのPI群でRHの上昇に伴い D_k 、 D_f が直線的に増加し、かつ両者の傾き(h_{Dk} 、 h_{Df})に高い相関が認められた(図3)。ここで、I)類の高フッ素化PIと市販の半結晶性PIは、F基の疎水性と高度な秩序構造により水の侵入が阻害されるが、III)類のKaptonや植物由来PI³⁾は、大きな分極と自由体積分率によりRH依存性が大きい。この機構を解明するため、PI分子鎖に吸着した水分量とその水素結合構造を湿度可変FT-IRによって解析し、PI分子鎖に二次的に結合する“自己会合水”が D_f の上昇に大きく寄与することを解明した。さらにEMラボ(株)の協力により25～330GHzにおける D_k 、 D_f の周波数依存性を計測し、PFAS規制にかからない全フッ素化・高フッ素化PI群が、極めて小さな湿度依存性と周波数依存性を示すことを報告した^{4,5)}。

文献 1) Sawada R, Ando S. *J. Phys. Chem. C*, 2024, **128**, 6979-6990. 2) Sawada R, Liu, H, Ando S. *J. Phys. Chem. B*, 2025, **129**, 10928-10943. 3) Sawada R, Ando S. *Macromolecules*, 2022, **55**, 6787-6800. 4) Liu H, Sawada R, Yanagimoto Y&S, S. Ando *App. Phys. Lett.*, 2024, **124**, 232903. 5) Sawada R, Liu H, Yanagimoto Y&S, Ando S *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2025, **7**, 14371-14381.

Analysis of the Dielectric Properties of Polyimides for Beyond-5G / 6G Applications.

Shinji Ando, Ririka Sawada, Haonan Liu (Dept. Chem. Sci. Eng., Inst. Sci. Tokyo, Ookayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan) Tel: +81-3-5734-3507, E-mail: ando@mct.isct.ac.jp

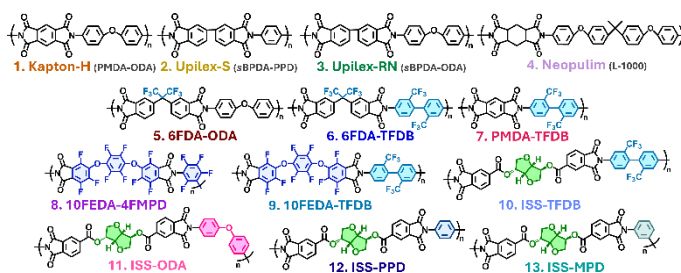


Fig. 1 Chemical structures of polyimides (PIs) used in this study.

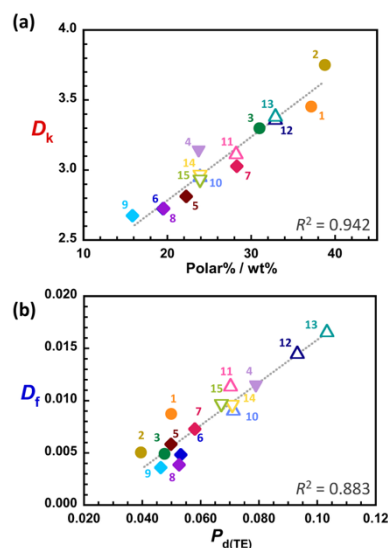


Fig. 2 Relations between a) D_k vs wt fraction of polar groups (Polar%), and b) D_f vs. in-plane dipolar polarizability ($P_{d(TE)}$) at 10 GHz.

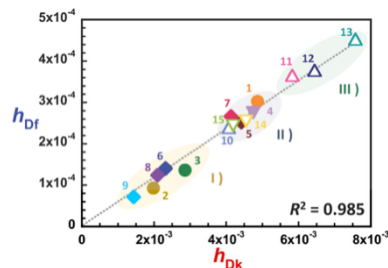


Fig. 3 Relations between the RH dependence (slopes) of D_k and D_f for 13 types of PIs at 10 GHz.