

5G/6G応用に向けたポリイミドにおける誘電特性の 分極分析／FT-IR分析と湿度依存性

東京科学大 物質理工[○]安藤 慎治・澤田 梨々花・劉 浩男

代表的なスーパーエンブラであるポリイミド (PI) は、光電子デバイスや 5G/6G 無線通信用途における光導波路材料および低誘電率絶縁体として期待されている。

まず 15 種の PI について、10~20 GHz の横電界モード (TE_{011}) における誘電率 (D_k) と損失係数 (D_f) を測定し、双極子配向分極 (P_d) と電子分極 (P_e) ならびに D_k と D_f の関係を定量的に調査した[1]。単位体積あたりの全分極、すなわち P_t ($\propto D_k$) は、 P_e と正の直線相関を示し、 P_t は主に近赤外領域 (波長: 1310 nm) における平均屈折率 (n_{av}) または面内屈折率 (n_{TE}) から評価される P_e によって支配されている。

さらに PI の D_f は分子配向により強い異方性を示し、面内方向 ($P_{d(TE)}$) において P_d に直線的に比例することが判明した。これは D_f が双極子モーメントの面内成分 (μ_{TE}) および 10 GHz における PI の緩和運動と密接に関連していることを示している。さらに、すべての PI の D_k および D_f は、環境の相対湿度 (RH) に対して直線的に増加し、その傾き (h_{Dk} および h_{Df}) は互いに比例関係を示した[1]。われわれは最近、PI 膜に吸収された水の $\nu(OH)$ 伸縮振動および $\delta(HOH)$ 変角振動の RH 依存性を計測した [2]。 D_k の RH に対する直線的かつ比例的な増加とは対照的に、 D_f の増加は直線性から徐々に逸脱し、上向きに増加した。これは水の大きな D_f だけでなく水による PI 鎖の可塑化と鎖内の双極子の局所的な緩和運動の活性化に起因すると考えられる。特に全フッ素化 PI [3] および高フッ素化 PI は、フッ素の低い分極率と高い疎水性により、極めて低い h_{Dk} および h_{Df} 値を示した。興味深いことに sBPDA 無水物由来の市販 PI も、水分の浸透を防ぐ緻密な分子配列 [4] により、低い h_{Dk} および h_{Df} を示した。

最近、ファブリ・ペロー共振器を用いて 11 種の PI の D_k と D_f を 25~330 GHz の周波数範囲で系統的に調査した [5]。周波数の増加につれて、全ての PI で D_k が連続的に減少し、 D_f が一貫して増加した。全周波数域で明確なピークが観測されなかった点は特筆すべきである。また、ジアミン部分に $-CF_3$ 基を有する PI では、50 GHz を超える周波数域で D_f が急激に増加した。これは主鎖全体に及ぶ位相の乱れをとともなう大きな周期運動に起因するが [6]、フッ素化ジアミンの適切な分子設計により克服が可能である。上記より、全フッ素化および高フッ素化 PI は近未来の無線通信における絶縁材料として有望である。

キーワード：ポリイミド、誘電率、損失係数、異方性、分極解析、湿度依存性、5G/6G無線応用、近赤外領域における光学特性

- [1] R. Sawada and S. Ando, *J. Phys. Chem. C*, **2024**, 128, 6979–6990.
- [2] R. Sawada, H. Liu and S. Ando, *J. Phys. Chem. B*, **2025**, 129, 10928–10943.
- [3] S. Ando, T. Matsuura and S. Sasaki, *Macromolecules*, **1992**, 25, 5858–5860.
- [4] R. Ishige, T. Masuda, Y. Kozaki, E. Fujiwara, T. Okada and S. Ando, *Macromolecules*, **2017**, 50, 2112–2123.
- [5] H. Liu, R. Sawada, S. Yanagimoto, Y. Yanagimoto and S. Ando, *Appl. Phys. Lett.*, **2024**, DOI:10.1063/5.0205692.
- [6] R. Hosoya, S. Ando, Y. Hayashi, R. Yoshida, H. Furuya, *Polymer*, **2025** (in press).