

5G/ ミリ波に対応する 低誘電ポリイミドの設計技術と応用展開

Tomikawa Masao
東レ(株) 富川 真佐夫

研究本部・理事
〒520-0842 滋賀県大津市園山3-1-2
☎077-533-8082

はじめに

昨年よりの新型コロナウイルス感染症の拡大で在宅での勤務、授業聴講が普通になったが、これを可能にしたのは進化し続けている通信ネットワークである。通信ネットワークは、多くのユーザーすべてに大容量高速通信を可能にすべく発展してきた。これに向け、現在は5G通信の実用化が進められている。5G通信を可能にする技術として、図1に示すように新しい周波数帯としての3.6GHz、4.5GHzというサブ6という帯域に加えて、28GHz帯というミリ波領域の周波数を使うことで、より広い帯域での伝送が可能になり、高速・大容量通信を可能にしている¹⁾。

高い周波数を使うためには、回路基板を形成する配線、絶縁体に対する要求レベルが高くなってきている。絶縁材料については、誘電率、誘電正接に対する要求が高くなっている。ここでは基板材料や半導体の絶縁材料として幅広く使われているポリイミド系材料の低誘電率化、低誘電正接化について述べる。

誘電特性と伝送損失の関係

電波は、アンテナで電気信号として回路を通して処理される。この間、導体配線と絶縁体よりなる回路基板の中を通る。高周波信号が回路基板を通るとき、信号は導体の抵抗に起因する導体損失と

絶縁体に起因する誘電損失の和により減衰する²⁾。

導体損失は周波数が高くなると導体の持つ直流抵抗に加えて表皮効果という高周波特有の現象による損失が加わってくる。表皮効果は、高周波信号が通過するときに発生する誘導起電力と誘導電流により導体内部に渦電流が発生し、導体中央部を信号が通りにくくなる現象である³⁾。周波数が高くなると、導体厚が減るために抵抗が大きくなり、式(1)に示すように直流での電気抵抗(R_{DC})から、周波数のルートに比例して抵抗が大きくなる。

$$\text{導体損失} \propto K_1 \times \sqrt{f} \times R_{DC} \quad (1)$$

K_1 : 定数、 R_{DC} : 直流での電気抵抗

さらに、基板を作るときには導体金属と絶縁層の接着力を高めるために、絶縁層にデスマア処理という表面粗化処理を行い、アンカー効果による

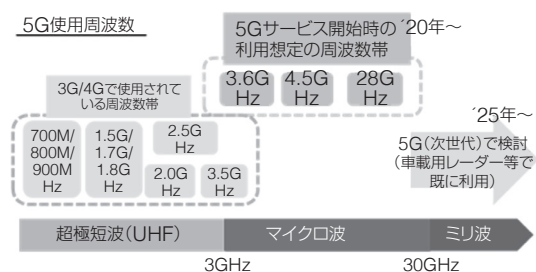


図1 通信技術の変化

表 1 代表的な原子団の P_{LL} と V [文献5]より筆者編集]

原子団	P_{LL}	V	P_{LL}/V
-CH ₃	5.64	23.99	0.24
-CH ₂ ⁻	4.65	15.85	0.29
CH ⁻	3.62	9.45	0.38
-C ₆ H ₆	25.5	73.70	0.35
-C ₆ H ₄ -	25.0	65.50	0.38
-O-	5.2	10.00	0.52
-CO-	10.0	13.40	0.75
-COO-	15.0	23.00	0.65
フェノール性水酸基	~20	9.70	2.06
-CONH-	30	28.85	1.04
-F	(1.8)	10.90	0.16
-CN	11	15.50	0.71
-S-	8	17.80	0.45

接着力を高めることが行われている⁴⁾。金属箔についても表面粗化や黒化処理などによる凹凸形成や酸化層形成が行われている。この表面の凹凸形成、酸化により配線表面が荒れることとなり、上述した表皮効果のため、高周波領域では損失が大きくなる。このため、高周波で用いる絶縁材料は表面を荒らすようなことをせずに高い接着性を示すことが重要である。

誘電損失は、絶縁材料内にある分極成分が高周波の動きに反応できないと分極の応答にずれが生じ、損失が生じる。この分極の遅れが誘電正接($\tan \delta$)である。絶縁体の誘電損失は以下の式(2)で表される。誘電損失は絶縁体の誘電率のルートと $\tan \delta$ 、周波数に比例する。このため、高周波になると周波数の項が大きくなるため、誘電損失が大きくなる。

$$\text{誘電損失} = f \times K_2 \times \sqrt{Dk} \times \tan \delta \quad (2)$$

f : 周波数、 Dk : 比誘電率、 K_2 : 定数

これより、誘電損失を小さくするには、(2)式で示したように比誘電率、 $\tan \delta$ を小さくする必要がある。比誘電率については真空の誘電率(ϵ_0)の比であるため、1以下にならない。一方、 $\tan \delta$ は分極成分が完全に追従、あるいは動かなければ0にすることが可能であること、比誘電率は平方根で効き、 $\tan \delta$ は直接効くことから、 $\tan \delta$ を低減することが、より効果的である。

2. 有機高分子の誘電特性

有機高分子の誘電率については、比誘電率と分極率との関係を与えるクラウジウス=モソッティ

表 2 代表的な樹脂の誘電率の実測値と計算値[文献5]より筆者編集]

ポリマー	ϵ_r (実測値)	ϵ_r (計算値)
ポリエチレン(PE)	2.3	2.20
ポリプロピレン(PP)	2.2	2.15
ポリスチレン(PS:)	2.55	2.55
ポリテトラフルオロエチレン	2.1	2.00
ポリアクリロニトリル	3.1	3.26
ナイロン66	4.0	4.14
ポリ(2,6-ジメチルフェニレンオキサノド)	2.6	2.65

の式を変形すると式(3)が得られる⁵⁾。これによると高分子を構成している有機基のモル分極とモル体積の比となり、下記の表に示したような各有機基の和により、誘電率を推測することが可能になる。

$$(\epsilon-1)/(\epsilon+2) = P_{LL}/V \quad (3)$$

ϵ : 比誘電率

P_{LL} : モル分極

V : モル体積

式(3)より、有機樹脂の誘電率は、構成する原子団の P_{LL} および V により決まる。これより比誘電率を低下させるには、 P_{LL}/V の小さな原子団を導入することで、樹脂の誘電率を低下させることができる。表1に代表的な原子団の P_{LL} と V を示す。

実測値と計算値の一例を表2に示す。このように樹脂の誘電率は構造よりある程度予測可能である。

高分子の誘電正接($\tan \delta$)については、角田による汎用的な高分子材料についての解説がある⁶⁾。たとえば、非極性のポリエチレンの場合、 $\tan \delta$ の周波数依存性では1GHzに極大があり、これはポリエチレンの γ 分散に起因し、その大きさは非晶領域の割合に依存している。一般に高分子に温度変化をすると、弾性率や誘電率が変化する。また、極性高分子のポリ塩化ビニルでは、室温で10kHz付近に γ 分散のピークが見られるが、温度を上昇していくと高周波側にシフトしていくとともに、不明瞭になっていく。これは室温では低周波側にあった β 分散のピークが、温度上昇とともにシフトし、両者が重なるためであるとしている。

高周波領域では緩和時間の長いイオン伝導の寄与等を考える必要がなく、分子構造に由来する極性と分子運動の温度依存性を考慮することが必要