

ミリ波用配線板材料技術

電子応用技術R&Dセンター 奥出 聰¹

Printed Wiring-board Material Technology for Millimeter-wave Applications

S. Okude

移動体通信ネットワークの分野では第5世代通信（5G）の商用サービスが開始され、周波数が30GHzを超えるミリ波が電子機器内で使われはじめている。ミリ波は広い周波数帯域が利用できるため、ネットワークの高速大容量化が可能であるが、従来の電子配線基板では伝送損失が大きいため信号を効率よく扱えないという課題がある。これを解決するためには、ミリ波に適した配線板技術が必須であり、本稿では配線板材料技術を中心にミリ波で求められる配線板について概説する。

In the field of mobile communication networks, commercial services of the 5th generation networks have started and millimeter waves with frequencies over 30 GHz have been started to be used in electronic devices. Since millimeter waves cover wide frequency bands, it can realize high-speed and large-capacity network systems. However, there is a problem that millimeter-wave signals cannot be handled efficiently in conventional electronic wiring boards due to high transmission loss in those boards. To solve the problem, wiring board technologies optimized for millimeter-wave application are indispensable. This paper reviews the technologies especially focusing on the wiring board materials.

1. まえがき

SNSや動画配信サービスの普及拡大により、インターネットトラフィックは日々増加の一途をたどっており、より高速でより大容量なインターネットサービスが要求され続けている。この要求に応えるため、モバイル通信網においては、5G通信（第5世代移動通信）サービスが2020年に本格的に開始され、1Gbpsを超える超高速通信が提供されはじめている。このような高速大容量な通信を実現するためには、従来よりも広い周波数帯域が活用できるミリ波（概ね30GHz以上の周波数）を使うことが必要条件になっている。

5G通信網におけるミリ波の活用は今後急速に拡大していくと予想されるが、ミリ波を実用的に使っていくための課題として、通信機器で使用される配線板における伝送損失の低減がある。通信機器内で使用される配線板には、ICを中心としてさまざまな電子部品が実装され、配線板にそって高周波信号が伝送する。一般的な電子機器の配線板に広く用いられているガラスエポキシやポリイミド（PI）といった材料においては、ミリ波帯の周波数では伝送損失がこれまでの周波数領域よりも格段に大きくなってしまう

ため、ミリ波の信号を取り扱うことができない。これは配線板材料自身の特性に起因するもので、ミリ波で低い伝送損失を示す配線板材料を選択する必要がある。また、そのような材料を用いても低損失化には限界があるため、配線長はできるだけ短くして損失低減する必要がある。この要求から、ミリ波帯では、信号を発生するICから送受信を行うアンテナまでを一つの基板に小型集積モジュール化したアンテナインパッケージ（AiP）の構造で実用化が進められている¹⁾。

本報告では、ミリ波を用いてAiPなどの通信機器を実現するために必要となる配線板への要求事項について示し、それを実現するための材料技術について概説する。

2. ミリ波用配線板材料への要求事項

2.1 多層配線化

図1にAiPの基本構造模式図を示す。絶縁基材と配線層で構成された多層配線板をベースに、片面にはRF-ICが実装され、反対の面にはミリ波を送受信するためのパッチアンテナが形成されている。ミリ波帯においては空間伝搬損失が大きくなることから、アンテナ利得を大きくする必要があり、複数のアンテナを一定間隔で配置するアンテナアレイの構造が通常用いられる。ミリ波信号を送信／受信

1 高周波基板開発部 部長

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
AiP	Antenna in Package	配線板上に、プリント配線で形成したアンテナと、高周波信号を送信・受信するための電子回路を実装集積化し、通信機能を実現するための小型パッケージ
RF-IC	Radio Frequency Integrated Circuit	高周波信号を生成し送信・受信を行うための集積回路
ガラスエポキシ基板		直径数μmのガラス繊維を格子上に編んだガラスクロスにエポキシ樹脂を含浸硬化させた配線板材料。耐熱性、耐久性があるため、幅広い電子機器で使用されている。

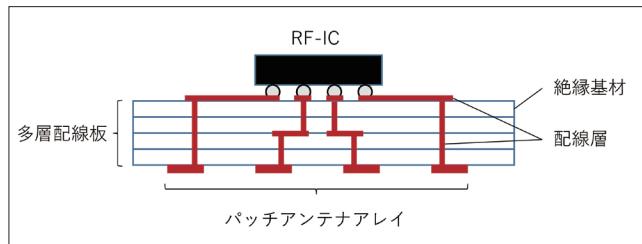


図1 アンテナインパッケージの基本構造（断面図）
Fig. 1. Basic concept of Antenna in Package (cross-section).

するRF-ICと、パッチアンテナとの間はできるだけ損失を低く抑える工夫が必要であるため、基板の平面方向に配線を広げて接続するよりも、配線を多層化して基板厚さ方向にICとアンテナを最短距離で接続する方法が有利である。したがって、配線板としては、配線層数が4層から、多い場合では10層を超える多層配線板が使用される。

多層配線板において重要な材料パラメータとして、材料の線膨張係数 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) がある。多層配線板では、絶縁材料および配線材料のCTE差が原因で、配線板の反りが発生する場合が多く、配線板の構成材料のCTE差をできるだけ小さく抑える必要がある。配線材料としては銅が用いられるため、そのCTEの16 ppm/°Cにできるだけ近づけるように材料開発がすすめられている。このようにCTEが制御された配線材料であれば、配線板が使用される環境下の温度変化に対しても実装される電子部品へのストレスが小さく抑えられ、信頼性の高いAiPが実現できる。

2. 2 低誘電特性

配線板を伝搬する高周波信号の伝送損失は、絶縁材料の誘電特性、配線導体の特性および配線厚さ、幅に依存する。伝送損失 α は、絶縁材料の誘電特性に起因する誘電損失 α_d と配線導体に起因する損失 α_c の和で表され、絶縁材料のパラメータと以下の関係がある^{2), 3)}。

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c$$

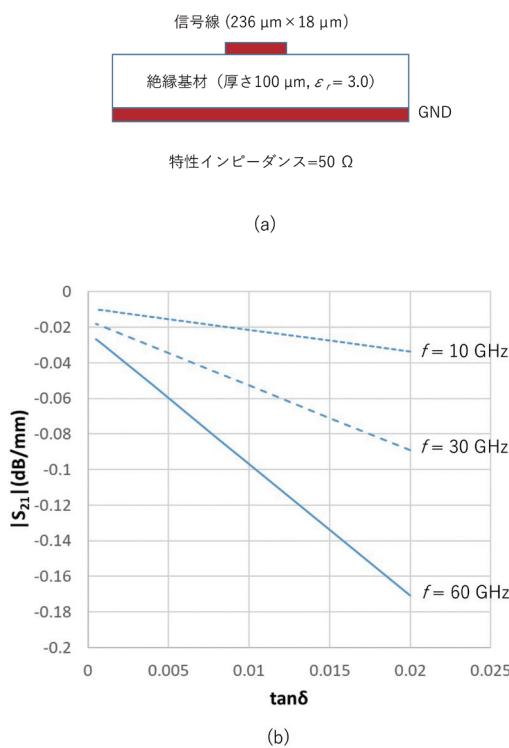
$$\alpha_d \propto \sqrt{\epsilon_r} \cdot \frac{f}{c} \cdot \tan\delta \quad (1)$$

$$\alpha_c \propto \sqrt{\epsilon_r} \cdot \sqrt{f} \cdot \sqrt{\rho} \quad (2)$$

ここで f は伝送信号の周波数、 c は真空中の光速、 ϵ_r 、 $\tan\delta$ はそれぞれ絶縁材料の比誘電率、誘電正接、 ρ は配線導体の抵抗率を表す。式(1)、(2)から、以下の関係があることがわかる。

- ① α_d は周波数 f に比例するのに対して、 α_c は周波数の平方根 \sqrt{f} に比例する。従って、周波数が高くなるほど α_d が支配的となる。
- ② α_d を小さくするためには、 ϵ_r 、 $\tan\delta$ とともに小さい材料を選定する必要がある。

配線板に広く用いられる樹脂材料では、 ϵ_r よりも $\tan\delta$ に樹脂の種類による差があるので、 $\tan\delta$ は基板材料選定における重要な指標となる。 $\tan\delta$ と伝送特性の関係について試算した結果を図2に示す。同図(a)に示したマイクロストリップ線路について、絶縁材料の $\tan\delta$ を変えた時の透過係数 $|S_{21}|$ を計算した結果が同図(b)である。 $\tan\delta$ が大きいほど透過係数は小さくなる（伝送損失は大きくなる）こと、伝送周波数が高いほど透過係数が小さいことが確認できる。広く電子機器に用いられるガラスエポキシやPIなどの絶縁材料では、 $\tan\delta$ は大凡0.02の値を持つが、ミリ波用としては0.005よりも小さな $\tan\delta$ を持つ絶縁材料を選定する必要がある。

図2 透過係数と伝送周波数, $\tan\delta$ の関係

- (a) 計算したマイクロストリップ線路構造とパラメータ
(b) 計算結果

Fig. 2. Relation between transmittance, transmission frequency and $\tan\delta$,
(a) Structure and parameters of calculated micro strip line and
(b) Calculated results.

2. 3 配線導体の表面粗さ低減

高周波信号が配線を伝搬する場合、表皮効果から電流が流れる領域は配線導体の表面から数μm以下の領域に集中することが知られており、その長さは表皮深さ d として知られている³⁾。

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}} \quad (3)$$

ここで μ_0 は真空中の透磁率、 μ_r は導体の比透磁率である。例えば、配線導体として一般的な銅の場合、周波数60 GHzでは $d = 0.27 \mu\text{m}$ となる。

配線板は、絶縁材料と銅箔を貼り合わせた銅張積層板(CCL)を加工して形成されるが、絶縁材料と銅箔の密着性を向上するために銅箔の表面に凹凸をつける粗化処理を行う。粗度が大きいほど密着性が向上するが、表皮効果の影響から凹凸表面を沿う形で電流が流れ、見た目の抵抗率が上昇し伝送損失の増大につながる。従って、より粗度の小さい銅箔(ロープロファイル銅箔)を用いた配線板材料

がミリ波用途では適している。

2. 4 低吸湿性

そのほかにも配線材料として要求される事項は多くあるが、ミリ波用の材料として注意しなければならないのは絶縁材料の吸湿特性である。これは、水の分子自体がミリ波帯において高い誘電率と誘電正接を持っているため、絶縁材料自身が良好な誘電特性を持っていても、高湿環境下で配線板材料内に水分子が取り込まれると $\tan\delta$ が上昇して伝送損失が増大する。従って配線板材料の吸湿率はできるだけ低いほうが望ましい。

3. ミリ波用配線板材料と特性

本章では、ミリ波用配線板に要求される性能を満たした配線板材料について紹介する。

配線板材料を大きく分けた場合、樹脂材料をベースにした有機配線板と、セラミクス等の無機材料をベースにした無機配線板にわけることができる。有機配線板はさらに、ガラスクロスと呼ばれるガラス繊維を編み込んだ基材に樹脂を含浸させて剛性を持たせた、リジッド配線板と、樹脂をフィルムの状態にして柔軟性を持たせ、電子機器内の配線自由度を向上させてフレキシブル配線板がある⁴⁾。使用用途に応じてどのような基板を使うかが決まるが、コストの点からは有機基板が使われる場合が多い。ここでは有機基板材料を中心にミリ波での使用が検討されている材料について紹介する。

3. 1 LCP

ミリ波用有機配線板材料の代表として液晶ポリマー(Liquid Crystal Polymer : LCP)がある。LCPは熱可塑性のエンジニアリングプラスチックの一種であり、電子部品パッケージ、コネクタ、ソケットなど高信頼性が要求される用途で幅広く使われている。形状としてはフィルム材が一般的であり、FPC製造プロセスで配線板が作製可能である。フィルム成型条件により材料の結晶性を制御することが可能であり、これによりCTEが銅と同じ値の16 ppm/°C前後の材料が実現できている。誘電特性の代表値としては $\epsilon_r = 2.8$ 、 $\tan\delta = 0.003$ (@ 60 GHz) 程度である。吸湿性も十分低い材料であり、ミリ波レーダー、スマートフォンなどの用途で採用が進んでいる。

ミリ波AiPへ適用するためには多層配線を実現する必要がある。通常のFPC製造プロセスでは、絶縁基材の両面に配線を形成した両面配線板までしか実現できないが、多層化するための低誘電接着フィルム材も提案されており、これを使うことで片面／両面のLCP配線板を接着積層し多層配線板が実現できる。これまでにもLCPを用いたミリ波デ

バイスは提案されているが⁵⁾、実際にRF-ICと一体化してAiPを実現した例を図3に示す。同図(a)(b)は、それぞれ60GHz帯通信モジュールの外観、配線板の断面である。4層の配線構造が、貫通スルーホールビアで接続されていることが確認できる。

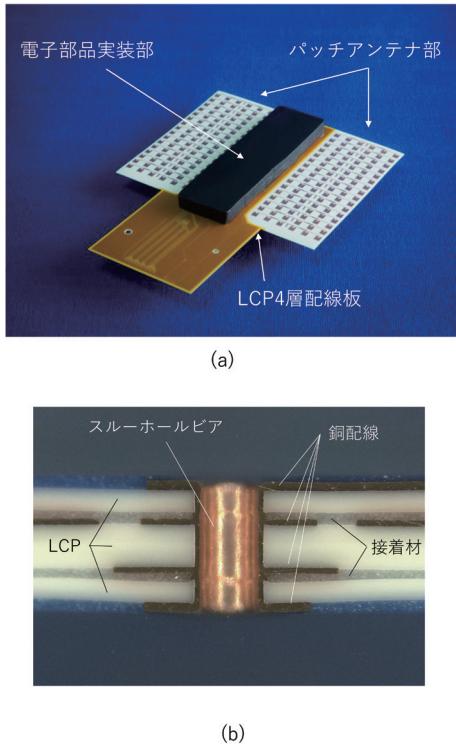


図3 LCP多層配線板を用いた60 GHzミリ波モジュール
(a) ミリ波モジュール外観 (b) 配線板断面

Fig. 3. A 60 GHz millimeter-wave communication module using an LCP multilayer wiring board,
(a) Appearance of the module and (b) Cross-section of the wiring board.

3. 2 PPE

LCPより高周波特性は若干劣るもの高周波用リジッド配線板材料として普及しているのがポリフェニレンエーテル (Polyphenylene ether : PPE) である。リジッド配線板材料として使われる場合、ガラスクロスに樹脂を含浸させるため、ガラスクロスの誘電特性の影響を受け、 $\epsilon_r = 3.5$, $\tan \delta = 0.007$ (@ 56 GHz) 程度の値になるが、樹脂単体ではLCPと同程度の良好な誘電特性を有している。熱可塑性の樹脂ではあるが、リジッド基板用材料として熱硬化性を付与したものも提供されており、広く普及しているガラスエポキシと同様の取り扱いで配線板が作製できる。このため、使用周波数がミリ波よりも多少低い高速サーバーや携帯基地局などの用途で採用が進んでいる。現時点ではリジッド基板用材料として使用されることが多いが、前述の

通り材料自身の特性はLCPと同等の性能を有しているため、今後はFPC用フィルム材料としても採用が進んでいくことが期待される。

3. 3 その他のミリ波用配線板材料

- ・ポリテトラフルオロエチレン (Polytetrafluoroethylene : PTFE)

高周波用有機材料としては一番誘電特性が良好であり、古くから高周波用配線板材料として使われ採用実績が多いが、他の材料との接着性が悪く、CTEも比較的大きいため多層配線板の実現が難しく用途が限定的である。

- ・変性ポリイミド (Modified Polyimide : MPI)

通常のFPC材料であるPI樹脂をベースに、樹脂骨格に変更を加えることで、誘電特性を改善したものである。 $\tan \delta$ は0.005～0.01程度でLCPの特性よりも劣るもの、通常のFPCと同じように取り扱い可能であるという利点がある。

- ・低温同時焼成セラミックス (Low Temperature Co-fired Ceramics : LTCC)

絶縁基材にセラミックス、配線導体に銅または銀を用いたもので、絶縁基材となるセラミックス粉末と樹脂バインダからなるグリーンシートに、金属粉ペーストで配線を印刷したものを積層・焼成して配線板にしたものである。比誘電率は有機材料と比較して大きいが、セラミックスの原材料成分の選択、調整で、ミリ波帯にも適用可能な $\tan \delta$ が十分小さい配線板が実現出来ている。焼成による寸法変化が大きく、大きなサイズの配線板を実現するのには向いておらず、小型(数cm角)のモジュールやフィルタなどの電子部品用で採用される。

- ・合成石英

純度の高い合成石英 (SiO_2) を主成分としたもので、ミリ波帯においても非常に低い誘電正接 $\tan \delta = 0.0004$ を有している。ガラスであるため加工性や多層化が難しく、インターポーラなどの限定された用途で検討が進んでいるが、100 GHzを超える周波数でも良好な特性を有しているため、5 Gの次の世代 (Beyond 5 G/ 6 G) に向けた材料として期待される。

以上、ミリ波用配線板材料の具体例を紹介したが、比較としてまとめたものを表1に示す。

表1 各種ミリ波用基板材料比較

Table 1. Comparison for various wiring board materials.

特性パラメータ	有機材料				無機材料	
	フレキシブル配線板	リジッド配線板	PPE	PTFE	LTCC	石英基板
基板主材料	LCP	MPI	PPE	PTFE	Al,Mg,Si等セラミックス	合成石英(SiO_2)
比誘電率, ϵ_r	2.8	2.7~3.0	3.5	2.2~3.0	5~8	3.8
誘電正接, $\tan \delta (\times 10^{-3})$	3	6~7	7~	~1	0.5~4	0.4
CTE($\text{ppm}/^\circ\text{C}$)	14~18	15~50	15	~100	3~12	0.5
配線多層化／最大配線層数	○/6	○/6	○/14	×/2	○/~20	×/2
吸湿性	○	△	○	○	○	○
基板材料の形態とサイズ	ロール状シート 250~500mm幅		方形板材 650mm角		タイル状 200mm以下	ウエハ 200mm以下

3. 4 各種材料の伝送特性比較

本章の最後として、配線板材料がミリ波伝送特性に与える影響を実際に測定評価した例を示す。図4は、厚さ100 μm の各種配線板材料に特性インピーダンスが50 Ω のマイクロストリップ線路を形成し、透過スペクトルを測定評価した結果である。グラフの縦軸は1 mmあたりの透過係数 $|S_{21}|$ を示している。いずれの材料においても周波数の上昇とともに透過係数が小さく（伝送損失は大きく）なることが確認できる。最も透過特性が良いのはPTFEであり、それに続いてLCP、MPI、PPEという結果であった。これは各材料の誘電正接の大きさとほぼ一致しており、ミリ波用としては誘電正接の小さい材料が望ましいことがこの結果からも確認できる。実際にどの材料を使用するかは、用途、要求特性、価格などにより総合的に判断して決める必要がある。

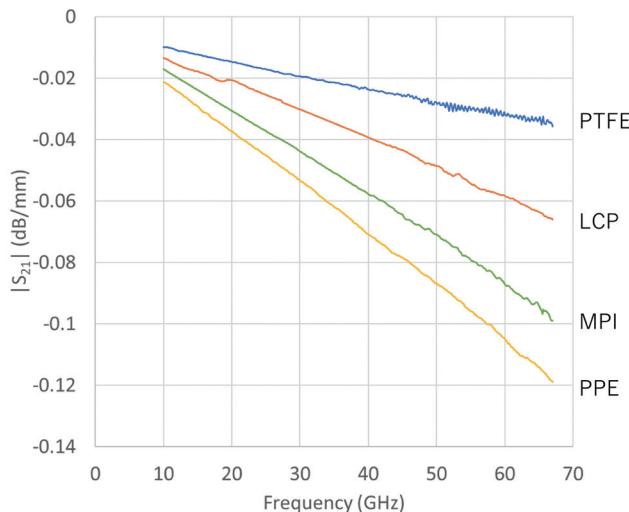


図4 基板材料の違いによるマイクロストリップ線路の透過係数スペクトル測定結果

Fig. 4. Measured results of transmittance spectra for microstrip lines on the difference of wiring board materials.

4. むすび

ミリ波を活用していくために必要な配線板材料技術について概説した。ミリ波という高周波数領域では、配線板材料の誘電特性がその性能を大きく左右するが、それに加えて通信機器に採用していくためには電子配線基板として要求される多くの条件を満たす必要がある。LCPはその中でも有望な配線板材料であり、ミリ波用途での活用が進んでいくと考えられる。モバイルネットワーク技術では5 Gの次の世代の議論がスタートしており、使用する周波数領域もさらなる広帯域化のために100 GHzを超える周波数を使用していくことが検討されている。そのような超高周波領域にも対応していくためには、今後も継続的に配線板材料技術開発を進めていく必要がある。

参考文献

- 須藤ほか：「5 Gを実現するミリ波用基板材料及びパッケージング技術」，電子情報通信学会誌，vol. 101, No. 11, pp. 1135 - 1139, 2018.
- J.R.James, P.S.Hall and C.Wood: Microstrip Antenna Theory and Design, Peter Peregrinus Ltd., 1981.
- 小栗ほか：「プリント基板上高速信号伝送における信号損失要因」，第29回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 16 P 1 - 17, 2015.
- http://www.ieice-hbkb.org/portal/doc_522.html：「インターフェクション・実装技術」，電子情報通信学会 知識ベース 知識の森, 9群9編, (2021年1月閲覧).
- 細野ほか：「LCP基板を用いたミリ波デバイス」，フジクラ技報, 第131号, pp. 21 - 25, 2018.