

# LCP基板を用いたミリ波デバイス

先端技術総合研究所 細野 亮平<sup>1</sup>・上道 雄介<sup>1</sup>・長谷川 雄大<sup>1</sup>  
小林 聖<sup>2</sup>・官 寧<sup>3</sup>  
プリント回路事業部 中谷 祐介<sup>4</sup>

## LCP-based Millimeter-wave devices

R. Hosono, Y. Uemichi, Y. Hasegawa, K. Kobayashi, N. Guan, and Y. Nakatani

近年、無線通信の高速大容量化が進んでおり、従来使用されてきたマイクロ波帯（～30 GHz）では無線通信の高度化に対応できなくなっている。ミリ波帯（～300 GHz）は光ファイバによる通信に匹敵する無線通信の実現が期待されており、とりわけ60 GHz（V-band）、70 / 80 GHz（E-band）が次世代の高速無線通信の周波数帯として期待されている。ミリ波帯の無線通信機器を構成する場合、その周波数の高さから損失の増大が懸念されるため機器内の基板には低損失なものが求められる。液晶ポリマー（LCP）は低誘電度かつフレキシブルプリント基板の基材として用いられているポリイミドに物性が類似していることから高周波特性、基板製造の面で優位性を持つ。本報告ではLCP基板を用いた各種ミリ波デバイスの設計開発事例について紹介する。

Recently, high-speed and huge capacity wireless communication is increasing and there is a limitation in such wireless communication at microwave-frequency band (～30 GHz). Millimeter-wave (mm-Wave) frequency band (～300 GHz) can be available in high-speed and huge capacity wireless communication due to its large bandwidth and its performance is expected to be comparable to that of optical fiber network. Especially, 60 GHz (V-band) and 70 / 80 GHz (E-band) are expected to be candidates of this application. When configuration of mm-Wave wireless communication systems, substrates inside system are needed to be low loss due to its higher frequency. Liquid crystal polymer (LCP) has lower dielectric properties and similarity of features with those of polyimide which is used in application of flexible printed board so that LCP has advantages both in higher frequency operation and fabrication. In this paper, design and development of several kinds of mm-Wave devices with LCP substrate are described.

### 1. ま え が き

近年、IoTや高精細動画転送等の技術の進展によりデータの容量、速度は急激に増加しており、さまざまなユースケースに対応する上では光ファイバといった有線での通信だけでなく無線の高速大容量化が必須となる。ミリ波帯を用いた無線通信はその帯域幅の広さからこのような要求に対応できる技術として期待されている。とりわけ60 GHz（V-band）、70 / 80 GHz（E-band）は有力な候補とされており、多くの無線機器の開発がなされている<sup>1),2)</sup>。ミリ波は周波数が高いため伝搬損失が増大し、無線機器を構成する基板には低損失な材料を用いることが求められる。液晶ポリマー（LCP）は低誘電率な材料のため

高周波特性に優れており、またフレキシブルプリント基板（FPC）で主に用いられるポリイミド（PI）に幾つかの点で物性が類似していることから、既存の製造装置及び工程での製造条件を適用することが可能となり、コストの面でも優位性を持つため、ミリ波帯用高周波基板の有力な候補の一つである。本報告ではLCP基板を用いたミリ波デバイスの設計開発の事例を紹介する。

### 2. LCP基板のミリ波帯での応用

マイクロ波帯においてはFR-4やPIを基材とした基板が主に用いられている。だがミリ波帯においてはこれらの材料では誘電率及び誘電正接が大きく、システム全体の損失の増大を招く大きな要因となる。LCPは誘電率が2.91、誘電正接が $3.55 \times 10^{-3}$ であり、FR-4基板（誘電率4.1、誘電正接 $1.2 \times 10^{-2}$ ）やPI（誘電率3.5、誘電正接 $5.0 \times 10^{-3}$ ）に比べて低誘電率かつ低誘電損失である。

1 応用電磁気研究部  
2 応用電磁気研究部次長（工学博士）  
3 応用電磁気研究部部長フェロー（学術博士）  
4 開発部主席研究員

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
IoT	Internet of Things	あらゆるものをインターネットでつなげ、得られた情報を活用すること。
LTCC	Low Temperature Co-fired Ceramics	低温焼成セラミックのこと。
PTFE	Polytetrafluoroethylene	フッ素原子を含む樹脂のこと。
CTE	Coefficient of Thermal Expansion	熱膨張率のこと。
PWW	Post-Wall Waveguide	ポスト壁導波路。スルーホールで囲まれた壁面内側を伝搬する導波路。
FR-4	Flame Retardant Type 4	ガラス繊維を布状に編んだガラス織布にエポキシ樹脂を滲みこませ板状にしたもの。

図1はLCPとPIでマイクロストリップ線路を構成した場合の損失の周波数特性の比較を示している。基板厚はそれぞれ100 μmである。10 GHz以降の周波数帯では損失に大きな差が見られるようになり、LCP基板がPI基板に比べミリ波帯に適していることがわかる。

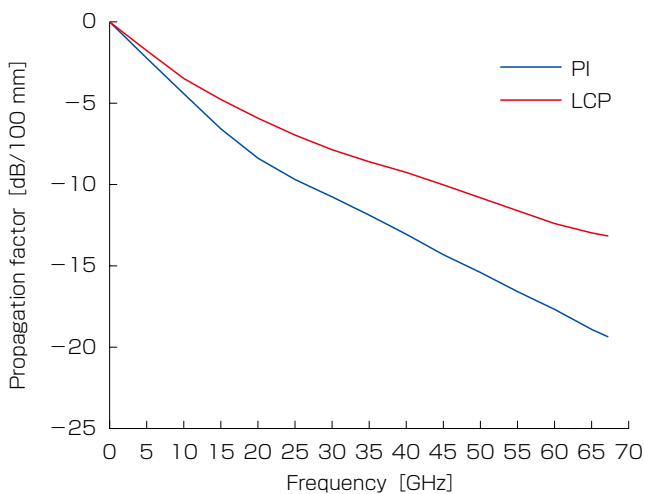


図1 PIとLCPにおけるMSLの損失の比較  
Fig. 1. Comparison of loss of MSL between PI and LCP substrate.

また、LCPの他にミリ波帯に適した材料としてLTCCやPTFE、石英ガラスといったものがある。表1は各種高周波材料の比較を示している。LTCCは低誘電損失のためミリ波デバイスを小型に構成できるものの、誘電率が高いもためそれに起因する誘電体損が大きく、配線の引き回しを長く取ることが困難となる。また焼成の工程での寸法変動を考慮する必要があるため、配線の寸法精度を出すための難易度が高くなる。更に大面積化に課題があり、その分がコストに反映される。PTFEは誘電率が2.1で誘電正接が $0.5 \times 10^{-3}$ と小さい為、LTCCやLCPより低損失なデバイスを構成できるが、PTFEは表面の粗化が困難でありメッキ時の密着性が低く信頼性の確保に課題がある。また、スルーホール形成時にバリが多く生じやすく、その点においても信頼性の確保に課題がある。石英ガラスは誘電損失がPTFEと同等となり低損失に構成が可能であるがミリ波帯では必須となるビアホール形成にフェムト秒レーザー照射等の加工方法が必要であり、低コスト化に課題が残る。LCPの誘電率はPTFEよりやや大きく、誘電正接ではPTFEや石英ガラスより劣るものの、LCPのCTEがCuの18 ppm/°Cに近く、吸水性が低いため、物性に起因する配線精度の劣化が少ない点でメリットがある。また、大面積化が容易であるとともにFPCで用いられるロール・ツー・ロールのプロセスでの量産化が期待できるため低コストにミリ波デバイスが構成できる。以上の点から、LCPはミリ波デバイスの基板材料として好適である。

### 3. ミリ波デバイスの開発

#### 3.1 マイクロストリップ-ポスト壁導波路モード変換器

マイクロストリップ線路は簡易な構成でありかつRFICとの接続性の高さから多く用いられるが、導体損失が大きいためミリ波帯では配線長を長く取ることが困難となる。ポスト壁導波路(PWW)は誘電損失が支配的となるため、基材が低誘電な材料であれば低損失な伝搬が実現される。ここではアンテナ・イン・パッケージに適したマイクロストリップ線路-PWWモード変換器について述べ

表1 各種高周波材料の比較  
Table 1. Comparison of features among several materials for higher frequency band.

	LTCC	LCP	石英	PTFE
$\epsilon_r$	5.9~9.1	2.91	3.8	2.1
$\tan \delta$	$4.0 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-3}$	$0.8 \times 10^{-3}$	$0.5 \times 10^{-3}$
CTE [ppm/°C]	6	0-40	0.4-0.5	40
加工性	○	◎	△	△
表面性	粗い	粗い	滑らか	滑らか
ワークサイズ	小	大	小	大

る<sup>3)</sup>。図2は開発したマイクロストリップ線路-PWWモード変換器を示している。本構造はマイクロストリップ線路を配置した25  $\mu\text{m}$ の層とPWWを形成している175  $\mu\text{m}$ の層をもつ多層LCP基板により構成され、60 GHz帯で動作するよう設計されている。多層構造とすることにより、マイクロストリップ線路とPWWは個々に最適化され、設計が容易となる。マイクロストリップ線路とPWWはビアホール近傍のアンチパッドによりモード変換され、基板下部に配置したレジストにより絶縁される。本構造はすべて貫通型のビアホールを用いており先行事例<sup>4)</sup>のようなブラインドビアホールによるモード変換構造を持たないため、安価な構成で実現できる特徴を持つ。図3は本構造のS-パラメータのシミュレーションと測定結果を示している。高周波シミュレーションには有限要素法シミュレータHFSS<sup>TM</sup>を用いている。シミュレーションと測定結果はおおむね一致しており、精度良く試作が行われていることがわかる。また、幾つかの長さのPWWを持つモード変換器を測定することにより単位長さ当たりの伝搬損失は0.12 dB/mmとなることが確認された。本構造は低コストでかつ、RFIC実装性と良好なアンテナ特性を両立し、アンテナ・イン・パッケージを実現しうる構造であると言える。

### 3.2 並列給電型マイクロストリップアレーアンテナ

アレーアンテナにはそのアンテナ素子への給電形態により直列給電型と並列給電型に大別される。直列給電の場合給電部からアンテナ素子までの経路が短く、高利得化が期待できるが給電部から個々のアンテナ素子への経路長が異なり、動作周波数によってアンテナ素子へ励振される位相が変化する。そのためアレー化した際の指向性のピークの角度が周波数依存性を持つ。並列給電型は給電部から個々のアンテナ素子への経路長が同一となる

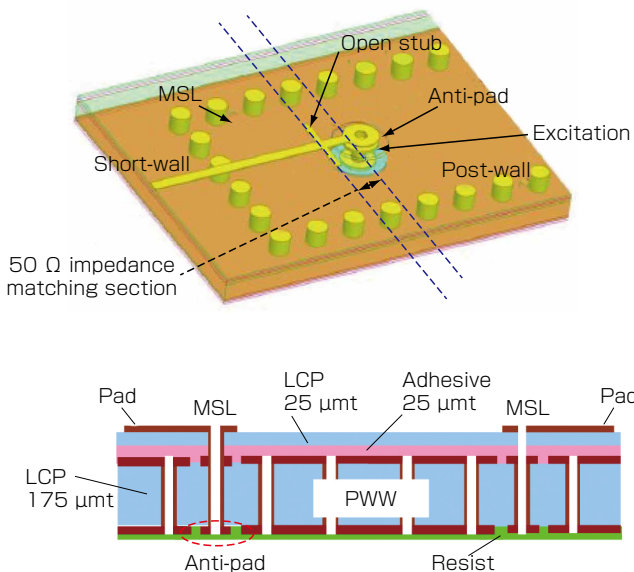


図2 MSL-PWWモード変換器

Fig. 2. Configuration of MSL-PWW mode converter.

構造となっているため、動作周波数によらず指向性のピークとなる角度は同一となる。とりわけ設置場所が固定される基地局等の用途が多いE-bandでは並列給電型は最適な構成であるといえる。図4はLCP基板を用いたE-band動作の並列給電型マイクロストリップアレーアンテナ

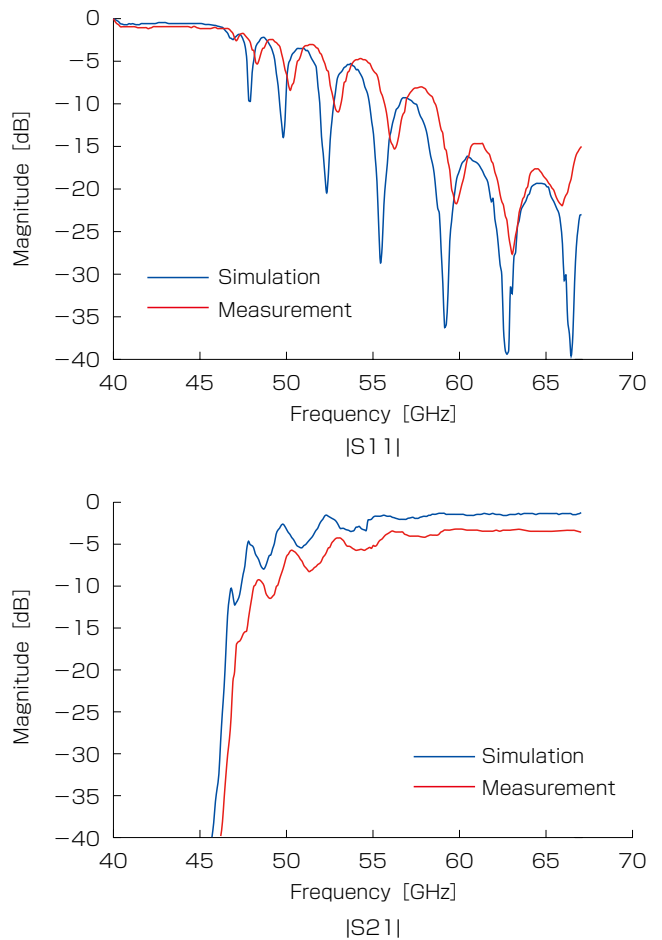


図3 S-パラメータのシミュレーションと測定結果  
Fig. 3. Calculated and measured S-parameters of MSL-PWW mode converter.

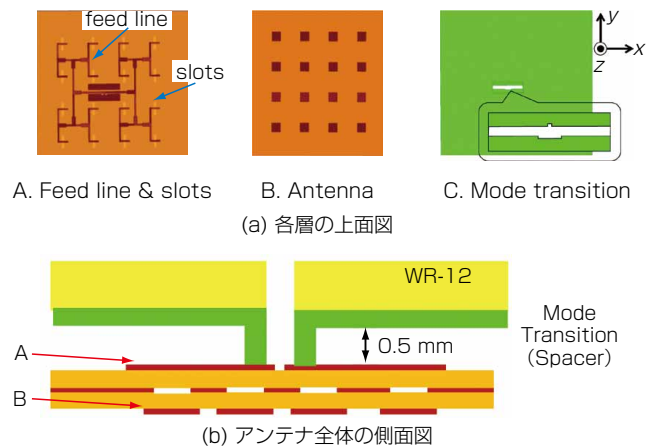


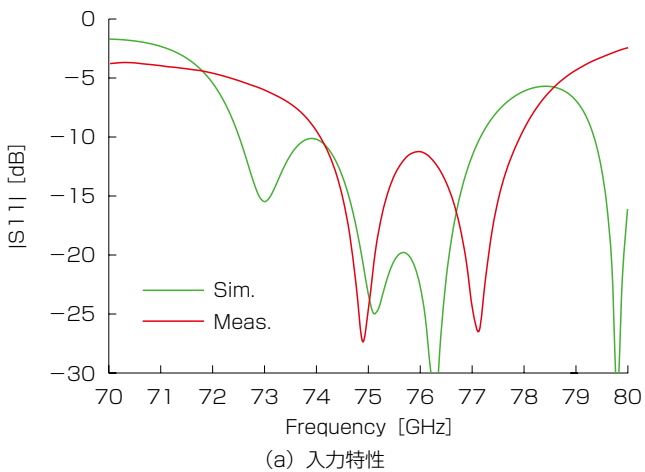
図4 並列給電型マイクロストリップアレーアンテナ  
Fig. 4. Corporate-feed microstrip array antenna.

ナを示している<sup>5)</sup>。本アンテナは給電部とアンテナ部を個々の層に配置された多層LCP基板により構成されており、外部の給電回路からアンテナの給電層へは矩形導波管で給電される。また、本構造は低域のE-bandを動作帯域として設計されているため、図4(b)のようにWR-12を外部給電用の導波管として用いている。給電部からアンテナ部へは多層基板中間部に設けたグラウンド層のスロットより開口結合を用いて励振される。これによりミリ波帯のような高い周波数で問題となるアンテナ特性への給電線路の影響を軽減している<sup>6)</sup>。また、図4(a)-(b)に示すとおり、給電導波管とアンテナの間には金属のスペーサが配置されており、導波管とアンテナとの離間距離および基板と接続する際の開口の形状を最適化することにより広帯域動作が実現される<sup>5)</sup>。図5は並列給電型マイクロストリップアレーアンテナの入力特性と放射特性を示している。入力特性はシミュレーションと測定結果の比較を示しており、おおむね一致していることが確認されるとともにE-bandの低域全体(71-76 GHz)における良好な動作が確認された。放射特性は74, 75,

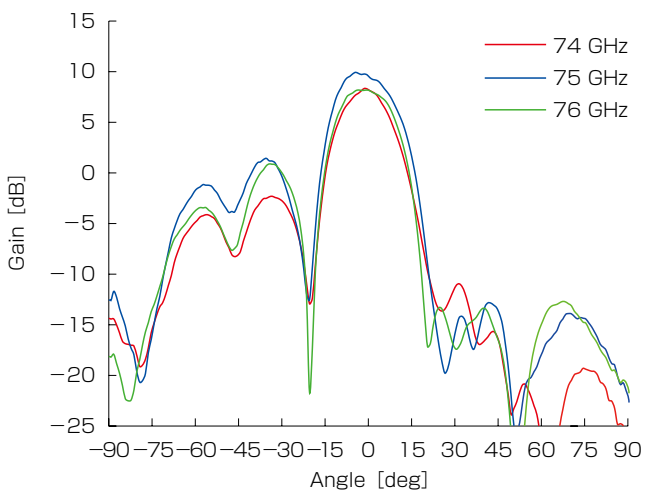
76 GHzにおける測定結果を示している。いずれの場合においても天頂方向に放射特性のピークが見られており、並列給電型の効果が確認された。また、いずれの周波数においても10 dBi程度の最大利得が得られた。ここではE-bandに適した多層平面アレーアンテナの提案構造を紹介した。

3.3 多層周波数選択板によるバンドパスフィルタ

誘導性と容量性をもつ周期的なパターンが形成された基板(周波数選択板)を多層化することにより、空間型バンドパスフィルタや平面レンズを構成することが可能となり、アンテナ単体では得られないような高利得化やビームフォーミング制御を実現することが可能となる。とりわけミリ波帯においては先に述べたとおり広帯域域かつ低損失な動作が求められる。図6は多層LCP基板による周波数選択板を用いたバンドパスフィルタの構成を示している<sup>7)</sup>。LCP基板は誘導性をもつ配線パターンが形成されたL層と容量性をもつ配線パターンが形成されたC層からなり、60 GHz帯で動作するよう設計されている。L層は4層、C層は6層となっており、総厚さは250  $\mu\text{m}$ となる。L層とC層には方向の異なるストリップが形成されており、その寸法は所望のフィルタの周波数応答から算出された回路定数より決定される。図7は本構造のシ



(a) 入力特性



(b) 放射特性

図5 並列給電型マイクロストリップアレーアンテナの入力特性と放射特性  
Fig. 5. Input and radiation characteristics for corporate-feed microstrip array antenna.

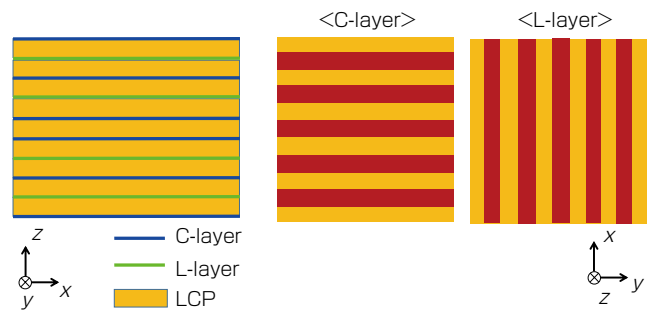


図6 多層周波数選択板によるバンドパスフィルタ  
Fig. 6. Configuration of band-pass filter with frequency selective surface.

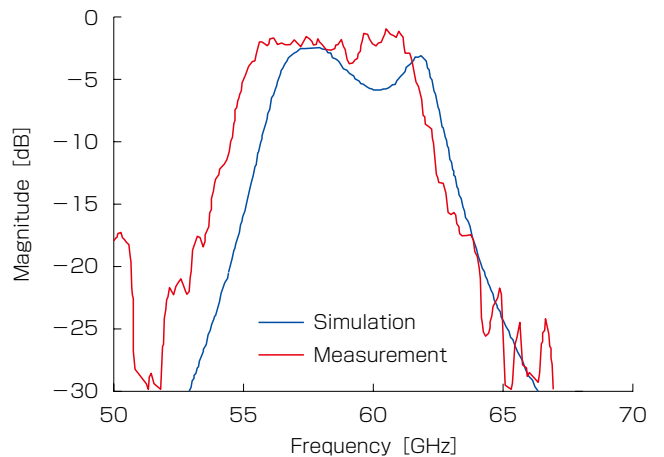


図7 バンドパスフィルタの透過特性  
Fig. 7. Transmittance characteristics for band-pass filter.

シミュレーションと測定の透過係数の周波数特性の比較を示している。透過特性の測定の際にはホーンアンテナを対向させて測定を実施した。シミュレーションと測定結果はおおむね一致しており、6.5 GHzの透過帯域が得られたことを確認した。LCP基板を10層積層した周波数選択板においても、実用しうる構造が実現できることを試作により示した。

#### 4. む す び

本報告では、LCP基板を用いた各種ミリ波デバイスの設計、試作及び評価について報告を行った。LCP基板は低誘電損失な基材であり、大面積化やロール・ツー・ロールによる低コスト化が期待できるという特徴を持つ。LCP基板を用いることにより、RFIC実装およびアンテナとの統合化に適したマイクロストリップ-ポスト壁導波路モード変換器を提案した。また、測定評価により精度良く試作が行われたことが示すとともにLCP基板の伝搬損失を明らかにした。並列給電型マイクロストリップアレーアンテナは多層化および外部給電回路との接続構造を最適化し、広帯域動作および良好な放射特性が得られることを

試作アンテナにより実証した。また、多層周波数選択板によるバンドパスフィルタの設計、試作および評価を行い、所望の広帯域なフィルタの特性が得られることを確認した。以上により、LCP基板をベースとしたミリ波デバイスの可能性を示した。

#### 参 考 文 献

- 1) URL : [http://www.ieee802.org/11/Reports/tgad\\_update.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/tgad_update.htm),
- 2) J. Wells, "Multigigabit wireless technology at 70 GHz, 80 GHz and 90 GHz,"
- 3) Y. Uemichi, et al : IEICE Trans, Electron., vol, E97-C, no.10, pp.941-947, 2014,
- 4) T, Kai, et al. : IEICE TRANS. COMMUN., VOL. E89-B, NO.5 MAY 2006,
- 5) 細野ほか, 信学会総合大会, B-1-87, (2017).
- 6) D, Liu, et al. :Advanced millimeter-wave technologies, John Wiley & Sons Ltd., 2009, pp.177-179,
- 7) 長谷川ほか, 信学会総合大会, C-2-68, (2017).