

60 GHz帯におけるマイクロストリップ線路とLCP基板を用いたフレキシブルなポスト壁導波路間のモード変換

東京工業大学 広川二郎¹・安藤真¹
光電子技術研究所 上道雄介²・細野亮平²・官寧³
新規事業推進センター 岡本誠裕⁴・板橋敦⁴

A 60 GHz Mode Transition between Microstrip Line and Flexible Post-Wall Waveguide on Liquid Crystal Polymer Substrate

J. Hirokawa, M. Ando, Y. Uemichi, R. Hosono, N. Guan, M. Okamoto, and A. Itabashi

ミリ波帯を利用したGbpsを越える高速大容量無線通信が可能になりつつある今日、60 GHz帯で動作する無線通信機器は重要性を増している。ミリ波帯において無線通信装置を構成するための要素技術として、LCP基板を用いたマイクロストリップ線路とポスト壁導波路間のモード変換器を実現した。ポスト壁導波路の伝送損失は60 GHzにおいて0.09 dB/mm、モード変換に関わる損失は0.6 dBであった。

Wireless devices operating at 60 GHz band are becoming more and more important these days because high-speed communications exceeding a few Gbps are becoming available. As an elemental technology for 60 GHz-wireless devices, we realized a transformer between microstrip line and post-wall waveguide on a LCP substrate. Transmission loss of the post-wall waveguide and the loss associated with the mode transition are 0.09 dB/mm and 0.6 dB at 60 GHz, respectively.

1. ま え が き

ミリ波帯を利用した数Gbpsの高速大容量通信が提案され一部実現されつつあり、60 GHz帯で動作する無線通信機器はより重要性を増している。日本国内では59 GHz～66 GHzという7 GHzにも渡る広い周波数帯域が免許不要で開放されており、ミリ波帯を利用した無線通信の民生分野への普及が期待されている。それを実現するためには通信ICとアンテナ素子間を低損失な導波路で接続する必要がある。図1はこれを示す概念図である。また、通信ICからの出力信号はマイクロストリップ線路等のRF平面回路を経由するため、RF平面回路と導波路間のモード変換器が必要となる。モバイル機器等に搭載するためには、導波路を含むこれらの部品には低背化が求められる。今回、LCP（液晶ポリマー）基板を用いてマイクロストリップ線路と導波路基板間のモード変換器を実現したので、結果を報告する。

2. ポ ス ト 壁 導 波 路 と モ ー ド 変 換 器

従来の金属加工による高価で大体積を占める矩形導波管部品の代替手段として、プリント基板技術を用いたポスト壁導波路（PWW：Post-wall waveguide）が、ミリ波帯における無線通信装置を実現するアンテナ・イン・パッケージの実現手段として研究されている¹⁾²⁾³⁾。マイクロストリップ線路等のRF平面回路から導波路へ信号を導くためには、マイクロストリップ線路の伝搬モードから導波路の伝搬モードであるTEモードへ伝搬モードを変換させる必要がある。文献2では導波路内へTEモードを励振するための励振手段として、開放ビア型、

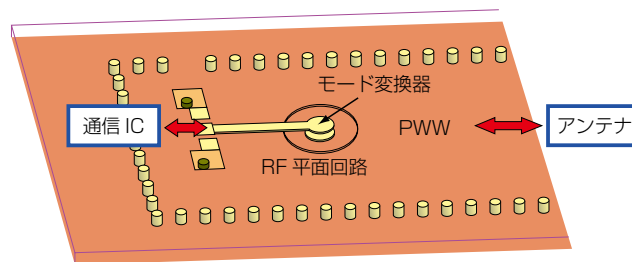


図1 通信ICとアンテナ間の接続概念図
Fig. 1. Conceptual sketch of the connection between communication IC and antenna.

1 東京工業大学大学院 電気電子工学専攻
2 応用電磁気研究室
3 応用電磁気研究室フェロー室長
4 メディカル事業推進室 技術部

略語・専門用語	正式表記	説明
LCP	Liquid Crystal Polymer	液晶ポリマー
PWW	Post-Wall Waveguide	ポスト壁導波路
De-embedding	De-embedding	測定結果から埋め込まれているDUT（被測定物）の特性を取り出すこと

貫通ショートスルーホール型，スルーホールのショート端部を階段状にするショートステップ型の検討がされている．動作帯域を考えるとショートスルーホール型は狭帯域となるため，好ましくない．一方，開放ビア型は原理的には広帯域化に適しているが，ブラインドビア内部に導体形成が難しい．ショートステップ型も広帯域化に適しているが，特殊な基板加工が必要で低コスト化に難があるという問題があった．

そこで，われわれはブラインドビアを形成する工程に導電性ペーストを基板の凹部へ充填し，開放端ビア型の励振構造を実現する方式を提案する．導波路基板に低背化を求めたことに起因し，限定的な空間でモード変換を実現しなければならないため，設計に特別な配慮を行った．図2に提案するマイクロストリップ線路／ポスト壁導波路間のモード変換器の構造を示す．図3に製作したモード変換器のX線写真を示す．モード変換器はPWW内部に設

けられており，TE₁₀モードとTE₂₀モードのカットオフ周波数がそれぞれ44.4 GHzと88.8 GHzとなるように，PWWの幅は2.0 mmに設定した．ポスト径とピッチは導波路外への電磁界の漏えいが抑えられるよう，それぞれ100 μmと200 μmとした．導波路基板の厚みは100 μmとした．PWW内のブラインドビアの長さは製造性を考え，導波路基板厚みの半分とした．ブラインドビアと導波路上部の広壁間にはリング状のアンチパッドが設けられている．上部のマイクロストリップ線路構造と下部のPWWは接着材を介して積層されており，ブラインドビアとマイクロストリップ線路端部に設けられたランドは導電性のペーストビアで接続されている．

本モード変換器はすべてLCP基板上に形成している．LCPはマイクロ波帯からミリ波帯まで優れた電気特性と低い吸湿特性を持ち，大面積での加工が可能なことから，低コストな高周波機能素子集積基板あるいは高周波パッケージ材料として注目を集めている⁴⁾．

また，マイクロストリップ線路のGND（グラウンド）層とPWWの導波路上部広壁は同じ導体層で共有されている．マイクロストリップ線路の端部ランド構造から導波路内部を覗き込んだ場合における入力インピーダンスが50 Ωよりも小さいため，入力インピーダンス整合を行う必要がある．これはマイクロストリップ線路の位相回転とマイクロストリップ線路端部に設けられた開放スタブで実現した．さらに，このインピーダンス整合された構造とGSG（GND Signal GND）パッド間に別の整合手段が取られている．これは幅の狭いストリップでインピーダンス整合を実現している．

図4はモード変換器断面の電界分布の概念を示す．

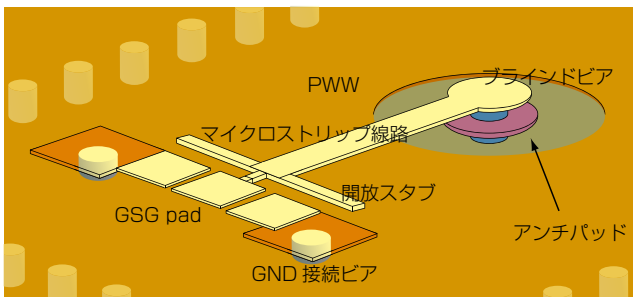


図2 提案するマイクロストリップ線路 / PWW変換器
Fig. 2. Proposed MSL / PWW transformer.

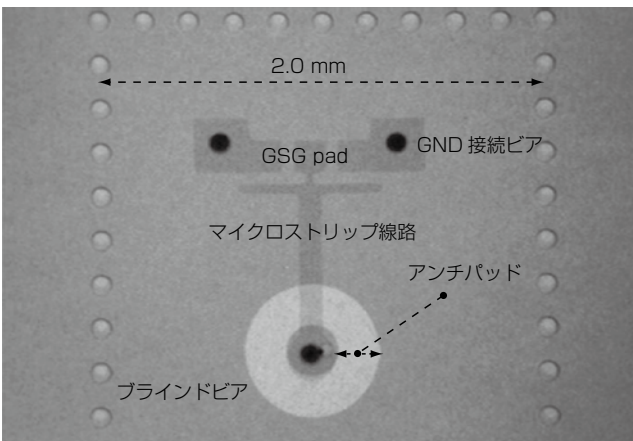


図3 製作したモード変換器のX線写真
Fig. 3. X-ray image of fabricated transformer.

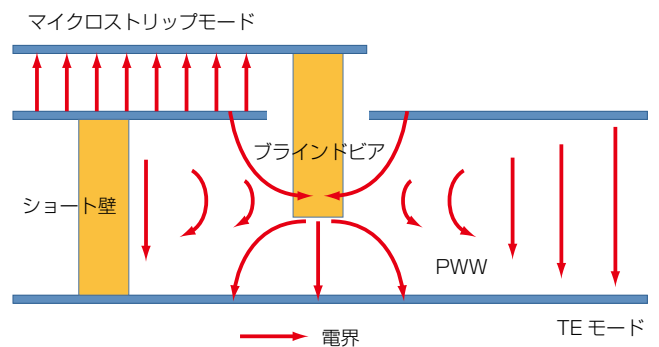


図4 モード変換の原理図（電界分布）
Fig. 4. Sketch of mode-transition principle.

電界分布は、マイクロストリップラインのモードからブラインドビアを介し、導波路の基板厚み方向に電界分布を有するTEモードへと変化しており、結果としてモード変換器として動作することを示している。なお、従来のモード変換器と比較して、導波路の基板厚みが $100\ \mu\text{m}$ と薄いため、電磁界が急激に変化しつつも動作帯域が確保されているのが本モード変換器の特徴となっている⁵⁾⁶⁾。

3. モード変換器の評価

図5は、モード変換器を評価するために製作したPWW-TEG (TEG: Test Element Group) の断面図である。入出力部にそれぞれモード変換器とマイクロストリップ線路、プロービング測定のためのGSGパッドを備える。入出力二つのモード変換器間の距離は $8.8\ \text{mm}$ 、マイクロストリップ線路の長さは $0.85\ \text{mm}$ である。散乱行列の測定はネットワークアナライザ (Agilent N5247A) を用いて行った。図6は $8.8\ \text{mm}$ PWW-TEGの反射係数 $|S_{11}|$ の周波数特性の測定結果と電磁界シミュレーション結果の比較を示す。実測結果とシミュレーション結果は非常に良い一致を示し、提案する本デバイスの良好な設計性を示している。反射係数が $-15\ \text{dB}$ 以下となる帯域は $5.6\ \text{GHz}$ であった。

図7は $8.8\ \text{mm}$ PWW-TEGの透過係数 $|S_{21}|$ の周波数特性の測定結果と電磁界シミュレーション結果の比較

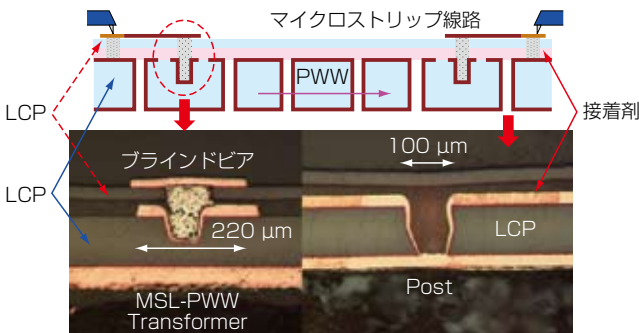


図5 評価サンプル (PWW-TEG) の断面図
Fig. 5. Cross-sectional sketch of PWW-TEG.

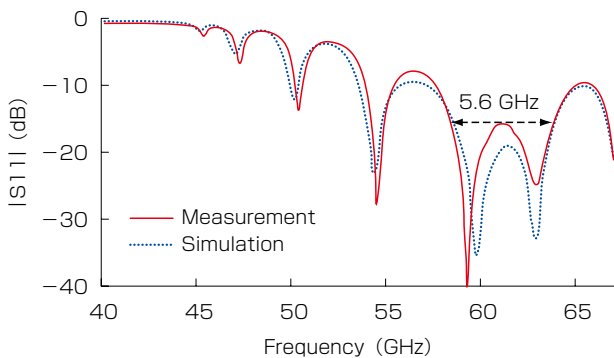


図6 $|S_{11}|$ の実測結果とシミュレーション結果の比較
Fig. 6. Measured and simulated results of $|S_{11}|$.

を示す。60 GHzにおいて $|S_{21}|$ は $-2.6\ \text{dB}$ であった。また、PWWの伝送損失を見積もるために、異なる導波路長を持つ複数のPWW-TEGを用意し測定を行った。図8に長さ L と $|S_{21}|$ の関係を示す。なお、 $|S_{21}|$ は $|S_{11}| < -20\ \text{dB}$ となる周波数において観測した値を採用している。また線形の近似式をグラフに示す。傾きはPWWの単位長さあたりの損失を示し、60 GHzにおいて $0.09\ \text{dB/mm}$ となる。

モード変換の損失を見積もるために図9に示す長さ $6.4\ \text{mm}$, $12.8\ \text{mm}$ のマイクロストリップ線路TEGを準備し、各々の散乱行列を演算処理することで、 $8.8\ \text{mm}$ PWW-TEGにおけるマイクロストリップ線路の損失を $0.13\ \text{dB/mm}$ と見積もった。図10は長さ $6.4\ \text{mm}$ のマイクロストリップ線路における透過係数 $|S_{21}|$ のDe-

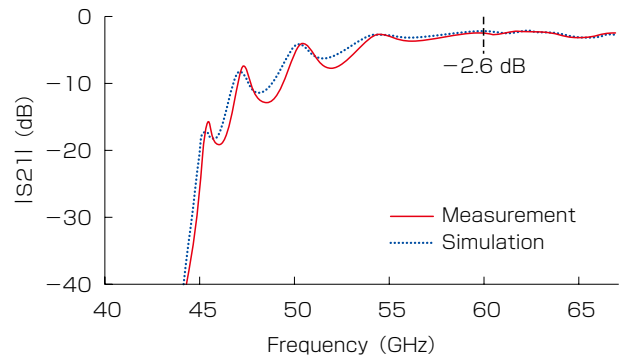


図7 $|S_{21}|$ の実測結果とシミュレーション結果の比較
Fig. 7. Measured and simulated results of $|S_{21}|$.

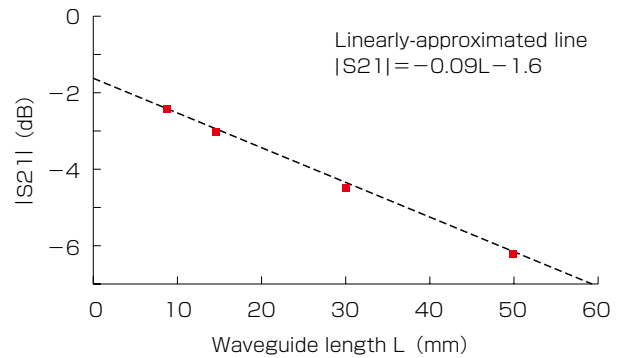


図8 導波路長と $|S_{21}|$ の実測結果の関係
Fig. 8. Relationship between measured $|S_{21}|$ and waveguide length.

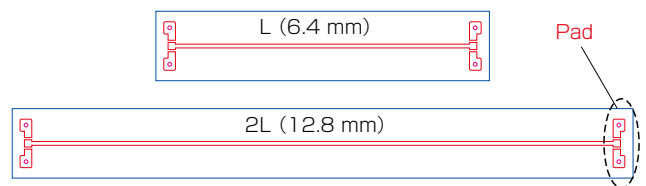


図9 損失の解析に用いたマイクロストリップ線路TEGのレイアウト
Fig. 9. Sketch of the proposed millimeter-wave module.

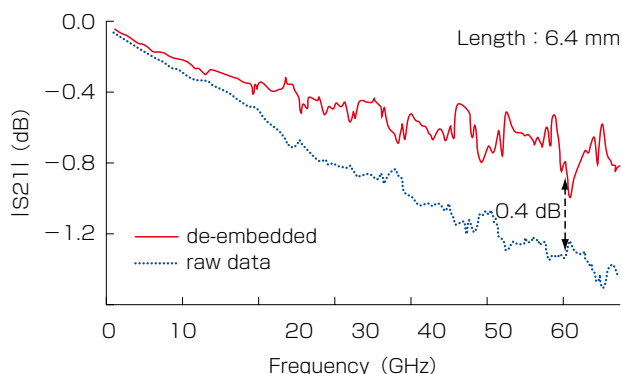


図10 マイクロストリップ線路TEGの $|S_{21}|$ におけるDe-embedding前後の比較

Fig. 10. Comparison of $|S_{21}|$ for de-embedded and raw data.



図11 導波路曲げに対するミリ波伝送評価系
Fig. 11. Measurement setup for bended PWW.

embedding処理前と後の比較を示している。60 GHzにおいて両者の差は0.4 dBであり、これがパッドの損失入出力2個分に相当すると考えられる。なお、De-embedding前と後で反射係数は $|S_{11}| < -25$ dBを満たしていることを確認した。これらの結果から、モード変換に関わる損失を見積もると、0.6 dBとなった。

さらに、PWW-TEGの曲げに対する影響に関しても調査を行った。図11は測定の設定アップを示す。測定に用いたPWW-TEGの長さは3 cmであり、曲げの半径は約5 mmとした。図12は3 cm PWW-TEGの曲げ前後での透過係数の比較である。両者間で殆ど周波数特性に差がないことが分かる。この結果は、今回開発したモード変換器およびPWWの一体構造のフレキシブルな応用可能性を示唆している。

4. む す び

現実的な低コストミリ波無線通信装置の実現を念頭に、われわれはLCP基板を用いてマイクロストリップ線路とPWW間のモード変換器を提案し動作を実証し

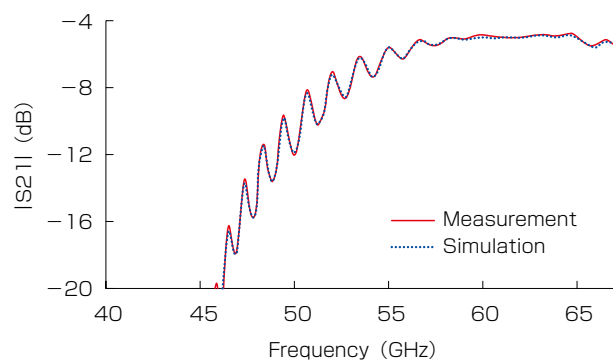


図12 PWW-TEGの $|S_{21}|$ に対するサンプル曲げの効果
Fig. 12. Measured $|S_{21}|$ on bending-effect.

た。マイクロストリップ線路とPWWの一体構造は、導波路1層とマイクロストリップ構造1層の計2層からなり、シンプルな構成が特徴である。さらに、モード変換器を含むPWW構造のシミュレーション結果と実測結果は非常に良い一致を示し、高い設計性を実証した。また、開放端ビアとマイクロストリップ線路、開放スタブの組み合わせによる100 μ m厚という薄い導波路基板への50 Ω 入力インピーダンス整合を初めて実現した。モード変換に関わる損失とPWWの伝送損失は、それぞれ0.6 dBと0.09 dB/mmであった。

参 考 文 献

- 1) R. Suga, et al., "Lateral radiation millimeter-wave antenna package using post-wall waveguide," *IEEE Int. Symp. on Antenna Propagat.*, Session 311, June 2009.
- 2) T. Kai, et al., "A coaxial line to post-wall waveguide transition for a cost-effective transformer between a RF-device and a planar slot-array antenna in 60-GHz band," *IEICE Trans. COMMUN.*, E98-B, no.5, pp. 1646-1653, May 2006.
- 3) R. Suga, et al., "Cost-effective 60-GHz antenna-package with end-fire radiation from open-ended post-wall waveguide for wireless file-transfer system," *2010 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 58, pp. 3989-3994, Dec. 2010.
- 4) M. Swaminathan, et al., "Polymers for RF apps," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 12, no. 7, pp. 62-77, Dec. 2011.
- 5) 上道ほか：信学会総大，C-2-61，March 2013.
60 GHz帯におけるマイクロストリップ線路とLCP基板を用いたフレキシブルなポスト壁道波路間のモード変換
- 6) Y. Uemichi, et al., "A millimeter-wave transformer between microstrip line and flexible post-wall waveguide on liquid crystal polymer substrates," *2013 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, TH3E-1, June 2013.