

5 G通信向け 低損失・狭帯域な28GHz-帯域通過フィルタ

電子応用技術R&Dセンター

国立大学法人広島大学大学院先進理工系科学研究科

上道 雄介¹・土谷 信之介²・韓 旭³
額賀 理⁴・官 寧⁶
天川 修平⁵

Narrow-Band and Low-Loss Bandpass Filter for Quasi Millimeter-wave 5G Application

Y. Uemichi, S. Tsuchiya, X. Han, O. Nukaga, S. Amakawa, and N. Guan

28 GHzの高性能な2 GHz帯域幅（比帯域幅7%）を持つ狭帯域で低損失な帯域通過フィルタ（BPF）を第5世代通信（5G）用途として初めて開発した。フィルタは合成石英ガラスで構成されたポスト壁からなる円柱状の共振器で構成されており、使用した合成石英ガラスの誘電正接は44 GHzにおいて0.00036である。製作した帯域通過フィルタの大きさは $11 \times 10 \text{ mm}^2$ 、入出力構造を含まない挿入損失は0.5～0.8 dBであった。開発したガラス導波路の入出力構造についても述べる。

A 28-GHz bandpass filter (BPF) with a 2-GHz bandwidth (7% fractional bandwidth) built of silica-based post-wall waveguide (PWW) is presented for 5G-applications. The filter is composed of 5 cylindrical resonators. The dielectric loss-tangent of the substrate is as low as 0.00036 at 44 GHz. The dimensions of the BPF is $11 \times 10 \text{ mm}^2$. The insertion loss of the BPF, not including I/O interfaces for probing measurement, is less than 0.8 dB. Design of I/O interfaces for the BPF is also presented.

1. ま え が き

近年、5G通信（第5世代移動通信）が6 GHz以下の周波数帯域で実用化されており、将来的には準ミリ波帯である28 GHz、39 GHzの周波数帯でも実用化される見込みである。一方、第4世代移動通信で主流であったSAWフィルタやBAWフィルタといった音響モードフィルタの活用は準ミリ波帯やミリ波帯では実現が難しく、分布定数線路や導波路構造等のほかの技術活用が必要となると考えられる。しかしながら、準ミリ波帯で動作するフィルタの報告例はごく限られたものである^{1), 2)}。さらに、帯域幅が2 GHz以下である狭帯域な28 GHz帯のバンドパスフィルタ（Bandpass filter: BPF）はまだ報告されていないように思われる。低損失で急峻なフィルタ特性を実現するには高い Q を持つ共振器を実現できるきわめて低損失な材料が必要であり、狭帯域な特性を実現するにはこれに加えてきわ

めて高い製作精度が要求される。これらを実現する材料、技術として合成石英ガラスを用いたポスト壁導波路技術（PWW: Post-wall waveguide）はミリ波帯において最も有望な解決策であると考えている。これまで合成石英ガラスを用いたPWWの潜在可能性を60 GHz帯やE-bandといったミリ波周波数帯で示し、有用性を報告してきた^{3) 4) 5) 6) 7) 8)}。今回、合成石英ガラスを用いたPWWの有用性を準ミリ波帯で検証し、かつ報告がなされていない帯域幅2 GHzの狭帯域な28 GHz帯BPFの実現を試みた。

2. ガラス導波路と入出力構造

PWWおよびBPFをプローブ測定で評価するために入出力構造が必要となる。PWWを構成する材料として合成石英ガラスを選択した。44 GHzでの比誘電率と誘電正接の測定結果はそれぞれ3.82, 0.00036である。導波路幅は4.0 mmとした。ポスト壁を形成するスルーホール径はそれぞれ $100 \mu\text{m}$ 、間隔は $200 \mu\text{m}$ である。ガラス基板の厚みは $860 \mu\text{m}$ とした。図1はPWWへの信号入出力構造の概念図を示している。PWW内にドミナントな導波モード（ TE_{10} ）を励振するためにブラインドビアを用いている⁹⁾

1 5G無線デバイス開発部 主席研究員
2 高周波基板開発部 アソシエイト
3 広帯域無線システム開発部 アシスタントマネージャー
4 高周波基板開発部 グループ長
5 国立大学法人広島大学大学院先進理工系科学研究科 量子物質科学プログラム 准教授
6 5G無線デバイス開発部 部長・フェロー（学術博士）

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
PWW	Post-Wall Waveguide	ポスト壁導波路：プリント基板の製造技術で実現される低コスト・低背・軽量の導波路構造
5G	第5世代移動通信	IMT-2020の規定を満たす通信システム 高速大容量、低遅延、多数同時接続を特徴とし、 6 GHz未満の帯域（sub 6）と準ミリ波帯の周波数帯域を活用する
SAWフィルタ	Surface Acoustic Wave filter	表面弾性波フィルタ
BAWフィルタ	Bulk Acoustic Wave filter	バルク弾性波フィルタ

^{10) 11)} 基板厚み 860 μm のPWWにおいて広帯域な動作に必要なブラインドビアの深さは 600 μm ~ 700 μm と見積もられる。しかしながら、スルーホール径が100 μm であるため、ブラインドビアのアスペクト比が6 ~ 7と大変高い値になってしまい、製造歩留まりを悪化させる要因となる。

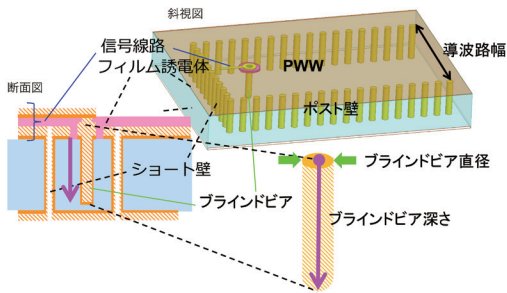


図1 PWW入出力構造の概念図
Fig. 1. I/O interface for PWW.

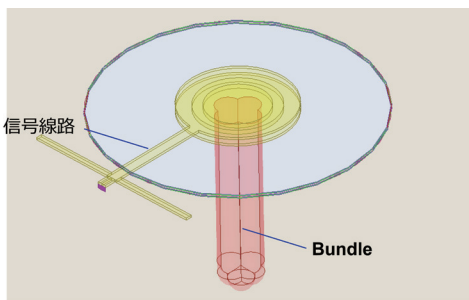


図2 ブラインドビアのBundle構造

Fig. 2. Proposed I/O interface by a bundle of 5 blind-vias.

そこで今回、ひとつのブラインドビアを用いる代わりにブラインドビアの5本の束（以下、Bundle）を用いることを考えた。図2に考案したBundleの斜視図の拡大図を示す。Bundle周囲の上部導波路広壁には半径 550 μm の開口が設けられている。Bundle上端の円形ランドからは信号線（ストリップ）が延伸され、大部分は開口上に配置される。ストリップの端部には入力インピーダンス 50 Ω

整合のために開放スタブが装荷される。図3にBundleの上面図と断面図を示す。5本のブラインドビアが4回回転対称性を持つように配置されており、中央のブラインドビアの深さを 775 μm 、周辺の4つのブラインドビアの深さを 725 μm に設計した。本入出力構造により、IC等の平面回路と立体回路であるPWWの接続が可能となる。

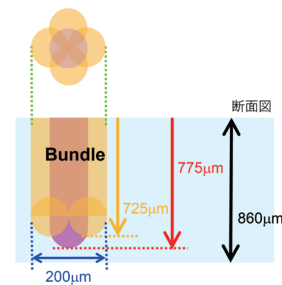


図3 Bundle構造の上面図（上）、断面図（下）

Fig. 3. A designed bundle of 5 blind-vias for TE₁₀ excitation.

3. 入出力構造の製作とガラス導波路の評価

図4に製作したBundleの斜視図を示す。Bundleから延伸されたストリップの終端にはプローブ評価のためのGround-Signal-Ground (GSG) パッドを備えている。

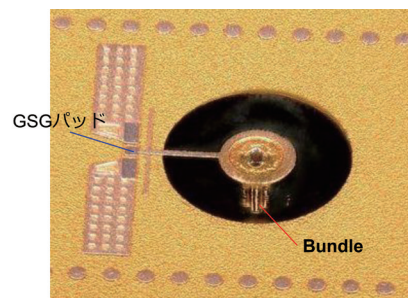


図4 製作したBundle入出力構造（斜視図）

Fig. 4. Fabricated blind-vias based I/O interfaces.

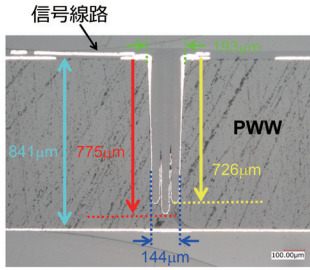


図5 製作したBundle入出力構造 (断面図)

Fig. 5. Cross-sectional side view of the fabricated blind-vias based I/O interfaces.

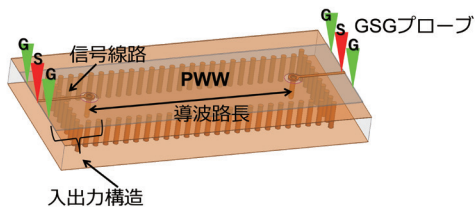


図6 PWW評価サンプルの概念図

Fig. 6. Test structure of PWW.

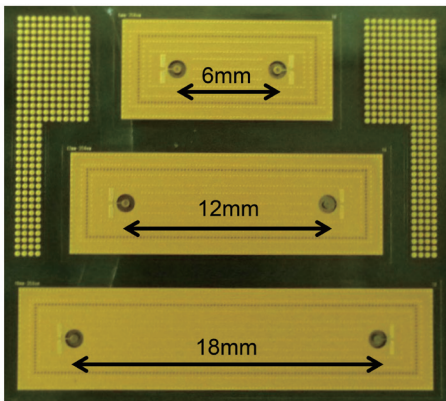


図7 製作したPWW評価サンプル

Fig. 7. Fabricated test structures of PWW.

図5に断面図を示す。Bundleの先端が5本に分裂しており、意図した設計と異なることがわかる。さらに基板厚み860 μm の設計値に対して、製作で用いた基板は19 μm 薄いことが判明した。次に、製作したBundleとガラス導波路をプローブ測定で評価するために準備した評価サンプルの概念図を図6に示す。導波路の入出力部にBundleおよびGSGパッドをそれぞれ備えており、2 portのGSGプローブでの評価が可能となっている。図7は製作した評価サンプルの上面図である。二つのBundle間の距離を導

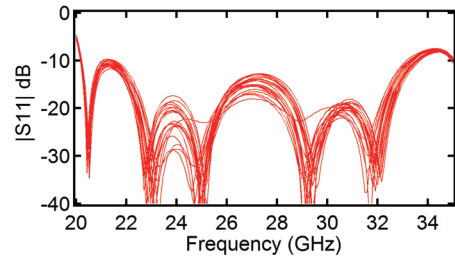


図8 導波路長6 mmのPWW評価サンプルの|S11|の評価結果

Fig. 8. Measured |S11| of 6 mm- PWW with blind-vias based I/O interfaces.

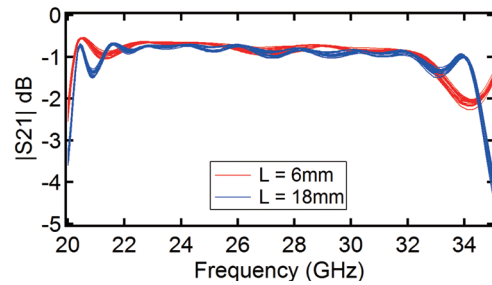


図9 導波路長6 mmと18 mmのPWW評価サンプルの|S21|の評価結果

Fig. 9. Measured |S21| of 6 mm- and 18 mm-PWW with blind-vias based I/O interfaces.

波路長と定義する。準備した評価サンプルは導波路長6 mm, 12 mm, 18 mmの3水準である。図8に測定した20個の導波路長6 mmの評価サンプルの反射係数の周波数特性を示す。製作した評価サンプルのBundleや基板厚みが意図した設計と異なるにも関わらず、22 GHzから32 GHzまで良好な反射特性と高い再現性、歩留まりを示しており、5 G通信に割り当てられる準ミリ波周波数帯域24 ~ 30 GHzを十分に満足することがわかる。図9は測定した導波路長6 mmと18 mmの評価サンプルの透過係数の周波数特性である。一般的には6 mm, 12 mm, 18 mmと線路長が長くなるにつれて通過損失の増加が見込まれるため、横軸に線路長、縦軸に通過損失としてプロットし、線形フィッティングした際の線形式の傾きから単位長さあたりの伝送損失、切片からそれ以外の入出力部に関わる損失を見積もることができる^{9) 10)}。しかしながら今回、図9に示すように28 GHz帯ではガラス導波路の伝送損失が非常に小さいために導波路長6 mm, 18 mmにおける通過損失の差を測定で識別することは困難であった。仮に導波路長6 mm, 18 mmの評価サンプルの導波路の単位長さあたりの損失を0と仮定すると、製作したBundleを含む入出力構造の損失は0.4 dB/個と見積もることができる。

4. 帯域通過フィルタの設計と評価

28 GHz帯の帯域通過フィルタの設計に関して、これまでに報告がなされていない帯域幅 2 GHzの狭帯域フィルタ設計を試みた。文献¹²⁾によると帯域通過フィルタの挿入損失は比帯域 (Fractional bandwidth : FBW) に反比例することが述べられている。したがって、帯域幅が狭ければ狭い程、フィルタの挿入損失は大きくなるため、高性能なフィルタの実現が難しくなるということが言える。狭帯域でかつ低い挿入損失を実現するには共振器の Q を高くする必要があり、したがって狭帯域なフィルタを実現するには使用する材料の選定がきわめて重要である。設計は共振器段数 5 段、リップル 0.5 dBを持つチェビシェフ特性を有する共振器直結型の帯域通過フィルタとした。通過帯域幅を 27.5 GHzから 29.5 GHzの 2 GHzに設定した。この場合、比帯域 (FBW) は 7%である。プロトタイプローパスフィルタの素子値を $g_1 = g_5 = 1.7058$, $g_2 = g_4 = 1.2296$, $g_3 = 2.5408$ とした。これにより i 番目と j 番目の共振器間の結合係数 m_{ij} は $m_{12} = m_{45} = 0.0485$, $m_{23} = m_{34} = 0.0397$, 外部 Q は 24.3となる。図 10 は考案したフィルタの構成図である。ポスト壁による 5 つの円柱共振器が対称に配置されており、 m_{ij} の調整は各円柱の中心間距離を調整することで行っている。結合係数を設計値どおりになるように中心間距離を調整すると各共振器の共振周波数が変わって

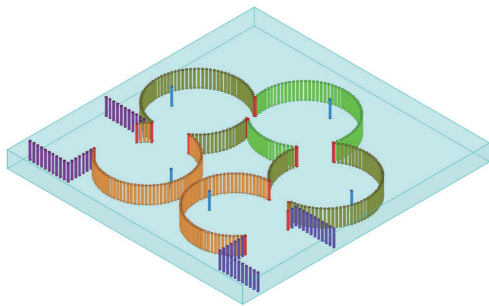


図 10 提案した帯域通過フィルタの構成

Fig. 10. Proposed geometry of bandpass filter.

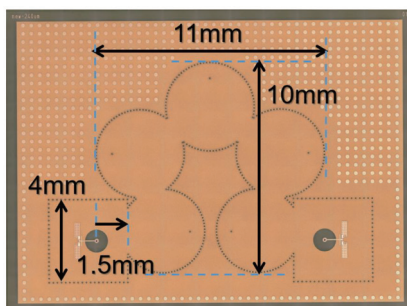


図 11 製作した帯域通過フィルタ

Fig. 11. Fabricated bandpass filter.

しまい、そのため後に各共振器のサイズを再調整しなければならないという共振器直結型のフィルタには潜在的な設計課題があるが、これは各円柱共振器の内側にスルーホールを配置させ、スルーホールと円柱ポスト壁間の距離を調整することでこの問題を解決した¹³⁾。これによりフィルタを構成する各々の円柱共振器の半径をほぼ同じ値 (約 2 mm) に設定することが可能となった。図 11 は製作したフィルタの写真 (上面図) である。1 番目と 5 番目の共振器にととも近い位置に入出力構造が設けられていることがわかる。フィルタ本体のサイズは $11 \times 10 \text{ mm}^2$ である。図 12 に測定した 9 個の評価サンプルの Sパラメータの測定結果 (赤実線) とシミュレーション結果 (青点線) を示す。シミュレーションモデルは図 10 に示したものであり、入出力構造を含まない結果である。これに対して測定結果は入出力構造を含んでおり、前述のとおり 1 番目と 5 番目の共振器にととも近い位置に配置される。それにも関わらず測定結果とシミュレーション結果はほぼ完全に一致しており、本技術の高い設計精度を示すとともに開発した入出力構造の有用性を示している。通過帯域における挿入損失は 1.3 ~ 1.6 dBと非常に低い値であり、入出力構造の損失を 0.4 dB/個と仮定するとフィルタの本質的な挿入損失は 0.5 ~ 0.8 dBと超低損失な値となる。挿入損失と共振器の無負荷 Q の関係式¹²⁾よりポスト壁円柱共振器の Q は 805 ~ 1290 と見積もることができる。

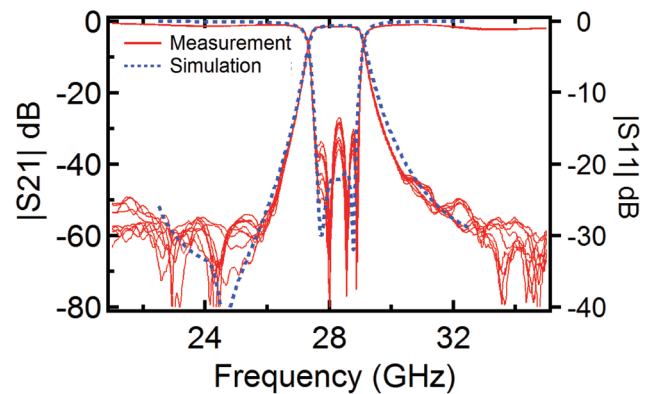


図 12 帯域通過フィルタの測定結果とシミュレーション結果

Fig. 12. Measured and simulated results of bandpass filter.

5. む す び

5 G通信（第5世代移動通信）向けに28 GHz帯の帯域幅2 GHzの狭帯域な帯域通過フィルタを初めて実現した。フィルタは円柱状に構成された合成石英ガラスのポスト壁導波路による共振器から構成され、きわめて低損失な性能と高い設計精度、再現性を示した。今回の検討により、合成石英ガラスによるポスト壁導波路技術がミリ波帯に限らず、より低い周波数帯である準ミリ波帯においても高い有用性を発揮することを示した。これまでの検討から39 GHz等、5 G通信で使用が考えられるさらに高い準ミリ波周波数帯においても本技術が非常に有効であると考えている。

参 考 文 献

- 1) K. Matsutani, H. Kojima, M. Nakahori, K. Kuroda, K. Onaka, M. Koshino, and T. Toi, "Miniaturized quartz waveguide filter using double-folded structure," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1201-1204, Jun. 2019.
- 2) M. Ali, F. Liu, A. Watanabe, P. M. Raj, V. Sundaram, M. M. Tentzeris, and R. R. T μ mmala, "First demonstration of compact, ultra-thin low-pass and bandpass filters for 5 G small-cell applications," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 28, pp. 1110-1112, Dec. 2018.
- 3) Y. Uemichi, O. Nukaga, X. Han, R. Hosono, N. Guan and S. Amakawa, "Characterization of 60- GHz silica-based post-wall waveguide and low-loss substrate dielectric," in *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf.*, pp. 1-4, Dec 2016.
- 4) Y. Uemichi, O. Nukaga, K. Nakamura, X. Han, R. Hosono, N. Guan and S. Amakawa, "Compact and low-loss bandpass filter realized in silica-based post-wall waveguide for 60- GHz application," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1-3, Jun. 2014.
- 5) Y. Uemichi, O. Nukaga, K. Nakamura, X. Han, R. Hosono, K. Kobayashi and N. Guan, "A 60- GHz six-pole quasi-elliptic bandpass filter with novel feeding mechanisms based on silica-based post-wall waveguide," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1-3, Jun. 2017.
- 6) Y. Uemichi, O. Nukaga, K. Nakamura, X. Han, Y. Hasegawa, R. Hosono, K. Kobayashi, N. Guan and S. Amakawa, "An E-band hybridcoupled diplexer built of silica-based post-wall waveguide," in *Proc. Eur. Microw. Conf.*, pp. 819-822, Oct 2017.
- 7) Y. Uemichi, O. Nukaga, X. Han, K. Kobayashi, S. Amakawa and N. Guan, "Temperature dependence of bandpass filters built of silica-based post-wall waveguide for millimeter-wave applications," in *Proc. Eur. Microw. Conf.*, pp. 703-706, Sept. 2018.
- 8) Y. Uemichi, O. Nukaga, X. Han, S. Amakawa and N. Guan, "Highly configurable cylindrical-resonator-based bandpass filter built of silica-based post-wall waveguide and its application to compact E-band hybrid-coupled diplexer," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 726-729, Jun. 2019.
- 9) Y. Uemichi, O. Nukaga, K. Nakamura, X. Han, R. Hosono and N. Guan, "A ultra low-loss silica-based transformer between microstrip line and post-wall waveguide for millimeter-wave antenna-in-package applications," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 13, Jun. 2014.
- 10) Y. Uemichi, O. Nukaga, K. Nakamura, X. Han, R. Hosono and N. Guan, "Silica-based post-wall waveguide with high-performance input and output transitions for E-band passive front-end," *2015 Int. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP)*, pp. 1-3, Nov. 2015.
- 11) Y. Uemichi, O. Nukaga, K. Nakamura, X. Han, R. Hosono and N. Guan, "A study on the broadband transitions between microstrip line and post-wall waveguide in E-band," in *Proc. Eur. Microw. Conf.*, pp. 13-16, Oct. 2016.
- 12) J. -S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filter for RF/Microwave Applications*, Wiley, 2001, ch. 3, sec. 3.6.3, p. 73.
- 13) Y. Uemichi, S. Tsuchiya, T. Yamaguchi, X. Han, O. Nukaga, S. Amakawa and N. Guan, "Narrow-band and low-loss bandpass filter for 5 G built of Silica-based post-wall waveguide," in *Proc. Eur. Microw. Conf.*, pp. 559-562, Jan. 2021.