

FPC 製造技術を用いたミリ波サブミリ波帯周波数選択フィルターの開発

○宇野慎介、竹腰達哉、河野孝太郎、陳家偉(東京大学)、大島泰、吉岡佳輔(国立天文台)

概要(Abstract)

我々はミリ波サブミリ波における広帯域多色カメラの開発を進めている。本カメラで計画している広帯域多色連続波観測を実現するうえで必要な光学フィルターの特性は、130—295GHz 帯の帯域幅をカバーし、かつカットオフが急峻なバンドパスフィルターである。本カメラに搭載するフィルターとして複数個のメタルメッシュフィルターの利用が検討されている。我々は、商用の FPC (フレキシブルプリント基板) 製造技術を利用したメタルメッシュフィルターの開発を行った。メタルメッシュフィルターに関してその設計技術と専用の製造装置が必要なためにコストや納期などの面から入手性が悪かったという状況が背景にあり、本開発は設計が比較的簡単に行えること、および商用の基板製造技術で製作できることを示して入手性を広く改善することを目的とする。まず汎用物理シミュレーションソフト COMSOL RF module を用い、導体のメッシュパターンに対する電磁波の透過率と反射率の周波数依存性を解析した。その結果、フィルターに最適であると期待されるパターンが、六角格子型のメッシュを最適な間隔で数層積層したものであると結論づけた。次にシミュレーション結果を元に回路基板同様の手法で複数のメッシュパターンについて設計と試作を行い、試作品の目視と THz-TDS を用いた透過率の測定によって評価した。今後は、今回のシミュレーションと測定結果の比較により判明した製造上の効果をメッシュパターン設計にフィードバックしてフィルターの最適化を行ってゆく予定である。

1. Introduction

バンドパスフィルターは、ミリ波サブミリ波帯の撮像・分光装置において重要な素子である。メタルメッシュフィルターはその設計技術と専用の製造装置が必要なために製作できるグループが限られ、コストや納期などの面から入手性が悪かった。そこで我々は商用のフレキシブルプリント基板(FPC)製造技術を用いて広帯域のバンドパスフィルターを製作する新たな手法を提案する。我々の目標は130-295GHz 帯の帯域幅をカバーし、カットオフが急峻なバンドパスフィルターを製作することであるが、国立天文台の所有する THz-TDS を用いて透過率測定を行えるように、260-590GHz の帯域をカバーするような大きさを半分にしたスケールモデルも同時に試作した。

2. 電磁界シミュレーション

汎用物理シミュレーションソフト COMSOL RF module を用いてメタルメッシュフィルターをモデリングし、透過率・反射率の周波数依存性を解析した。フィルター部分のモデルは近似的に厚みのない完全導体とした。また便宜的に電磁波はフィルター面に対して垂直に入射するものとした。パスバンド

の高周波側では、回折限界以上で周期的構造によるグレーティング状の効果で損失が生じるため、波長がメッシュパターンの周期長に対応する周波数によりバンドの上限が定まる。バンドの下限を下げてもバンドを拡大できるかどうかは、パターンの図形と導体の線幅に左右される。シミュレーションの結果、線幅が細いほどパスバンドは広くなること、及び図形について四角格子と六角格子のメッシュを比較すると六角格子がより広いパスバンドを持つことを確認した。2種類の図形による違いは、線幅と回折限界周波数を一定としたときの導体の占める充填率の違いで定性的に示せるものである。

更に、メタルメッシュフィルタが伝送線路の等価回路に置き換えられることを原理として、図形の組み合わせや積層をしているパターンについてもシミュレーションを行った(図1)。特に inductive なパターンと capacitive なパターンの組み合わせによりバンドパスの特性となること、また適当な間隔を空けて積層することで等価回路的には急峻なカットオフを持つ高次のチェビシェフフィルタに近いものになることを確認した。我々はカットオフが急峻なバンドパスフィルタとして最適であると期待されるパターンが、六角形の網目構造と六角形の組み合わせを最適な間隔で数層積層したものであると結論づけた。

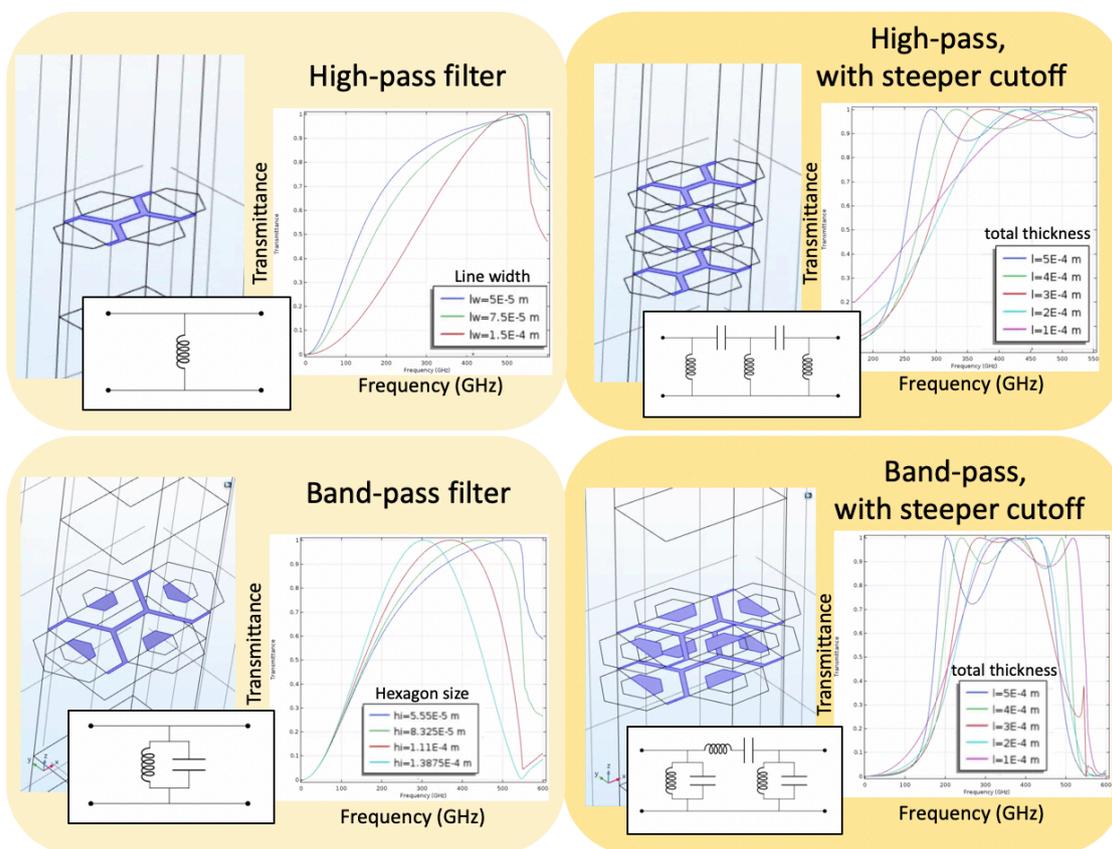


図 1. メッシュパターン、等価回路とシミュレーションで得られた透過率曲線

3. 試作品の設計・試作・評価

プリント基板の設計に用いられる CAD ソフト Cadlus One を利用してメタルメッシュフィルタの試作品を設計し、FPC として株式会社ケイツーに発注した。当社の仕様で定められている最小線幅は

50 μm 、導体部分の銅箔層の厚みは9 μm 、基材のカプトン層の厚みは12.5 μm である。顕微鏡を用いて試作品の目視確認、特にパターンパラメータである線幅と spacing の測定を行った。顕微鏡写真の一部を図2に示す。Spacing はほぼ設計値通りであったが、線幅は全体的に約25 μm 細くなっていた。この原因はオーバーエッチングであると考えられ、今後は製造時のキャリブレーションをすることで補正可能なものである。

そして THz-TDS を用いて試作品の透過率・位相変位を測定した。設計値線幅50 μm 、spacing 630 μm の六角格子メッシュについて測定したところ、図3に示すように回折限界周波数以下のハイパス的な特性、また回折限界周波数以上の透過率の低下はシミュレーションと概ね一致した。しかしシミュレーションでは現れなかったパスバンド内の共鳴が見られた。シミュレーション上で電磁波入射角をつけると同パターンでも近傍の周波数に共鳴が現れ、測定系におけるフィルターの設置角度や Wood's anomaly と呼ばれる現象に起因する共鳴であると考えられる。

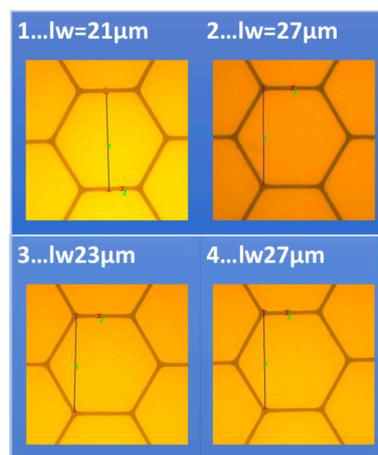


図 2. 線幅 50 μm (lw の値は実測値)、spacing 630 μm のサンプルの顕微鏡写真

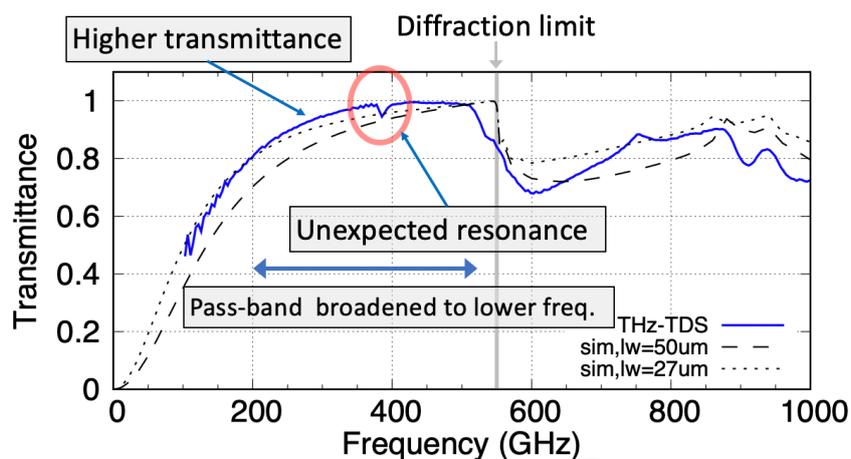


図 3. 六角格子メッシュの試作品とシミュレーションの透過率の比較

4. まとめと今後の展開

FPC 製造技術を用いてメタルメッシュフィルターの試作を行い THz-TDS による透過率測定を行った

結果、シミュレーション結果と概ね一致する形でフィルターとして機能することが確認できた。今後はまだ未測定のパターンや積層したフィルターについても測定を行いシミュレーションと比較してゆく予定である。補正を加えてバンドパスフィルターの再設計を行うために、試作品とシミュレーションの不一致の物理的原因を調査する必要がある。

5. 参考文献

- P.F. Goldsmith, *Quasioptical Systems: Gaussian beam quasioptical propagation and application*, Wiley-IEEE Press, 1998.
- B.A. Munk, *Frequency selective surfaces: theory and design*, Wiley, 2000.
- D.M. Pozar, *Microwave engineering*, 4th ed, Wiley, 2011.