

多色サブミリ波カメラ用多段型多孔質膜赤外線フィルターの開発

○長沼桐葉、吉岡佳輔、酒井剛(電気通信大学)、大島泰(国立天文台)、
竹腰達哉(北見工業大学)、丹羽佑果(東京工業大学)、宇野慎介、陳家偉、井上修平(東京大学)

概要(Abstract)

我々は極低温検出器を用いた多色同時撮像型の超広視野ミリ波サブミリ波カメラの開発を進めている。本カメラの広視野光学系と極低温環境(<250 mK)の両立には、光学開口から侵入する 300 K の輻射を遮断する赤外線フィルターが不可欠である。我々は多孔質ふっ素樹脂(PTFE)膜を多段にし、かつ、膜間距離を観測波長以下にして干渉させることで高透過率を実現する最適化を行い、観測帯域 (120-720 GHz) で低損失と赤外線遮断を両立する多層フィルターを設計した。さらに、その設計を基にして組み立てられた多層フィルターは、10 層の積層においても 120-720 GHz で平均反射損 2%未満を達成した。

1. はじめに

赤外線は自身より大きな粒径の空孔によって散乱されることが知られている[1] [2]。また、PTFE はミリ波サブミリ波で高透過率を有するため、これらの要素を併せ持つ多孔質 PTFE がミリ波サブミリ波用の赤外線フィルターとして注目されている。この用途の代表例として、空孔径~6 μm の Zitex (SAINT-GOBAIN 製) という多孔質 PTFE で作られた濾過フィルターがこれまでよく用いられてきた。

2. 先行研究と問題点

Zitex の問題点として、その実効屈折率が 1.25 であるため、膜内での光の干渉によって透過率にフリッジが生じ、ミリ波サブミリ波での反射損が無視できない点と、赤外線の吸収によって膜が温まるが、薄いために熱伝導が悪く、1 枚では新たな赤外線放射の源になってしまう点が挙げられる。

この問題に対して、我々は過去に多段 Zitex フィルターを開発し、多色カメラに搭載してきた[3]。これは膜と膜の間に空隙を設けて多段にすることで膜による赤外線の吸収と再放射を段階的に減衰させる方法であり、原理的に極低温ステージへの熱負荷を下げるのが可能となる。また、そのような多層膜の場合は膜間で光の干渉によって透過率が大きく下がってしまう帯域が現れるため、シミュレーションによってこの膜間の空隙を最適化する必要がある。これらに基づき、我々は 3 つのバンドを通す 3 層 Zitex フィルターを開発した (図 1)。この方法はバンドに合わせた設計によって多色で高い透過率を達成できる利点があるが、我々が新たに考えている 120-720 GHz における 6 色のバンドでは透過率が大きく下がる部分が多く被ってきてしまうことが新たな問題となる。

一方で、低屈折率の材料をフィルターに用いればよいというアプローチから、Styrofoam を用いた RT-MLI が登場した[4]。Styrofoam の屈折率は 1.02 と非常に低いために反射損を無視できることと、上述の多段にすることで段階的に温度を下げられるという原理を用いていることから RT-MLI はミリ波領域で赤外線フィルターとして実用化されてきた。しかし、Styrofoam は空孔径と同程度のスケールであるサブミリ波まで散乱してしまうことが問題であり、我々には別の方法が必要となる。

以上から、赤外線フィルターとしては多孔質 PTFE の多段化が有効であり、その上で超広帯域化は屈折率や膜厚、膜間の空隙を選び最適化することによって達成できないかを検討していくことが開発方針となる。

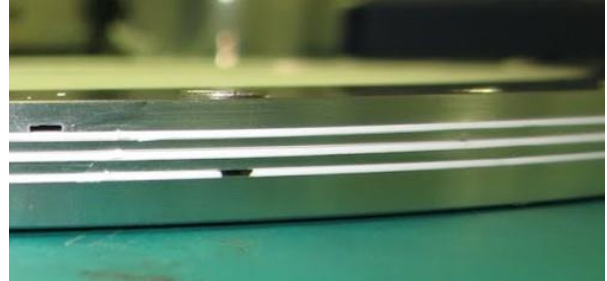
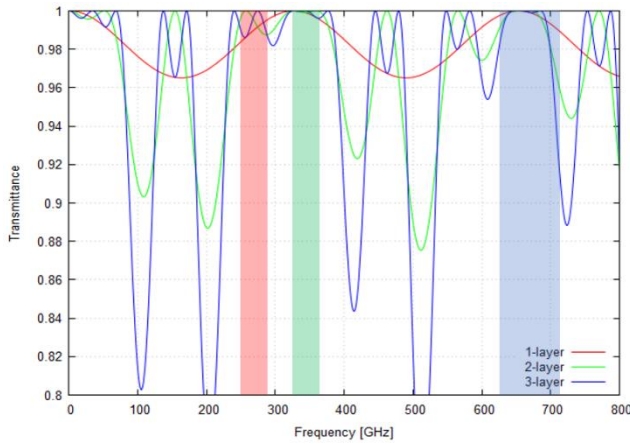


図 1. スペーサーによって膜間に 1 mm の空隙を設けた 3 層 Zitex フィルター（右）と、カラーバーで示した 3 色のバンドに対する透過率（左）

3. 方法

多層膜の場合は膜間での干渉を考える必要がある。ここで、屈折率を n 、膜厚を d 、空隙を gap としたとき、膜厚と空隙を Optical Path Length (OPL) として $nd + gap$ で近似できる。いま膜間での干渉によって透過光が大きく弱められてしまう場合の共振条件を求めると、光の波長を λ として、それは OPL が $\lambda/2$ の整数倍のときとなる。従って、超広帯域化においてはこの最初の共振周波数をバンドの外まで大きくして追い出せばよい。一方で、そのような最初の共振が起きるときは波長と OPL が同程度のときであるため、これとは別に波長が OPL より十分に大きいときについても考える必要がある。これらの点を考慮して屈折率 n 、膜厚 d 、 gap に求められる条件を評価すると、まず最初の共振周波数を大きくするという条件から、式

$$OPL \sim nd + gap = \lambda/2 \quad (1)$$

において波長 λ を小さくすればよいことになる。いま屈折率 n を固定して考えると、膜厚 d と gap を両方小さくすればこの条件を満たす。また、波長が OPL より十分に大きいときは膜厚 d と gap をひとかたまりとして見なせ、その実効屈折率 n_{eff} を

$$n_{eff} \sim \frac{nd + gap}{d + gap} = \left(1 + \frac{nd}{gap}\right) / \left(1 + \frac{d}{gap}\right) \quad (2)$$

と近似できる。同様に屈折率 n を固定して考えると、実効屈折率 n_{eff} を小さくする条件は膜厚 d を小さくするか、あるいは gap を大きくするかとなる。また、いずれの場合についても屈折率 n は小さい方がよい。以上より、屈折率 n 、膜厚 d はどちらも小さい方がよく、 gap は 2 つの場合についてトレードオフの関係になるため、結局、薄くて屈折率が小さい多孔質 PTFE を、適切な間隔で積層することが重要だと言える。この具体的な数値を得るために行った網羅的シミュレーションの結果を図 2 に示す。これより、屈折率が高くなるに従って全体的な平均透過率は下がるが、膜厚と空隙のバランスは変わらないことが分かり、我々の要求に必要な数値を見積もることができる。ここで、平均反射損を 1%未満に抑えようとすれば、屈折率 $n < 1.2$ 、膜厚 $d < 150 \mu\text{m}$ 、 $gap < 150 \mu\text{m}$ 程度がその目安として得られる。

我々はこのような条件を満たす多孔質 PTFE を、Zitex と同様に濾過フィルターとして市販されている Poreflon(住友電気工業 製)、ADVANTEC (アドバンテックグループ 製) の数種類についてテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) を用いて屈折率、透過率を測定することで探査した。測定結果 (図 3、表 1) より、Poreflon からは WP-100-100 が、ADVANTEC からは T300A がそれぞれ我々の必要なバンド (120-720GHz) で高透過率かつ低屈折率であるため、積層に用いるフィルターの候補として選ばれた。

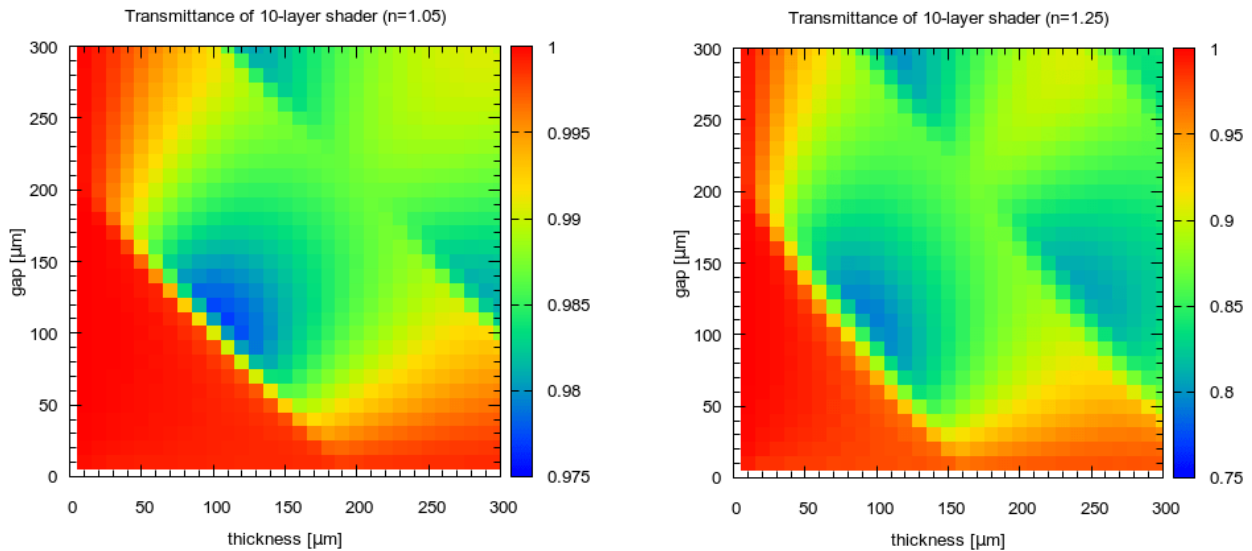


図 2. 縦軸を空隙、横軸を膜厚として 10 層積層した場合の 120-720 GHz における平均透過率のシミュレーション結果。屈折率 1.05 の場合 (左) と屈折率 1.25 の場合 (右) での比較。

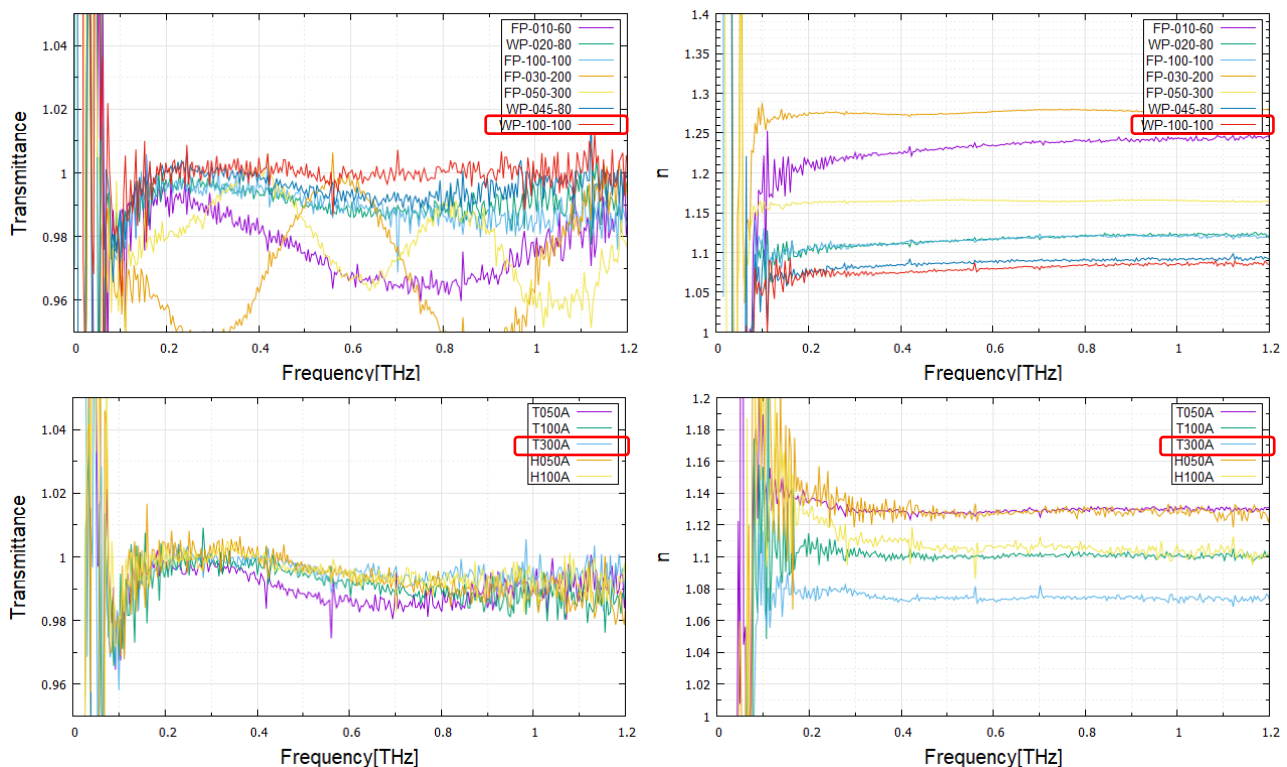


図 3. THz-TDS による Poreflon7 種 (上) と ADVANTEC5 種 (下) についての透過率 (左) と屈折率 (右) の測定結果

型番	空孔径(μm)	厚さ(μm)	n
FP-010-60	0.1	68	1.24
WP-020-80	0.2	74	1.12
FP-100-100	1	75	1.12
FP-030-200	0.3	206	1.27
FP-050-300	0.5	307	1.16
WP-045-80	0.45	65	1.10
WP-100-100	1	77	1.08

型番	空孔径(μm)	厚さ(μm)	n
T050A	0.5	91	1.14
T100A	1	70	1.11
T300A	3	74	1.09
H050A	0.5	39	1.15
H100A	1	34	1.12

表 1. 測定した Poreflon7 種 (左) と ADVANTEC5 種 (右) のリスト

4. 結果

これらの候補を 1-10 層で積層し、透過率を測定した結果を図 4 に示す。両者の測定結果において、シミュレーションと比較して最初の共振が高周波側にシフトしているように見える場合が多くあるが、これは重力によって膜がたわむことで空隙が小さくなった影響であり、また、T300A での 7 層 gap50 μm と 10 層 gap0 μm の場合は逆に共振が低周波側にシフトしているように見えるが、これは一部の膜が静電気を帯びていて、それによって空隙が広がってしまったことが原因として考えられる。この結果より、10 層まで積層したいずれの場合についても、120-720 GHz で平均反射損は 2%未満となった。

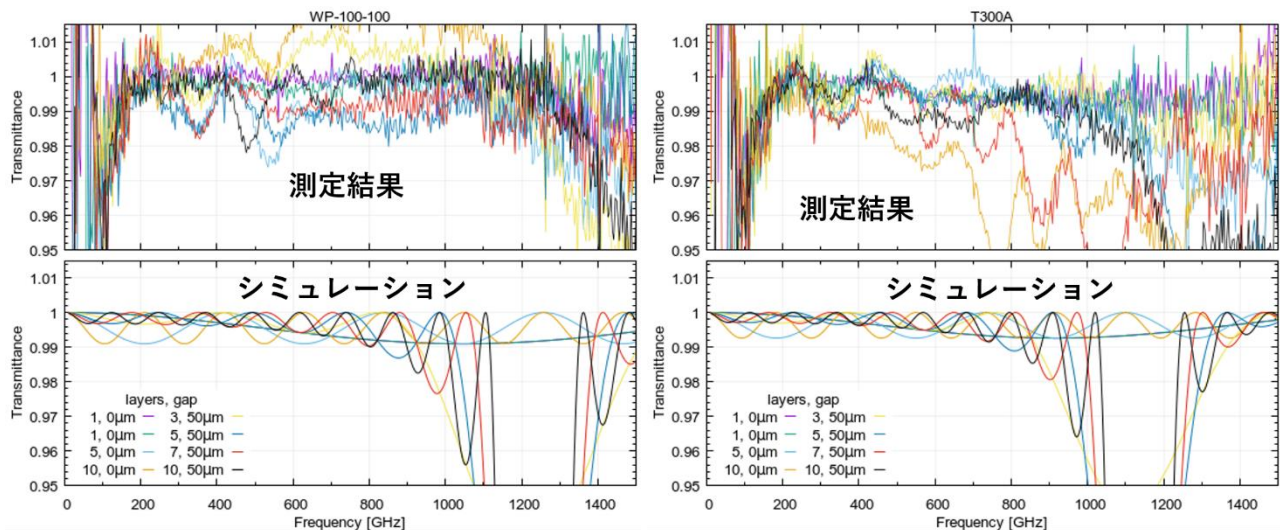


図 4. WP-100-100 (左) と T300A (右) について、gap を 50 μm 、あるいは 0 μm で 1-10 層まで積層した際の透過率の測定結果 (上) とシミュレーション (下) の比較。

5. まとめ

我々はミリ波サブミリ波用の超広帯域な赤外線フィルターの開発において、薄く低屈折率な多孔質 PTFE を、適切な空隙を設けて積層することが有効だと突き止めた。THz-TDS を用いた測定によって多種の多孔質 PTFE からこの要求を満たす屈折率の低い素材を開拓し、10 層の積層においても目標バンド (120-720 GHz) で平均反射損 2%未満の多層フィルターを開発した。今後は 6 色カメラ用クライオスタットに $\Phi 20\text{cm}$ の多層フィルターを取り付け、冷却試験を実施したい。

6. 参考文献

- [1] D.J. Benford et al., Appl. Opt. 42, 5118 (2003)
- [2] S. Sato et al., Appl. Opt. 28, 4478 (1989)
- [3] T. Takekoshi et al., IEEE TST 2, 584 (2012)
- [4] J. Choi et al., Rev. Sci. Instrum. 84, 114502 (2013)