

○山本啓太 (ISAS/JAXA、総研大)、和田武彦 (ISAS/JAXA)、三田信 (ISAS/JAXA)、宮地晃平 (ISAS/JAXA)

Abstract

相模原キャンパスの宇宙ナノエレクトロニクスクリーンルームにて、サブ波長構造を利用した単一材料遠赤外線多層干渉フィルターの試作を行った。現在までに三層構造をもつ干渉フィルターの開発に成功し、遠赤外線領域で設計通りの性能を有していることを確認した。

Introduction

遠赤外線観測による天文学

特に、波長30ミクロン(10THz)帯は光赤外線天文学における最後の未開の波長帯。氷(water ice)による吸収(44 μ m)や、形成期の銀河(赤方偏移 $z=1-4$)からの多環芳香族炭化水素(PAH)発光が観測可能。星・惑星系形成過程から銀河形成にいたる幅広い研究領域で期待されている。空間構造情報に加えて波長情報をとりだすために、バンドパスフィルターなどの光学フィルターが不可欠。

冷却サイクルに強い遠赤外線光学フィルターの必要性

SPICA(大気圏外)、TAO(高地極地 5600m)、南極望遠鏡(寒冷極地 190K/4000m)、により高感度赤外線観測が可能になりつつある。熱背景放射を軽減するため、光学系を含む観測装置全体の極低温(<10K)冷却が不可欠。

従来のフィルターの問題点

光赤外線波長域では、従来は多層薄膜干渉フィルターが用いられた。屈折率と厚みが制御された薄膜を重ねることで、光干渉効果により自在な波長透過特性を実現できる。

帯遠赤外線領域(波長30~300 μ m)では透過材料が少ない

屈折率の制御を材料の選択で実現しているため、材料種類が少ないと、屈折率の最適化設計に大きな制限加わり、高性能化が難しい。代表的な材料は、シリコン、ダイヤモンド、KRS-5(TlBr/TlI)、CsI、Polyethyleneなど。

熱膨張係数の差による膜剥離が問題となる

製造(数百K)、保管(300K)、使用時(<10K)の熱サイクルで剥離が発生する。波長が長いので、干渉光路長すなわち膜厚が厚く、とくに顕著になる。

サブ波長構造を用いた単一材料多層干渉フィルター

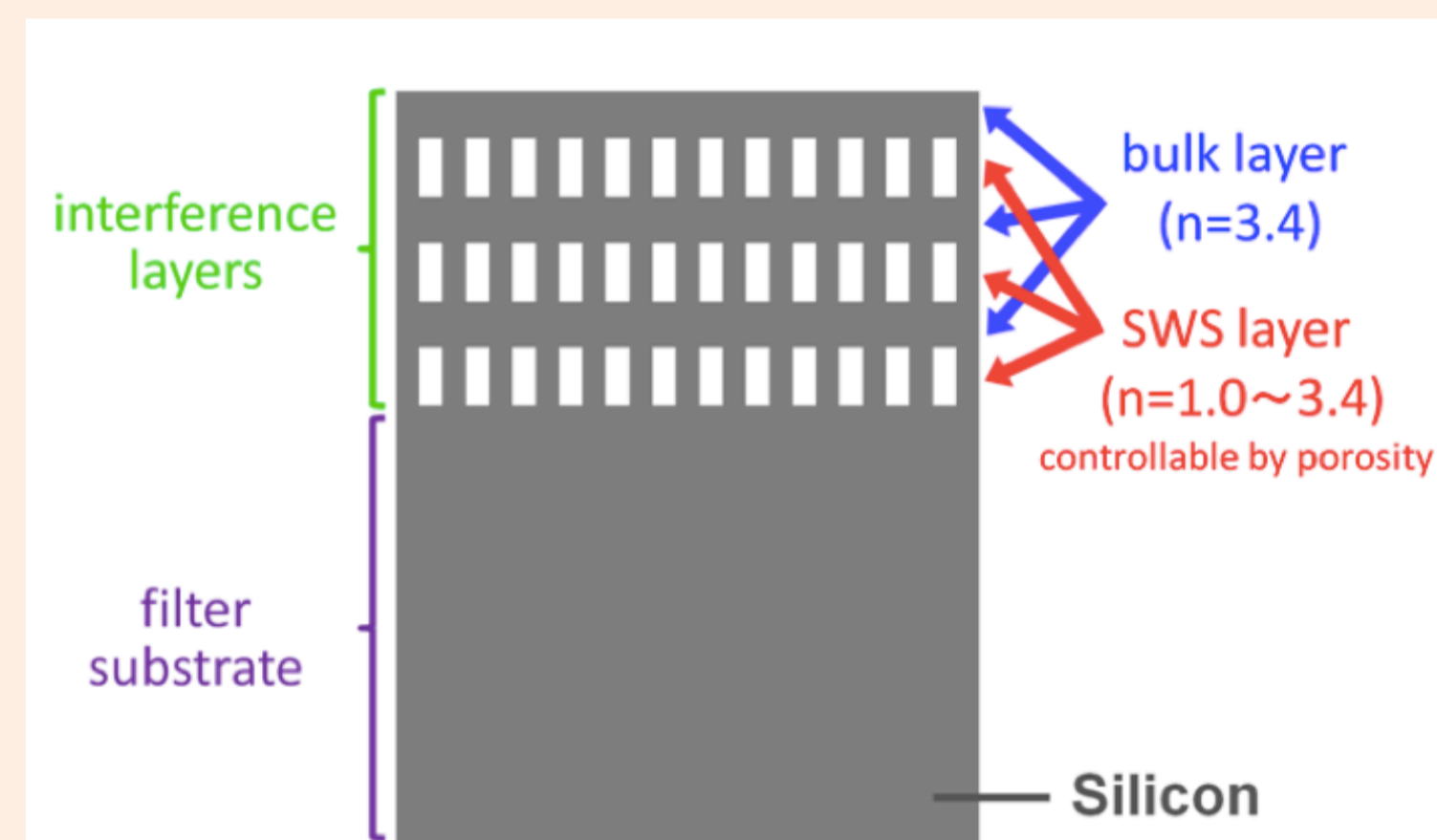
上記問題の解決方法

単一材料のみで実現すればよい。材料は、加工性と耐久性の観点から最も優れるシリコンを選択した。屈折率の制御が問題。材料の選択ではなく、構造で制御する。

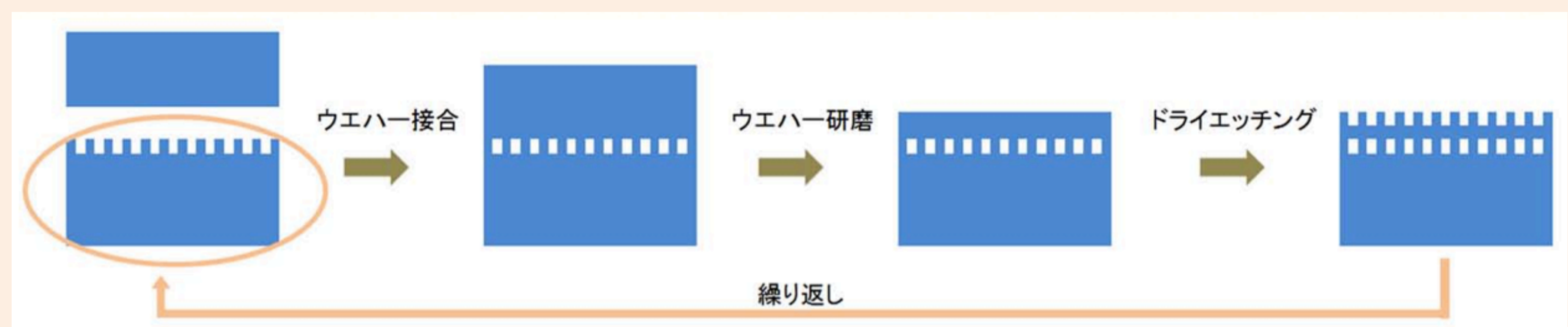
有効媒質近似理論を用いた屈折率制御

Bruggeman(1935)の有効媒質近似理論によると、対象とする波長よりも小さなスケールで、2種類の媒質が混じり合っている場合、それらの媒質の混合割合によって有効屈折率が決まる。

例えば、シリコンに微細な穴(サブ波長構造(Sub-Wavelength Structures; SWS))をあけた場合は、シリコンと真空の混合媒質と考えることができるので、原理的に $n=1.0\sim 3.4$ の有効媒質を作れる。



単一材料多層干渉フィルターの概念図



製造方法の概念図

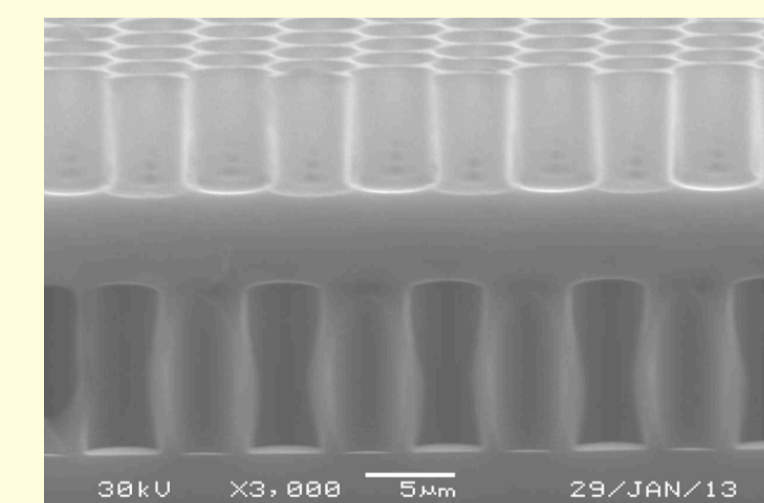
三層構造干渉フィルターの製作・評価

サンプルの作製

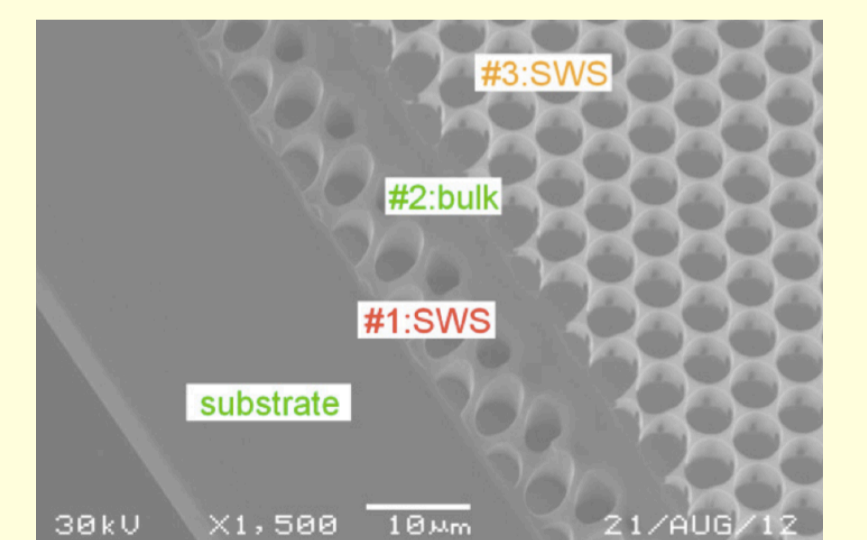
相模原キャンパスの宇宙ナノエレクトロニクスクリーンルームにて、フォトリソグラフィ・ドライエッチングを用いて、サブ波長構造を有する三層構造干渉フィルターを作製した。



サブ波長構造層を有するシリコン



SEMIによるサブ波長構造層断面図

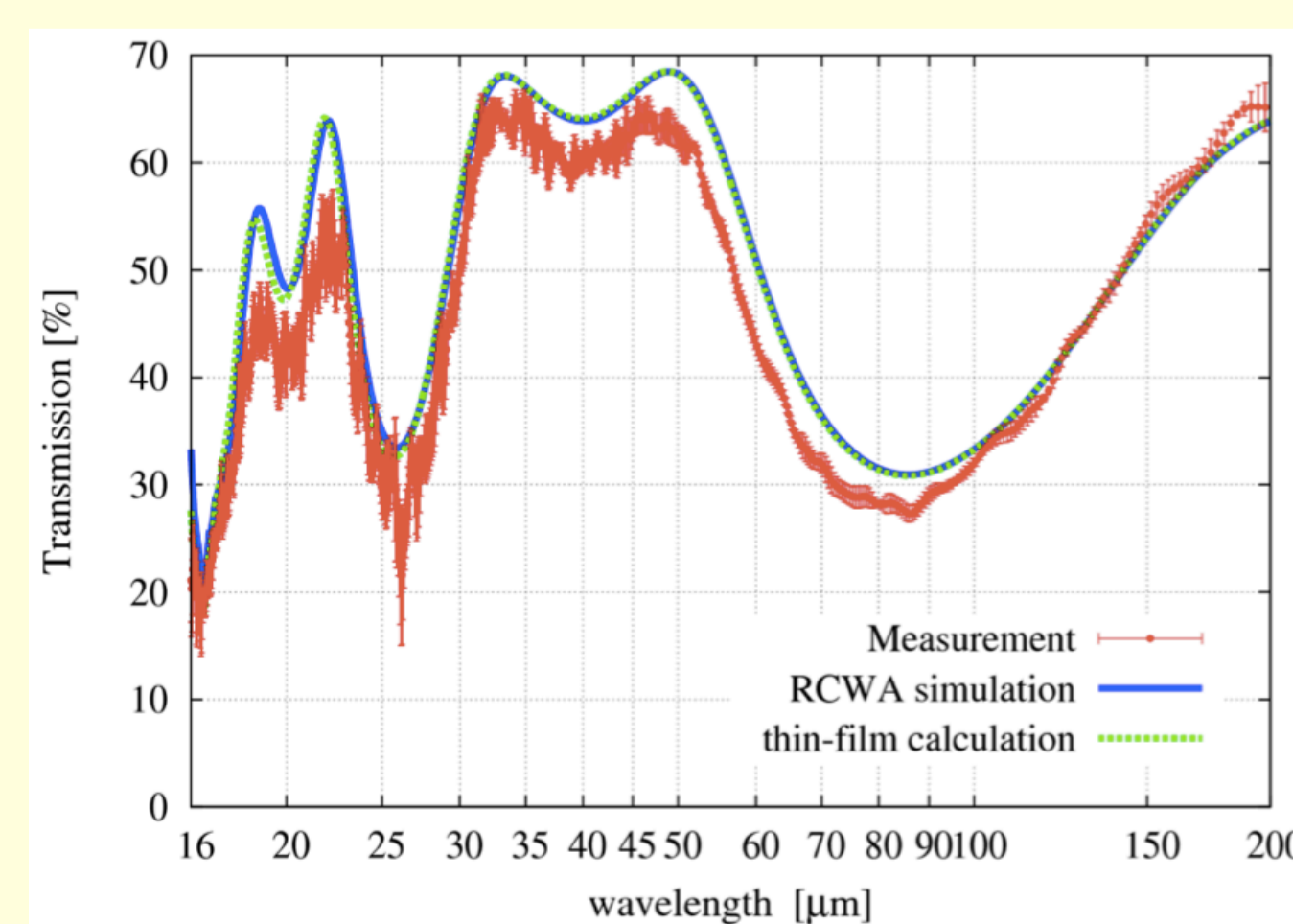


SEMIによるサブ波長構造層を斜め上から見た図。規則的に円柱構造が形成できていることが分かる。

透過率の測定

フーリエ変換赤外線分光法(FT-IR)を用いて、サンプルの透過率測定を行い、理論計算値と比較した。

※常温(23°C)、真空(0.4-0.5torr)環境下 光源:高圧水銀灯、ビームスプリッター:Mylar膜、検出器:DTGS(焦電型検出器)



試作した三層構造干渉フィルターの波長透過特性

※作製した三層構造干渉フィルターの構造パラメータ

Layer	Quarter-wave optical thickness	Physical thickness [μ m]	(Effective) refractive index	Porosity [%]
#3:SWS	0.5	6.8	1.4	80
#2:bulk	1.0	6.0	3.42	-
#1:SWS	1.0	9.8	1.9	62

青: 微細構造を考慮したRCWA法による理論計算値

緑: 有効媒質近似を用いて、微細構造を薄膜とみなした理論計算値

赤: 三層構造多層干渉フィルターの測定値

結果

遠赤外線領域で設計通りの性能を有することを確認した。単一材料で多層干渉フィルターを作製出来ることを示した。

まとめ

サブ波長構造を有する三層構造干渉フィルターを試作して、遠赤外線領域にて設計通りの性能を有することを確認した。今後はサブ波長構造層の更なる多層化、及び、高性能化にチャレンジしたい。