

サブ波長構造を利用した単一材料赤外線多層干渉フィルター

楨坪 宏展(東京大学、ISAS/JAXA)、和田 武彦(ISAS/JAXA)、三田 信(ISAS/JAXA)

Abstract

我々は天文衛星による高感度な赤外線観測を用いた天文学研究に向けて、高性能で冷却サイクルに強い中間・遠赤外線フィルターの開発を目指している。実現に向けて、一般的なMEMS技術のみを用いて作製可能な、サブ波長構造を用いた単一材料多層干渉フィルターを提案している。本講演では、開発の鍵となる「サブ波長構造による屈折率制御」の検証実験を行い、屈折率を制御できることを実証したので報告する。

Introduction

中間赤外線観測による天文学

- ・波長30 μm (10THz)帯は光赤外線天文学における最後の未開の波長帯。星・惑星系形成過程から銀河形成に至る幅広い研究領域で期待されている。
- ・SPICA(人工衛星搭載), TAO(高地 5600m), 南極望遠鏡(寒冷極地 190K/4000m)による高感度の中間赤外線観測が計画されている。

冷却サイクルに強い赤外線光学フィルターの必要性

- ・高感度の赤外線観測のためには観測装置からの熱背景放射を軽減しなければならず、光学系を含む観測装置全体を極低温(<10K)に冷却することが必要不可欠。

従来のフィルターの問題点

可視光・近赤外線波長域では多層薄膜干渉フィルターが、遠赤外線波長域ではメタルメッシュフィルターが用いられてきた。

多層薄膜干渉フィルターの問題点

- ・波長30-100 μm の中間・遠赤外線領域では、シリコンなど少数の例外を除くと、物理化学的に安定で優れた透過特性を持つ光学材料がない。
- ・可視光に比べ波長が長い分、薄膜層の厚みを厚くする必要があるが、膜を厚くすると内部応力による剥離の問題が深刻化する。
- ・複数材料を用いているため、冷却サイクルにより、熱膨張係数の差による膜剥離が懸念される。

メタルメッシュフィルターの問題点

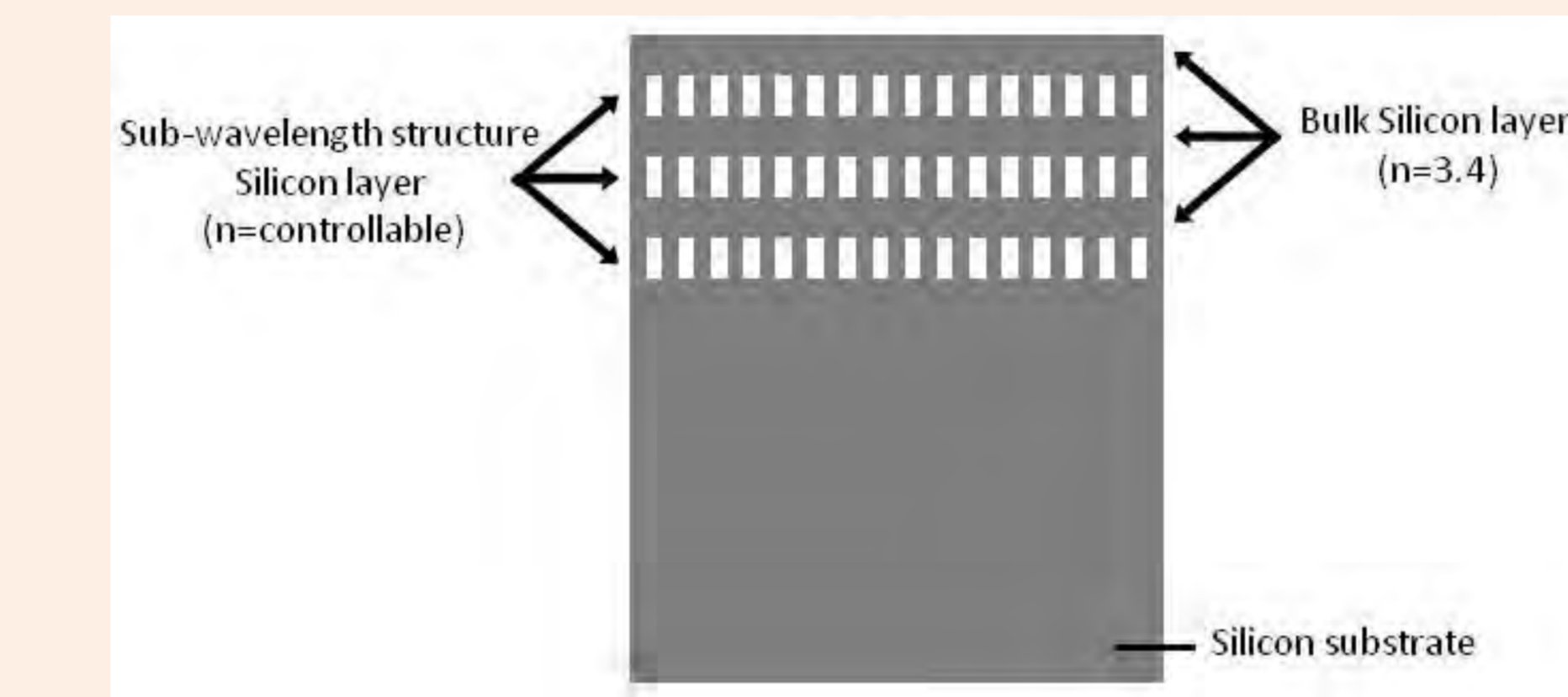
- ・広帯域のバンドパスフィルターの設計が難しい。
- ・厚さが数 μm と非常に薄いため、ロケット打ち上げ時の衝撃でフィルターが壊れてしまう危険性がある。

サブ波長構造を用いた単一材料多層干渉フィルター

上記の問題を解決するため、**単一材料のみを用いた多層干渉フィルター**を提案する。屈折率の制御は、材料の選択ではなく、**サブ波長構造**(Sub-Wavelength Structures; SWS)を導入し空隙率を変えることで制御する。

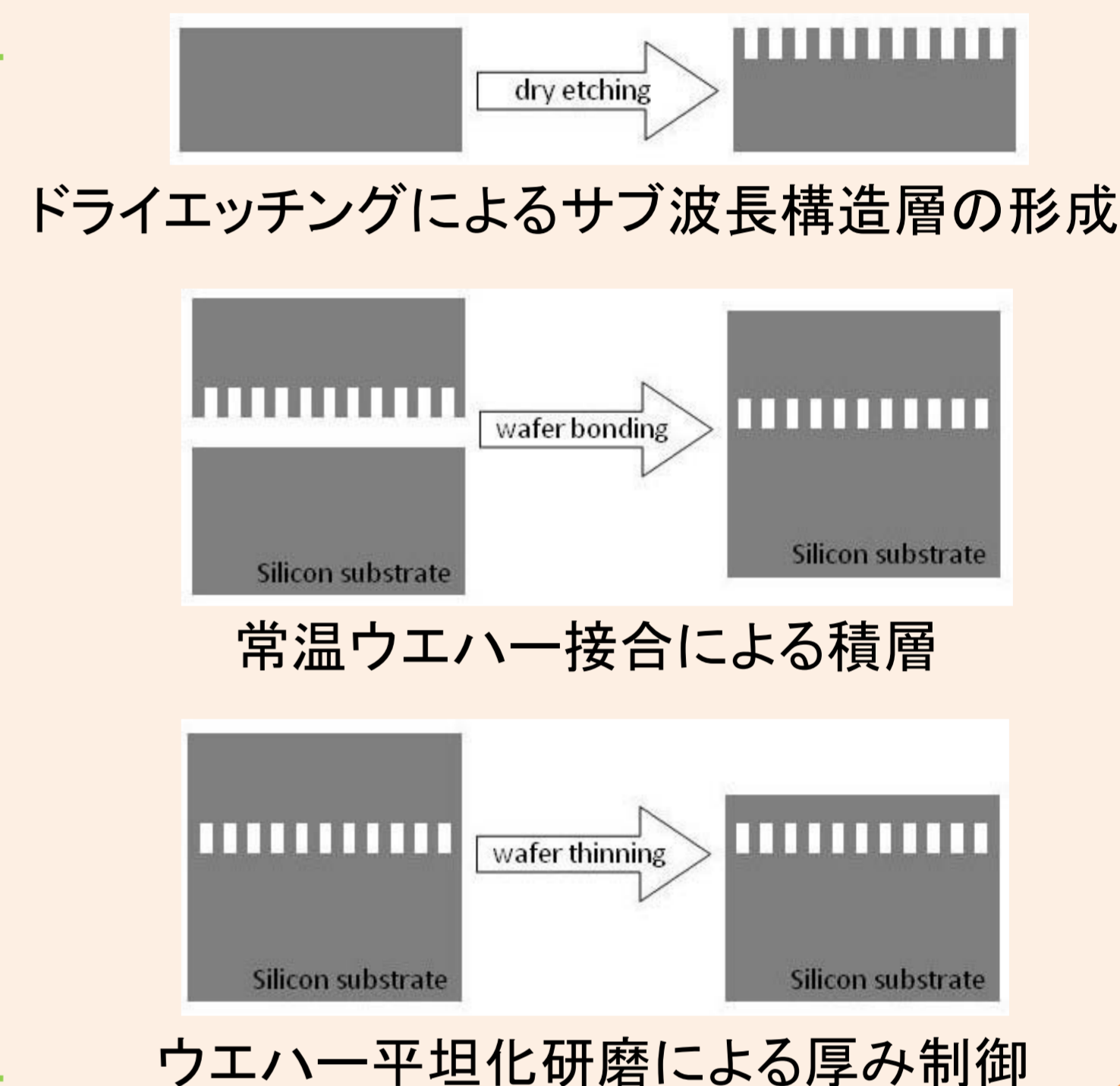
有効媒質近似

- ・2種類の媒質が波長より小さいスケールで混合している場合、その混合媒質は、空間充填率(volume filling factor : f)によって決まる有効屈折率 n_{eff} を持った均質な媒質と捉えることができる。
- ・シリコンにサブ波長スケールの穴をあける(シリコンと真空の混合媒質ができる)ことで、原理的には $n=1.0\sim 3.4$ の有効媒質を作ることが可能となる。



サブ波長構造を用いた単一材料多層干渉フィルターの概念図

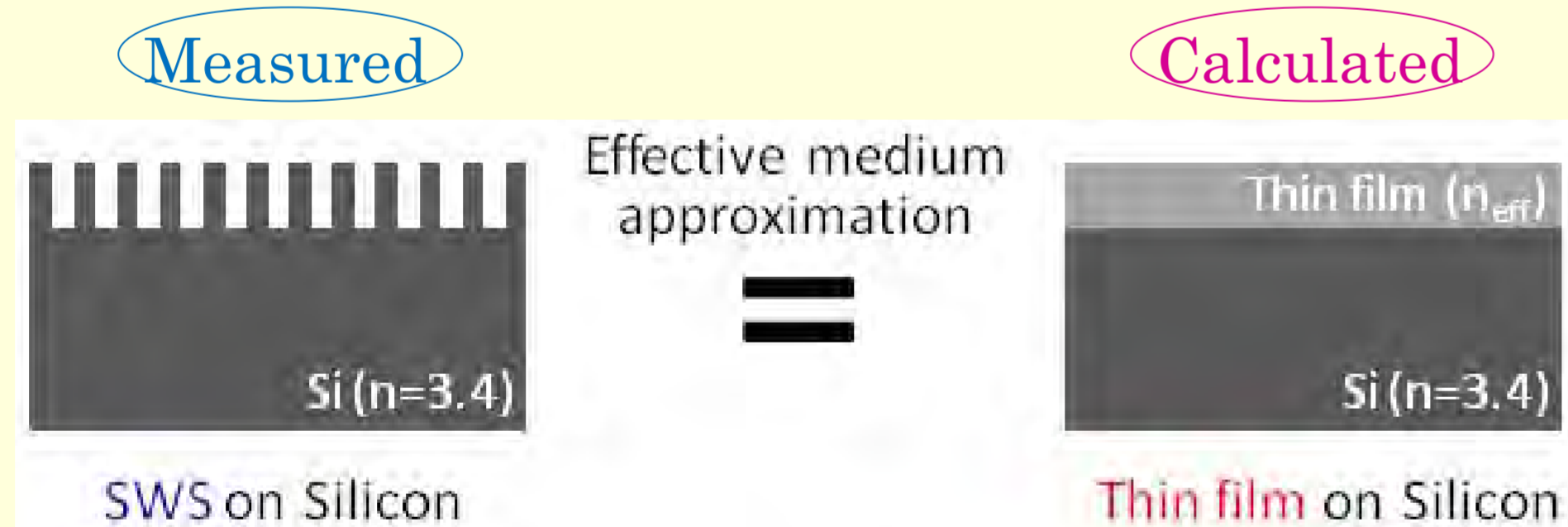
製造方法の概念図



サブ波長構造による屈折率制御の検証

単一材料多層干渉フィルター実現の鍵となるSWSによる屈折率制御を検証するため、MEMS技術(フォトリソグラフィー・ドライエッチング)を用いて、実際にサンプルを作製した。なおサンプルの作製はISAS/JAXA相模原キャンパスのマイクロデバイス作製クリーンルームにて行った。

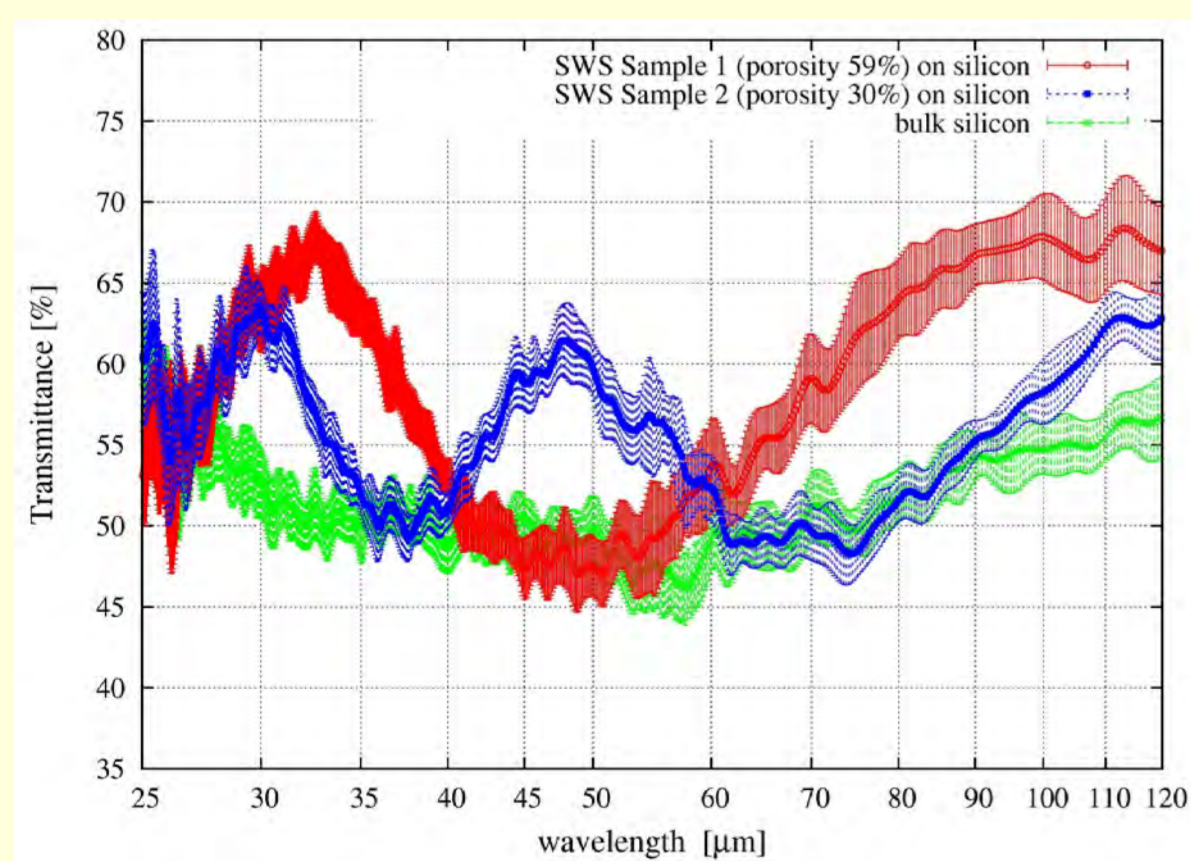
透過率波長特性の測定値と理論計算値を比較することで、屈折率制御を検証する



透過率の測定

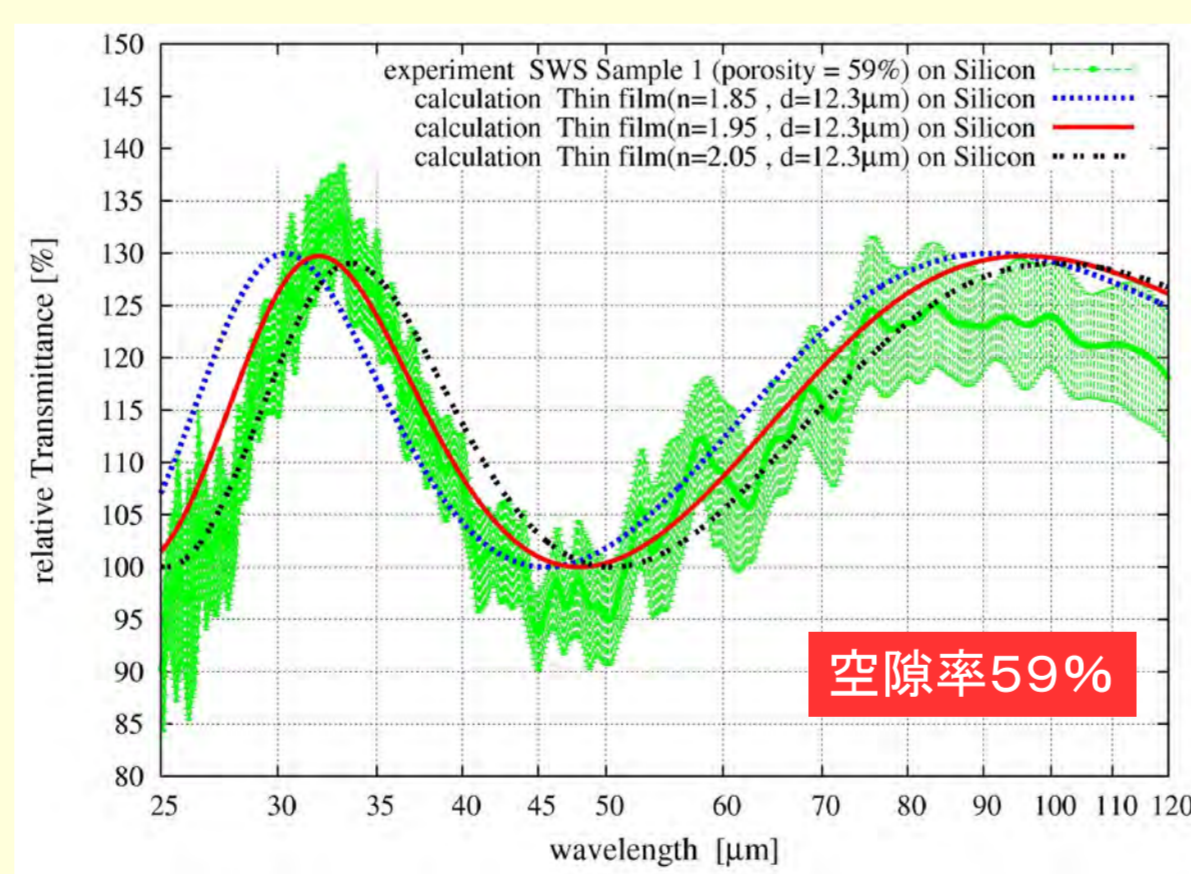
フーリエ変換赤外線分光法(FT-IR)を用いて測定した。
光源: 高圧水銀灯、ビームスプリッター: Mylar膜
検出器: DTGS(焦電型検出器)
※常温(23 $^{\circ}\text{C}$)、真空(0.4-0.5torr)環境下

透過率波長特性

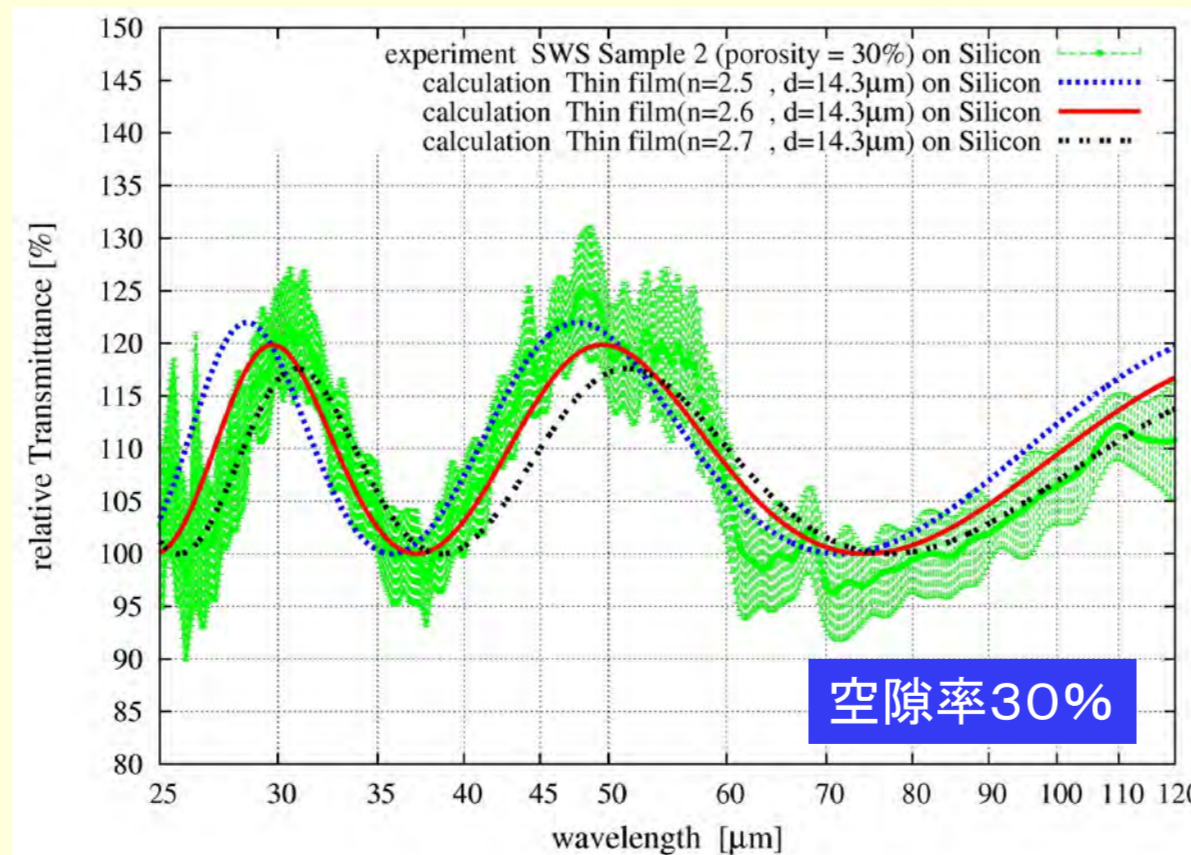


赤: 空隙率59% SWSサンプル
青: 空隙率30% SWSサンプル
緑: バルクシリコン

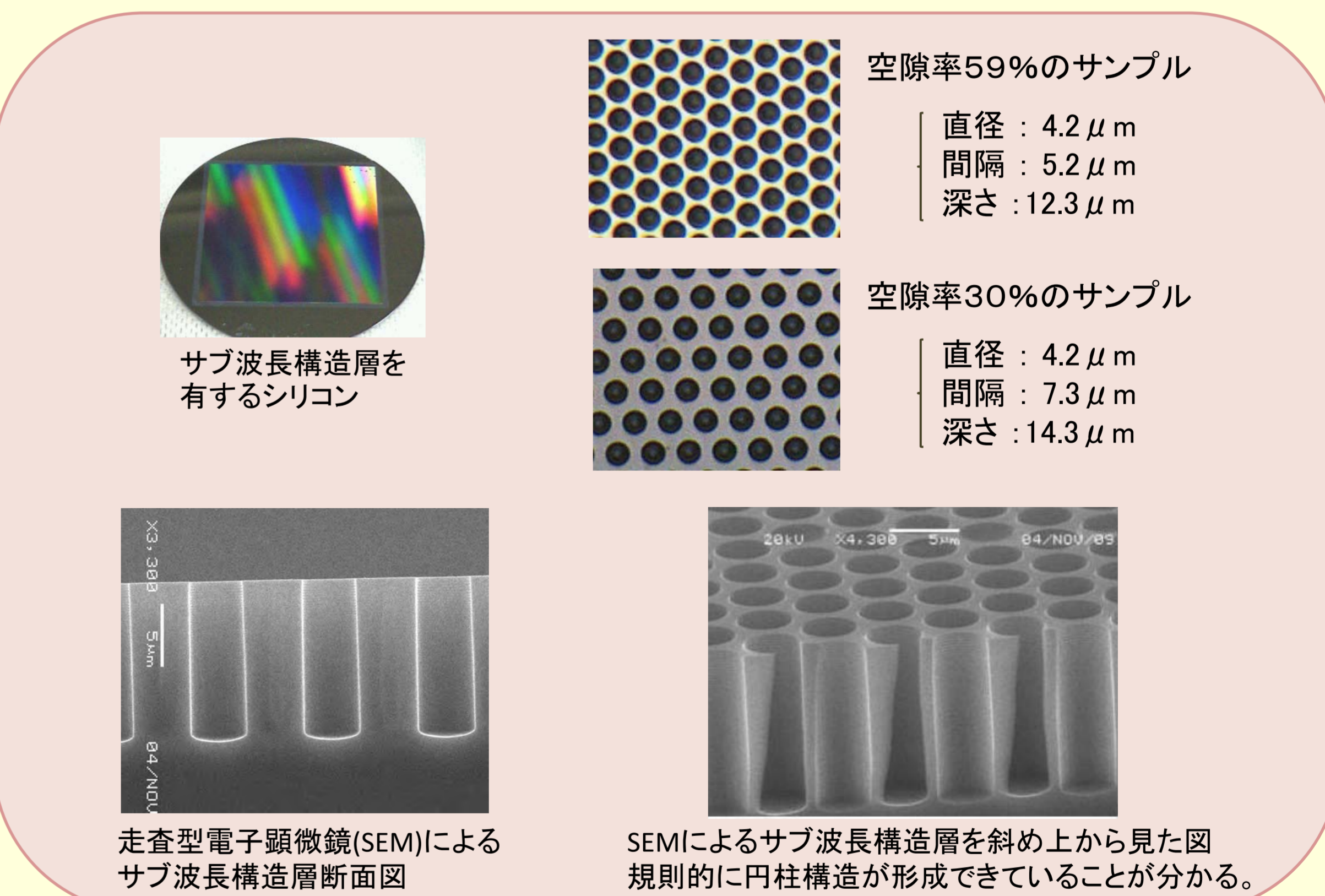
★ SWSによる反射防止の効果をより顕著に見るため、SWSシリコンの透過率を、無加工のシリコンの透過率で割っている。



空隙率59%

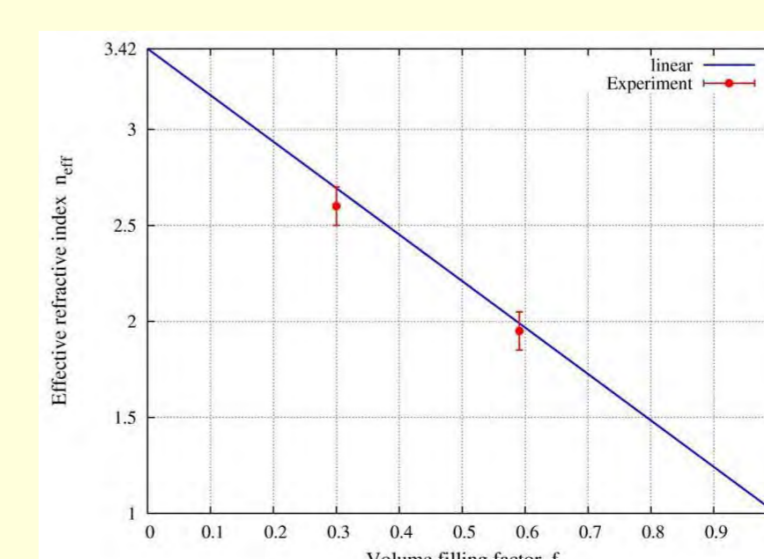


空隙率30%



実験結果まとめ

Sample number	Diameter	Separation	Porosity	Effective refractive index
1	4.2 μm	5.2 μm	59 %	1.95 \pm 0.1
2	4.2 μm	7.3 μm	30 %	2.60 \pm 0.1



- ・サブ波長構造層の屈折率は、線形近似式($n_{\text{eff}}=fn_1+(1-f)n_2$)で計算した値に近いことが分かる。
- ・今後、有効屈折率の見積もりには、線形近似式を使えば良い。

まとめ

一般的なMEMS技術のみで実現可能な単一材料多層干渉フィルターとその製造方法を提案した。実現の鍵となる「サブ波長構造による屈折率制御」を検証するため、MEMS技術を用いてシリコンウエハー上に円柱状の縦穴構造(SWS層)を作り、その光学特性を測定し単層膜フィルターの理論計算値と比較することで、空隙率を変えることでSWS層の屈折率が制御できることを実証した。今後はウエハー接合技術・研磨技術によるサブ波長構造層の多層化にチャレンジしたい。また電磁場シミュレーションによる波長透過特性の計算も行いたい。