

可視赤外線観測装置技術ワークショップ
(2012/02/23)

サブ波長構造を用いた 単一材料多層干渉フィルター

○榎坪 宏展^{1,2}、和田 武彦¹、三田 信¹、鈴木 仁研¹

1: 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所 (ISAS)

2: 東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 博士課程 2年

研究背景

➤ 新たな波長フロンティア30 μm 帯での天文学

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る

次世代赤外線天文衛星(SPICA)搭載に向けて
高性能かつ耐環境性能に優れた
波長30 μm 帯の光学フィルターを開発する

➤ SPICA搭載光学フィルターへの要求事項

◆ 熱サイクルに強い

高感度の赤外線天文観測のため、望遠鏡自身からの
熱背景放射を低減するため極低温下(<10K)で使用

◆ 音響振動に耐えうる

ロケット打ち上げ時は常温常圧のため音響振動の影響を受ける

従来のフィルターの問題点

多層膜干渉フィルター 可視・近赤外線波長域

- 波長 $30\mu\text{m}$ より長い中間・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かつ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 遠赤外線波長域

- **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

解決方針

単一材料による多層干渉フィルターを提案

熱サイクルに強い多層干渉フィルターを製作可能
異種材料に起因する膜剥離の問題から解放される

用いる光学材料: シリコン

物理化学的に安定で、吸収も少なく、微細加工技術が進んでいる

サブ波長構造の導入による屈折率の制御

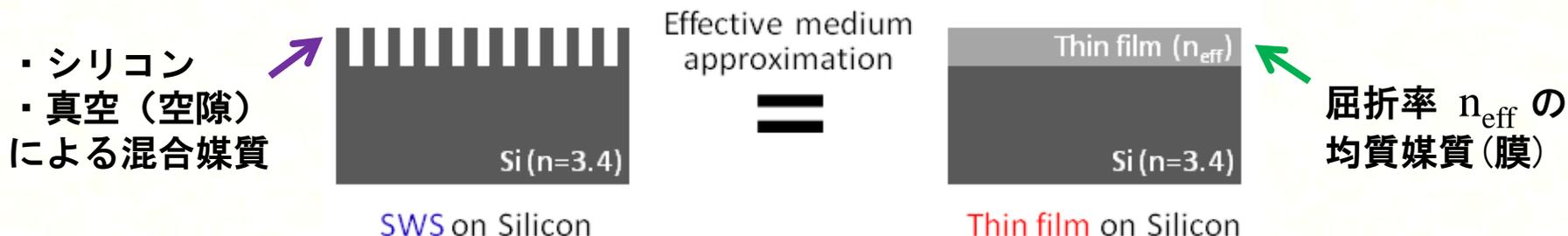
材料選択ではなく、構造(空隙率)により実効的な屈折率を制御
透過材料の乏しい波長 $30\mu\text{m}$ 帯で多層干渉フィルターを実現可能

有効媒質近似理論: 波長より細かいスケールで混合
→実効的な屈折率が両者の中間の値に



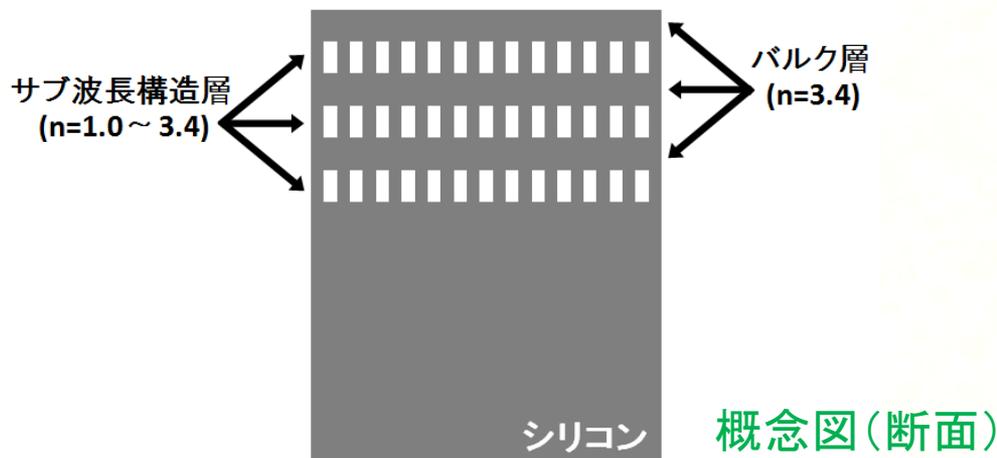
単一材料多層干渉フィルター

◆ サブ波長構造 (Sub-Wavelength Structure; SWS) を導入し屈折率を制御



シリコンに微細な穴を空け、シリコンと真空による混合媒質を構成
空隙率で決まる有効屈折率を持った媒質層として認識される

単一材料 (シリコン) のみで多層干渉フィルターを構成できる

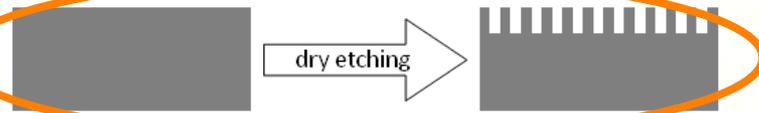


作製方針

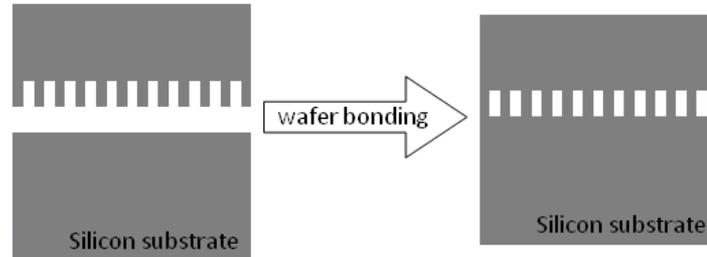
MEMS技術を用いる

(Micro Electro Mechanical Systems)

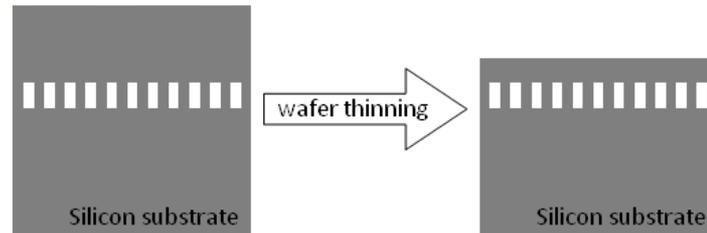
ドライエッチング



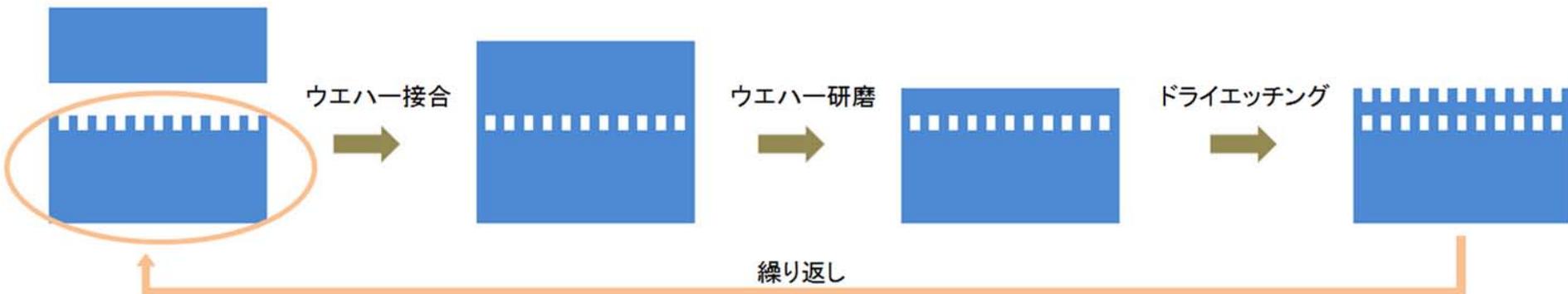
ウエハー接合



ウエハー研磨



◆ 多層化の流れ



サブ波長構造の作製

- ・ フトリソグラフィー
- ・ ドライエッチング

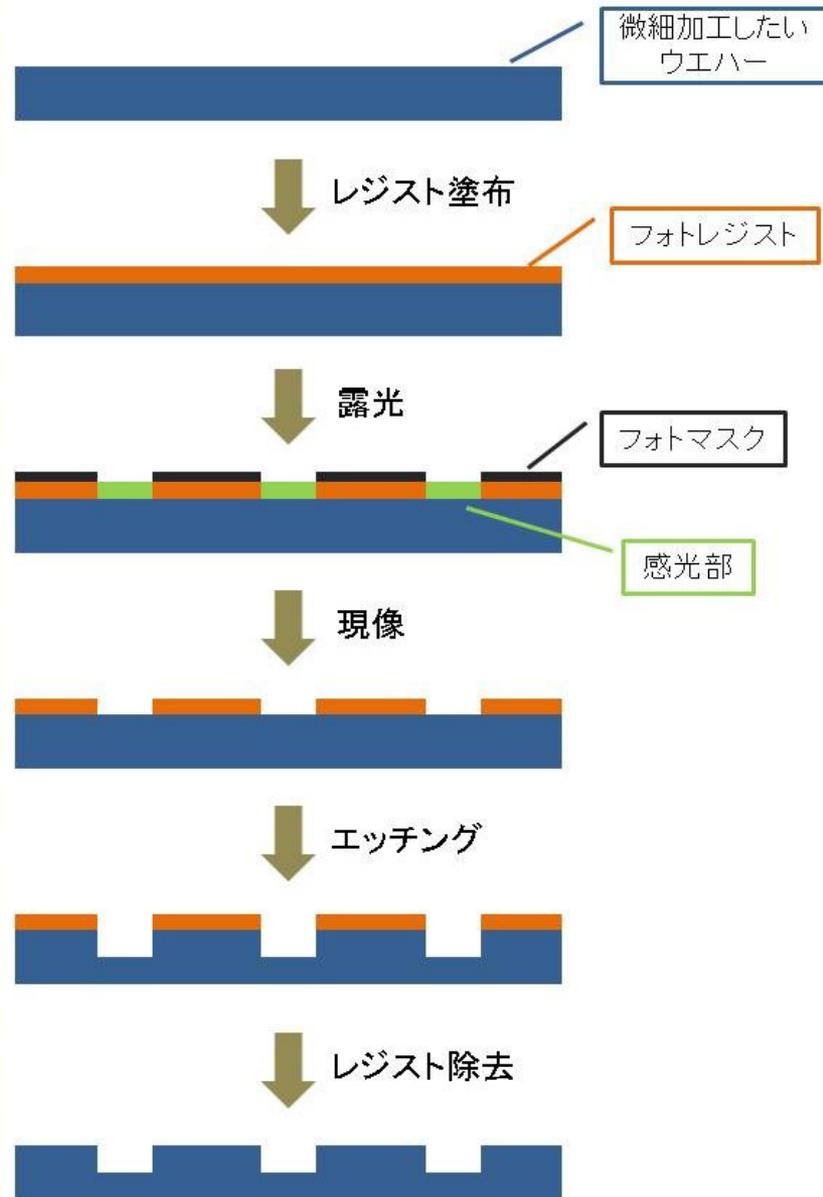
JAXA宇宙科学研究所
相模原キャンパス内の
マイクロデバイス作製クリーンルーム
にて製作



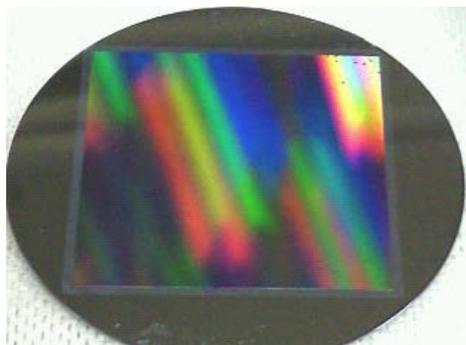
露光装置



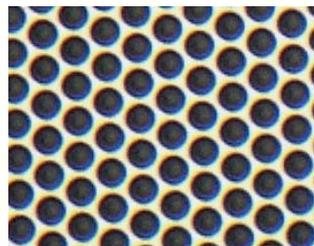
エッチング装置



作製したサブ波長中空構造



ϕ : 50mm

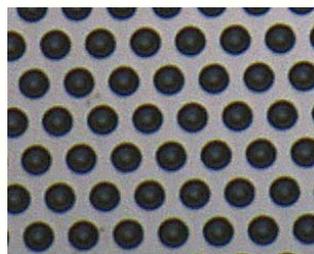


空隙率: 59%

穴の直径: $4.2\mu\text{m}$

穴の間隔: $5.2\mu\text{m}$

穴の深さ: $12.3\mu\text{m}$



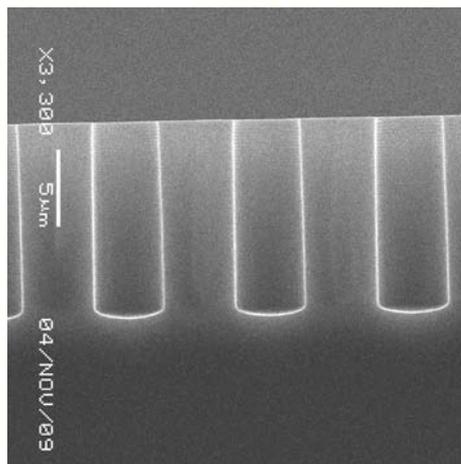
空隙率: 30%

穴の直径: $4.2\mu\text{m}$

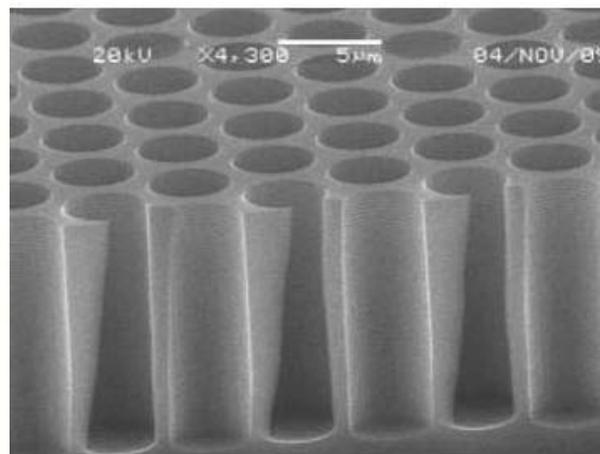
穴の間隔: $7.3\mu\text{m}$

穴の深さ: $14.3\mu\text{m}$

走査型電子顕微鏡(SEM)画像



(断面画像)



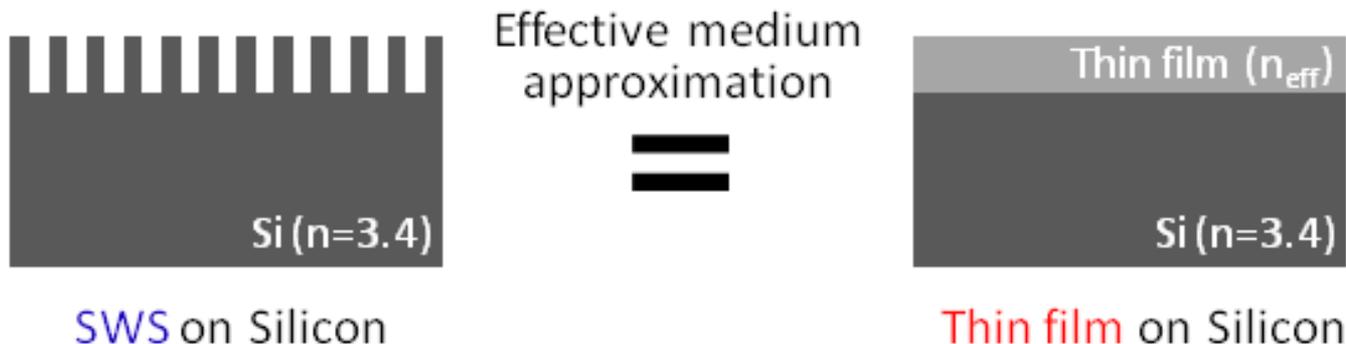
(斜め上から見た画像)

サブ波長構造による屈折率制御の検証

◆ 透過率分光特性から屈折率を求める

サブ波長構造による反射防止効果が期待できる

$$(1.0 < n_{\text{eff}} < 3.4)$$



◆ 透過率の計測

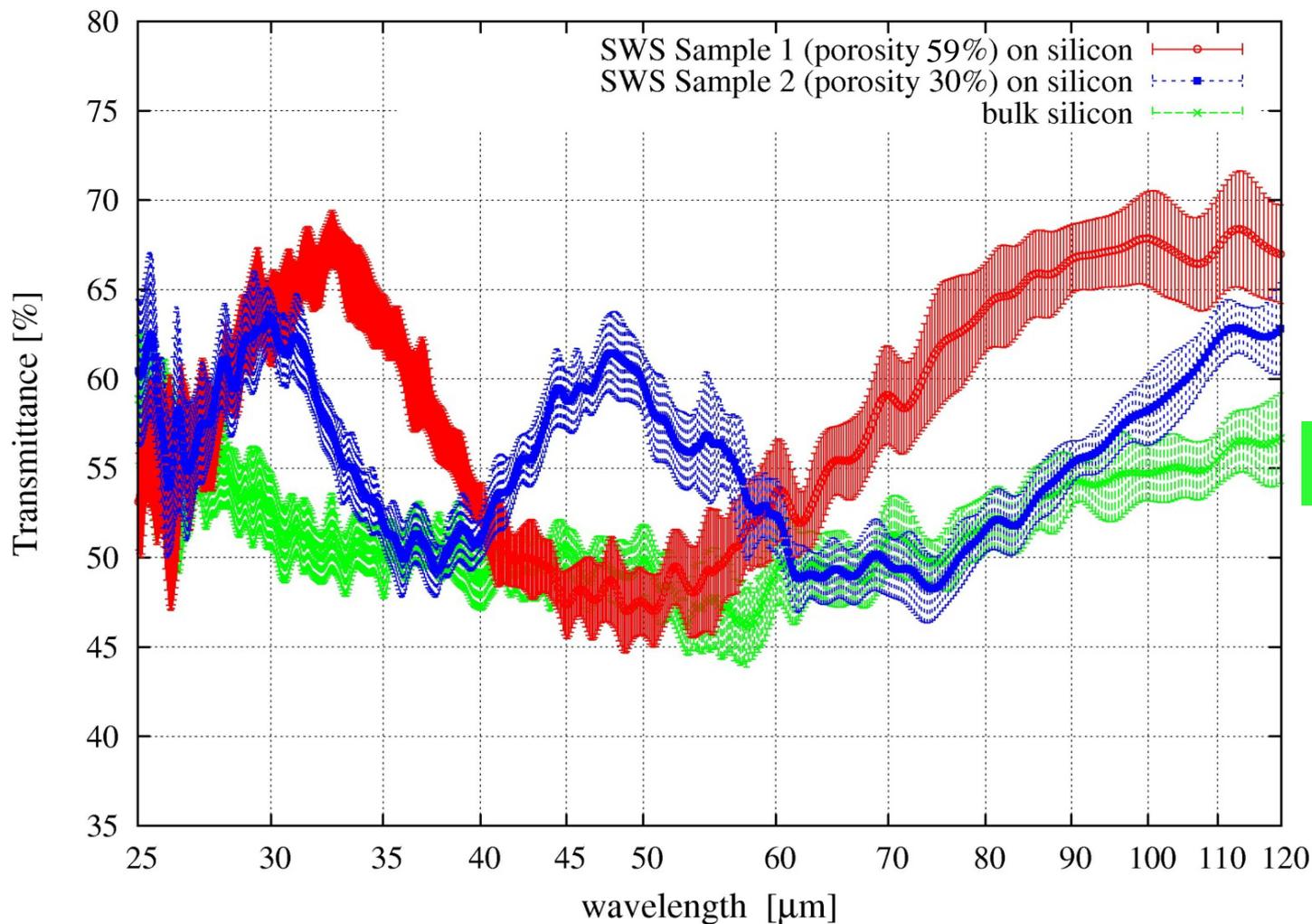
フーリエ変換赤外線分光器 (BOMEM DA8)

常温 (23°C), 真空 (0.4-0.5torr) 環境下にて測定

透過率測定結果

※透過率のピーク波長

$$n_{eff} d = \frac{1}{4} \lambda + \frac{1}{2} m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$



空隙率59%

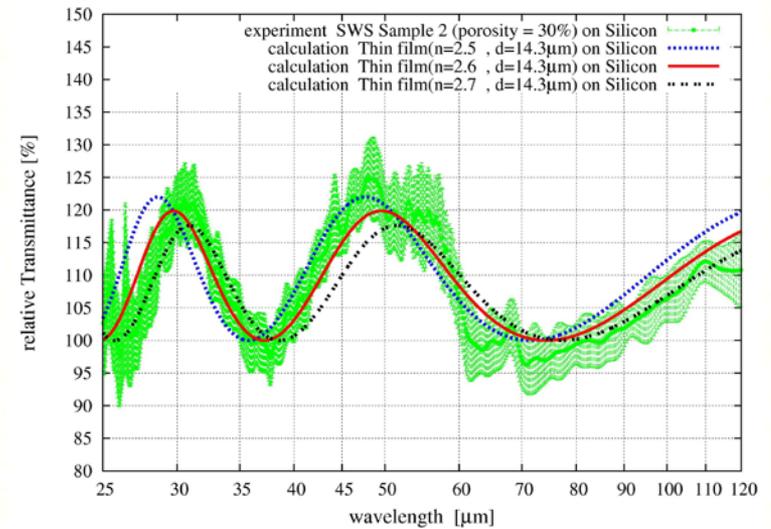
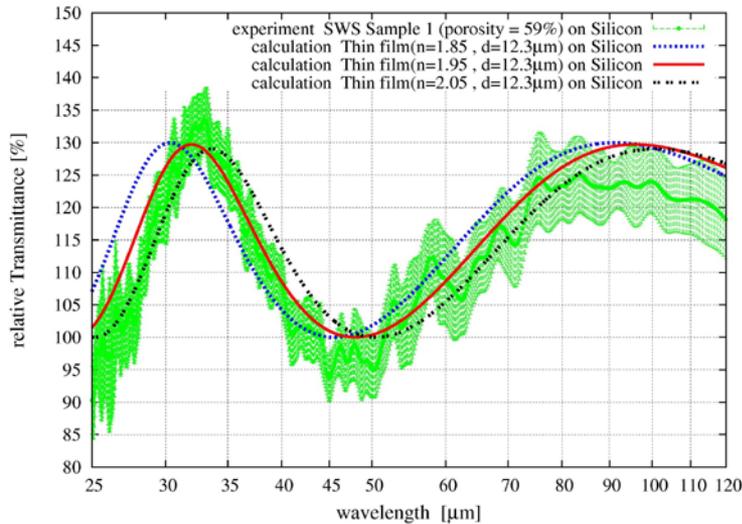
空隙率30%

バルクシリコン

屈折率制御の実証

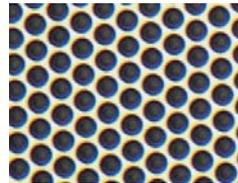
縦軸：相対透過率

= 1層SWSサンプル透過率 ÷ バルクシリコン透過率



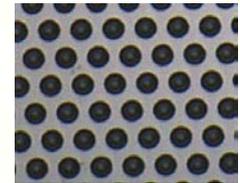
空隙率59%

⇒ $n_{\text{eff}} \sim 2.0$

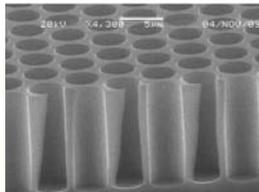


空隙率30%

⇒ $n_{\text{eff}} \sim 2.6$



規則的な縦穴構造でも、空隙率により実効的な屈折率を制御可能



Makitsubo et al., Proc. SPIE 7934, 79341C (2011)

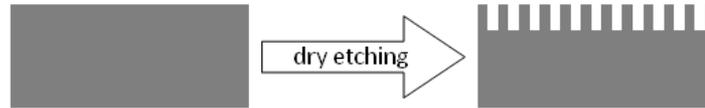
Wada et al., Appl. Phys. Express 3, 102503 (2010)

作製方針

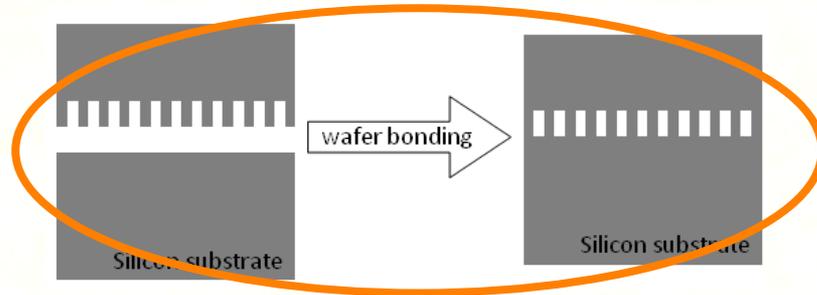
MEMS技術を用いる

(Micro Electro Mechanical Systems)

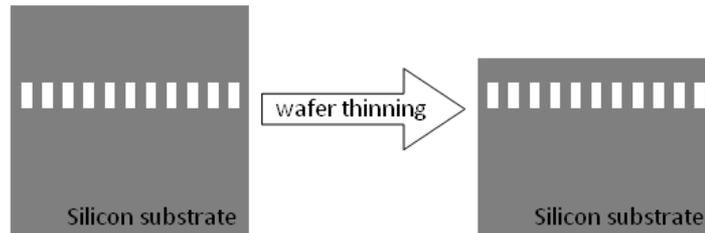
ドライエッチング



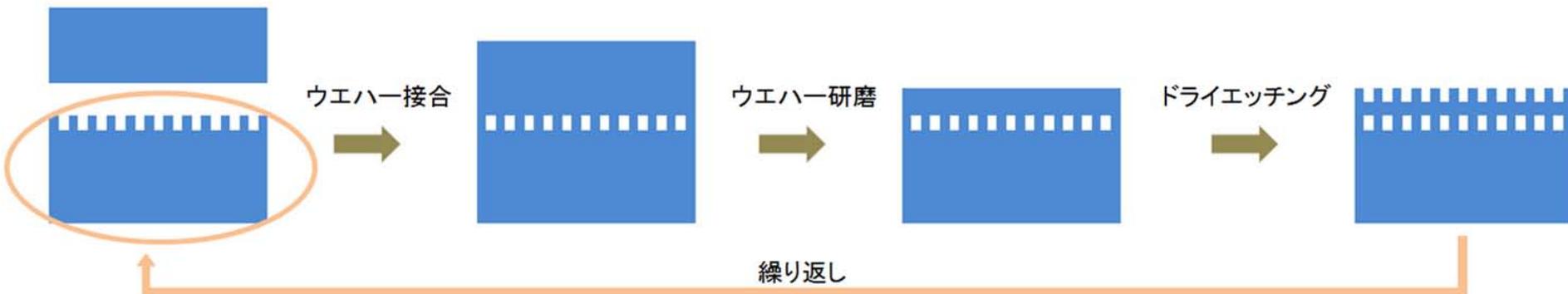
ウエハー接合



ウエハー研磨



◆ 多層化の流れ



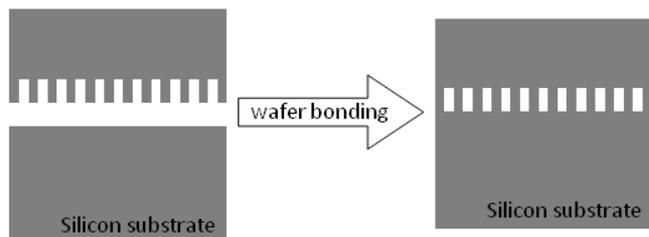
表面活性化 常温ウエハー接合

真空中でアルゴン等のイオンビームによりシリコンウエハーの酸化膜等を取り除き、シリコンの結合手がむき出しになった状態にして、ウエハー同士を貼り合わせる。

バルクと同等以上の接合強度が得られる。

Takagi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 37, 4197 (1998)

三菱重工業株式会社にて 接合を実施



次世代デバイスの信頼性・生産性向上のために

三菱MEMS用ウエーハ常温接合装置

三菱MEMS用ウエーハ常温接合装置は、加熱することなくSiウエーハ、酸化膜付ウエーハ、金属、化合物半導体などを強固に接合する装置です。MEMSのウエーハレベルパッケージングに最適な接合装置です。

用途

- ・MEMS構造体の封止
- ・貫通配線の形成されたウエーハの接合による高集積デバイスの製造
- ・熱膨張率の異なる材料を接合したデバイスの製造

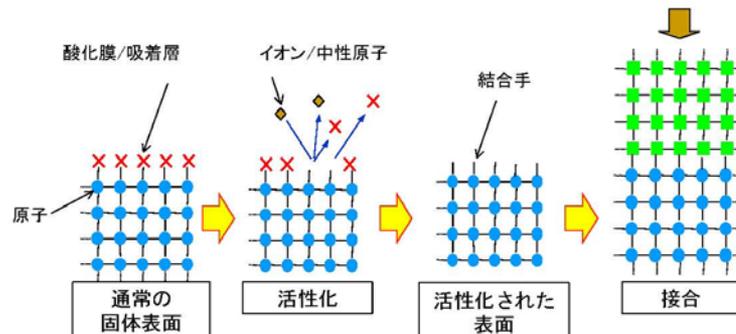


特長

- ・母材並みの接合強度を持ちます。
- ・全く熱を加えないプロセスのため、接合による熱歪み、熱応力が生じません。信頼性・耐久性の高いデバイスを製造できます。
- ・加熱・冷却時間が不要なので高いスループットを実現できます。
- ・多岐にわたる材料を接合できます。また異種材同士の接合も可能です。

原理

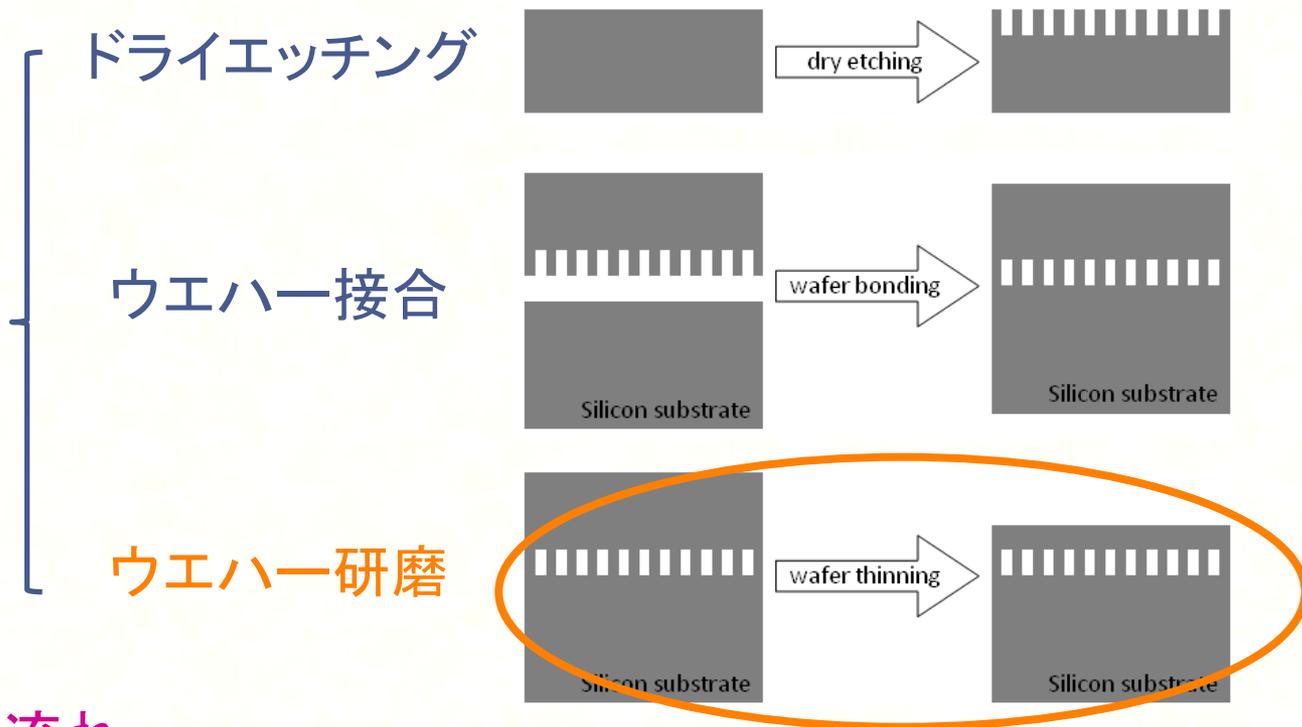
- ・真空中で固体表面をイオンビームにより活性化することにより、本来物質が持っている結合手を生成し接合を行います。



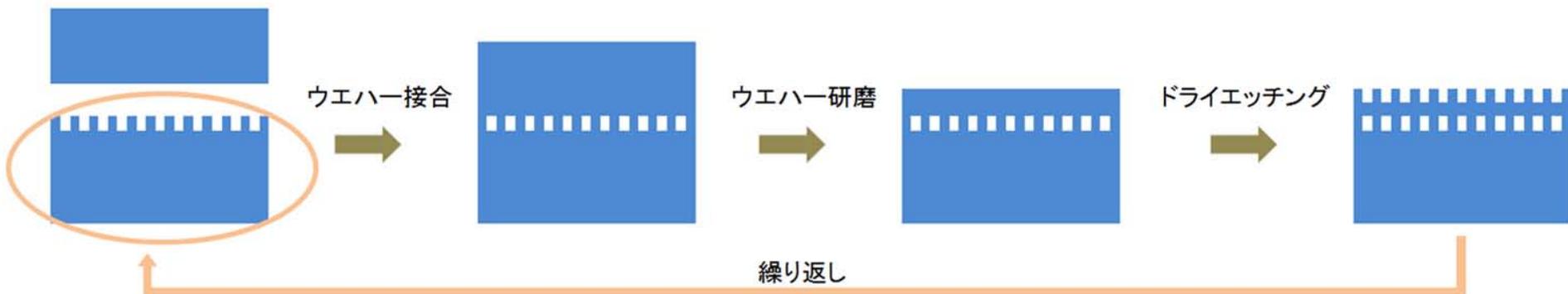
作製方針

MEMS技術を用いる

(Micro Electro Mechanical Systems)



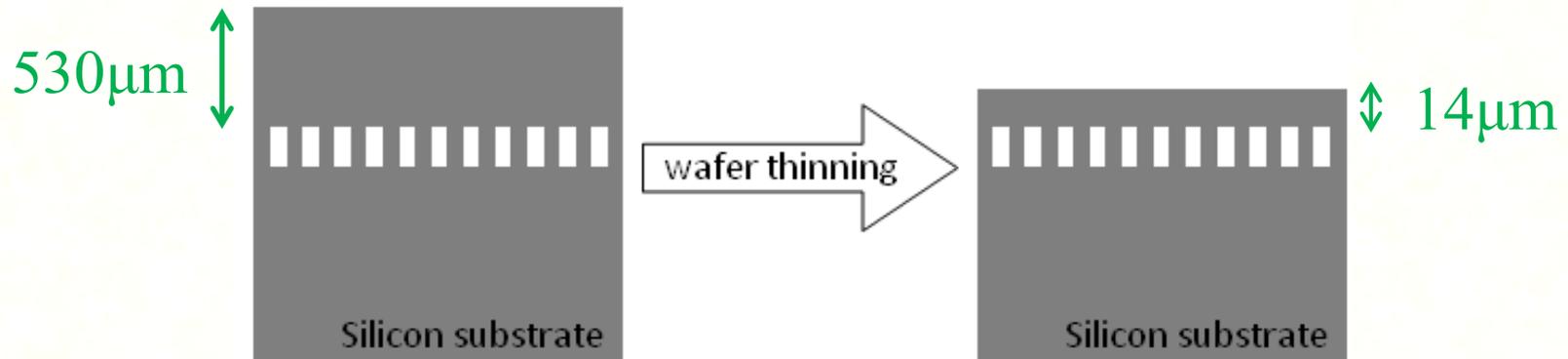
◆ 多層化の流れ



ウェハー研磨

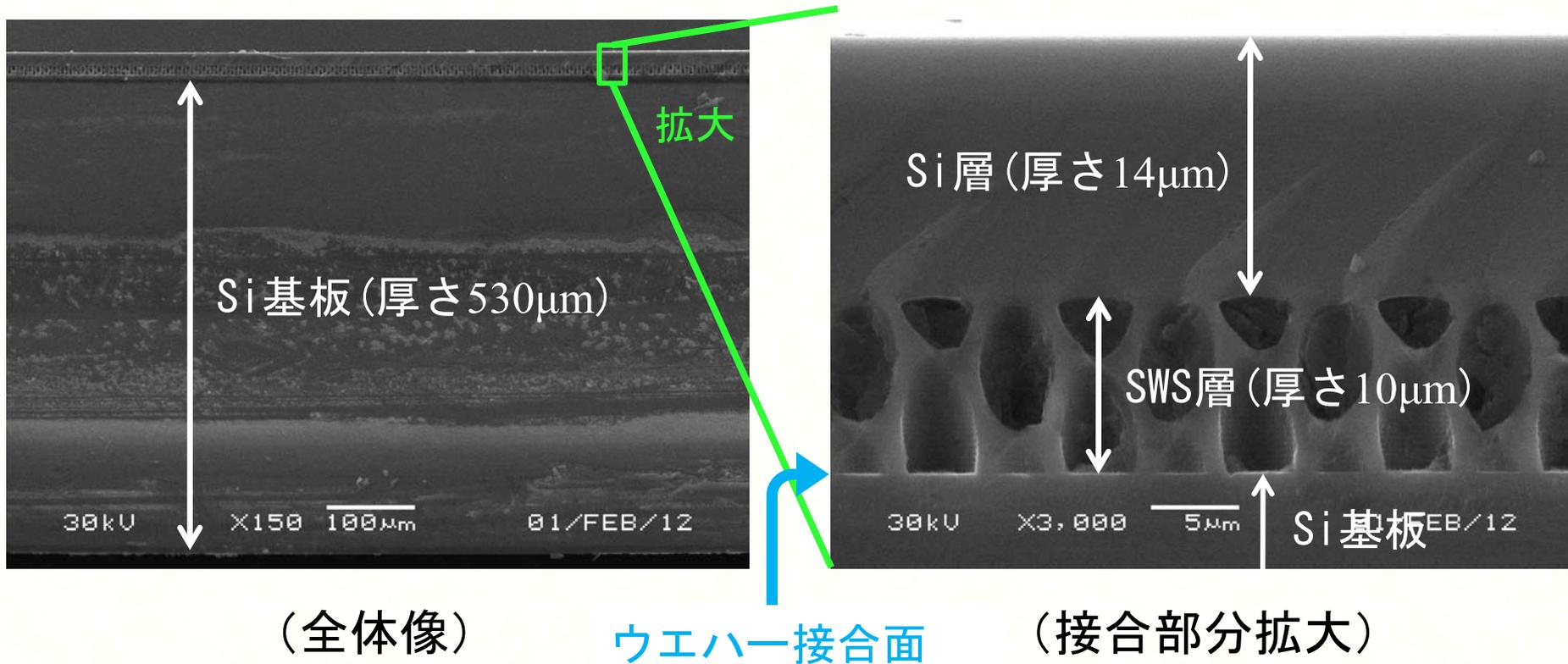
- ◆ ダイヤモンド微粒子(粒径 $9\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$)による機械的研磨
- ◆ コロイダルシリカによるCMP(化学機械研磨) → 鏡面仕上げ

JAXA宇宙科学研究所
相模原キャンパス内の
クリーンルームにて研磨を実施



接合サンプルの断面画像

走査型電子顕微鏡(SEM)画像



2層干渉フィルター(基板 | SWS層($n=2.0$ $d=10\mu\text{m}$) | Si層($n=3.4$ $d=14\mu\text{m}$))
として機能することが期待できる

➡ 波長透過特性を測定して検証(常温環境下)

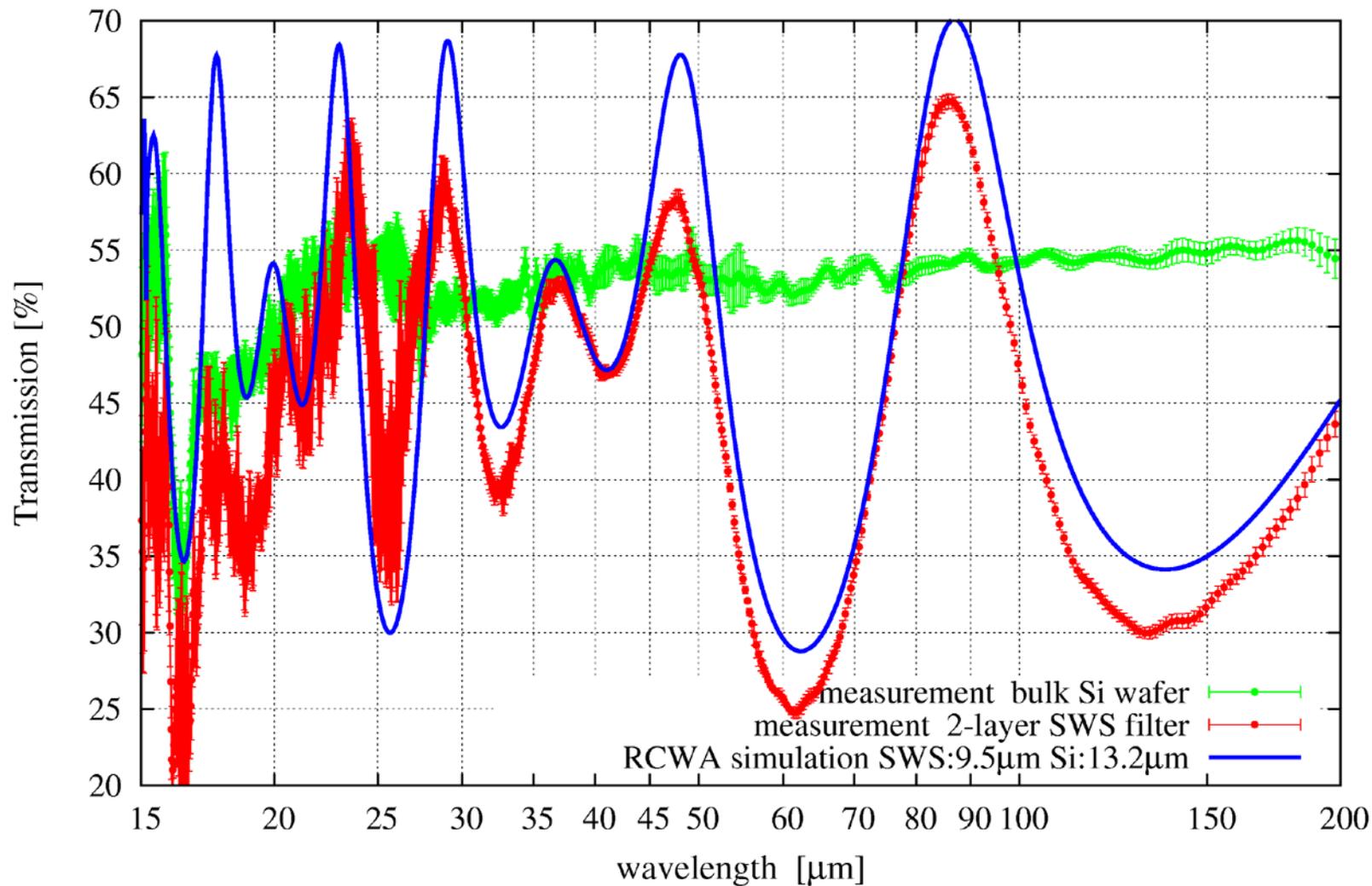
透過率測定結果

測定値

電磁場シミュレーション

R-Soft社(DiffractMOD)

Mercury, HyperSplitter, DTGS: Ap 7mm, Sp 0.15cm/s, Res 4, Gain 4, 0.16-0.16torr, 12/01/25



まとめと今後

- 高性能かつ耐環境性能に優れた赤外線フィルターを開発する
 - 単一材料のみで多層干渉フィルターを構成する
 - 屈折率の制御はサブ波長構造を導入することで行う
- サブ波長構造による屈折率制御を実証
- 表面活性化常温ウエハー接合、ウエハー平坦化研磨技術を用いて、2層構造の干渉フィルターを製作

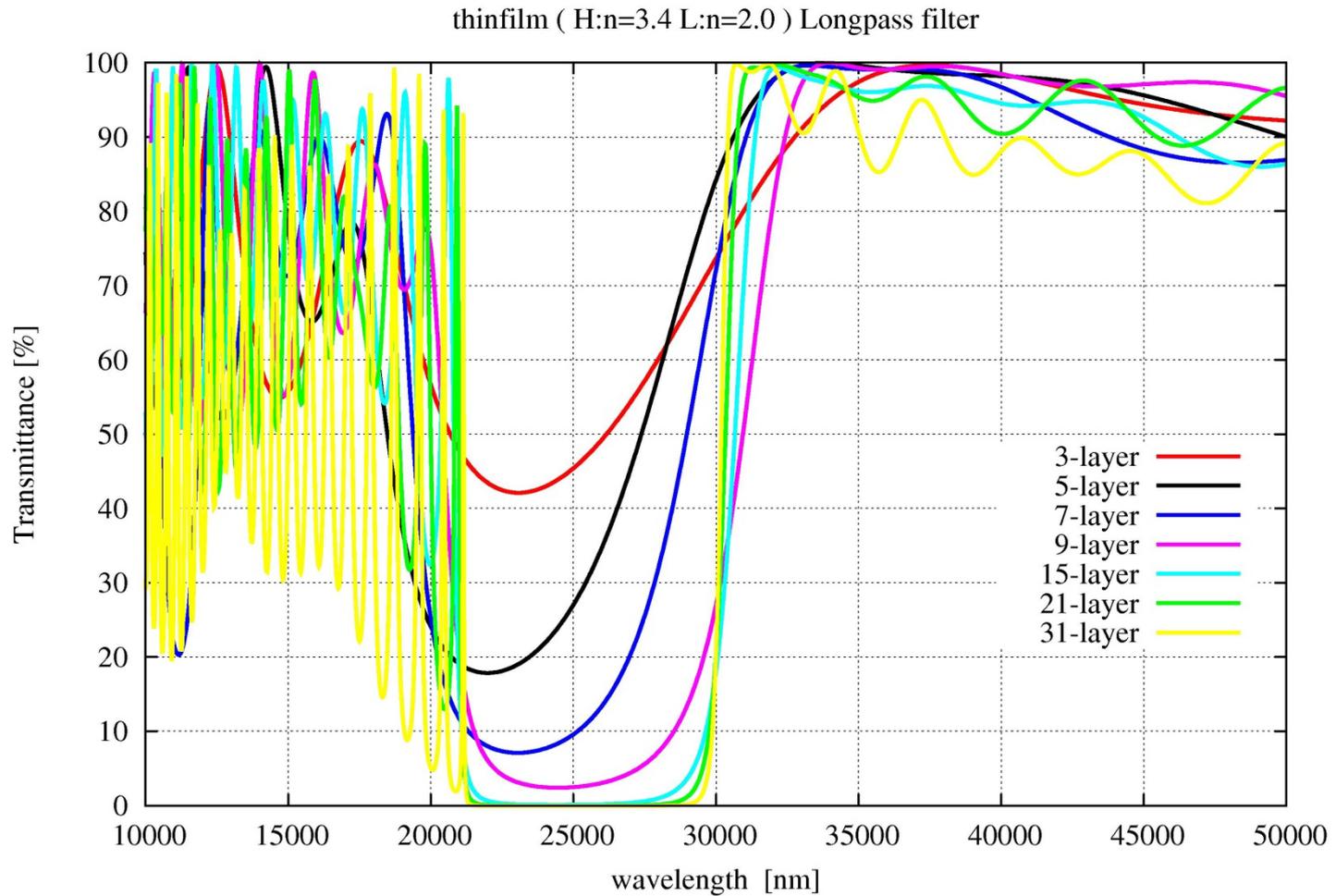
- ◆ さらにドライエッチングを行い、3層構造の干渉フィルターの作製



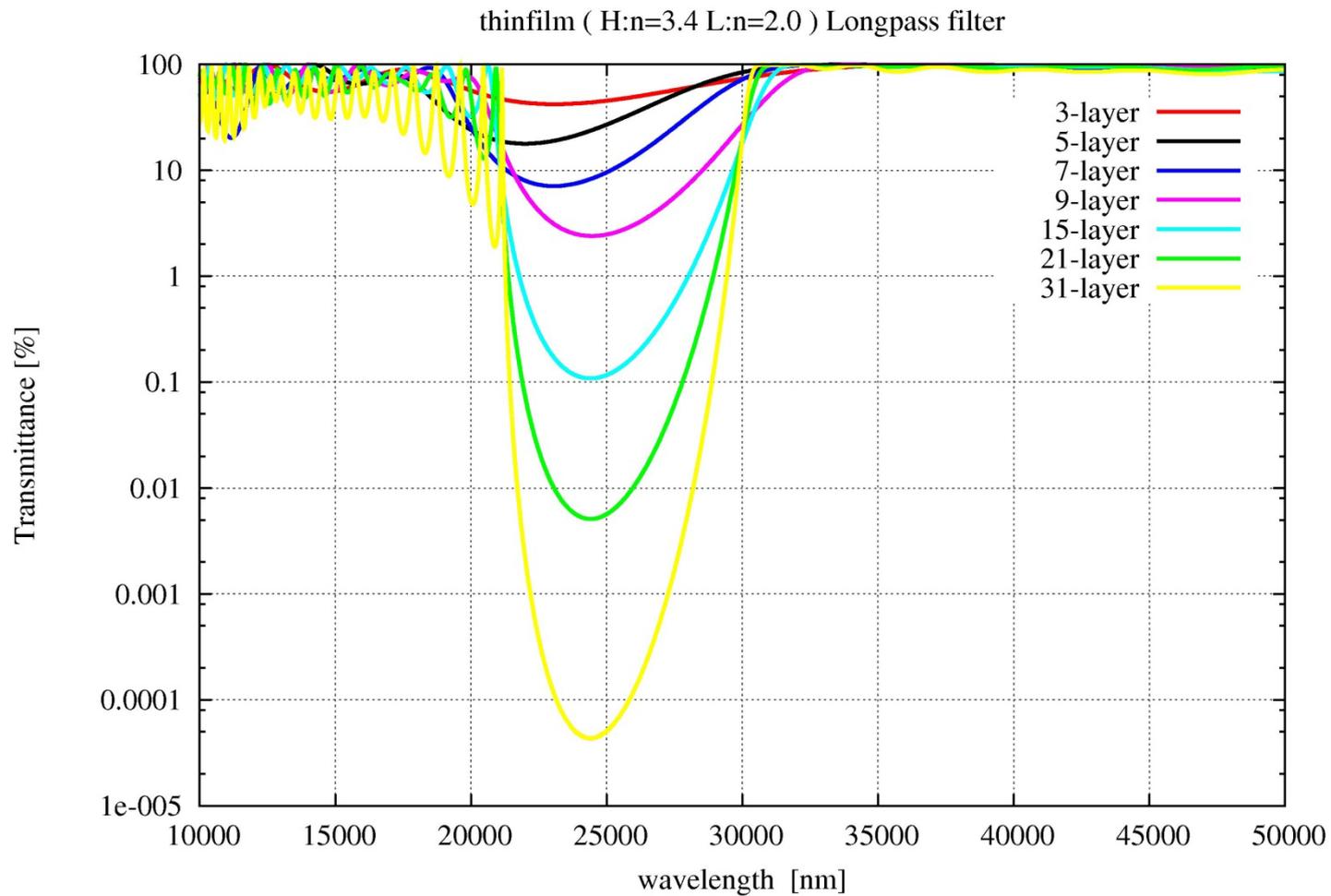
SWS層を複数含む場合でも、有効媒質近似が成立して、多層干渉フィルターとして機能することの実験的実証を行う

- ◆ 極低温環境下での耐環境性のテスト

層数の見積もり

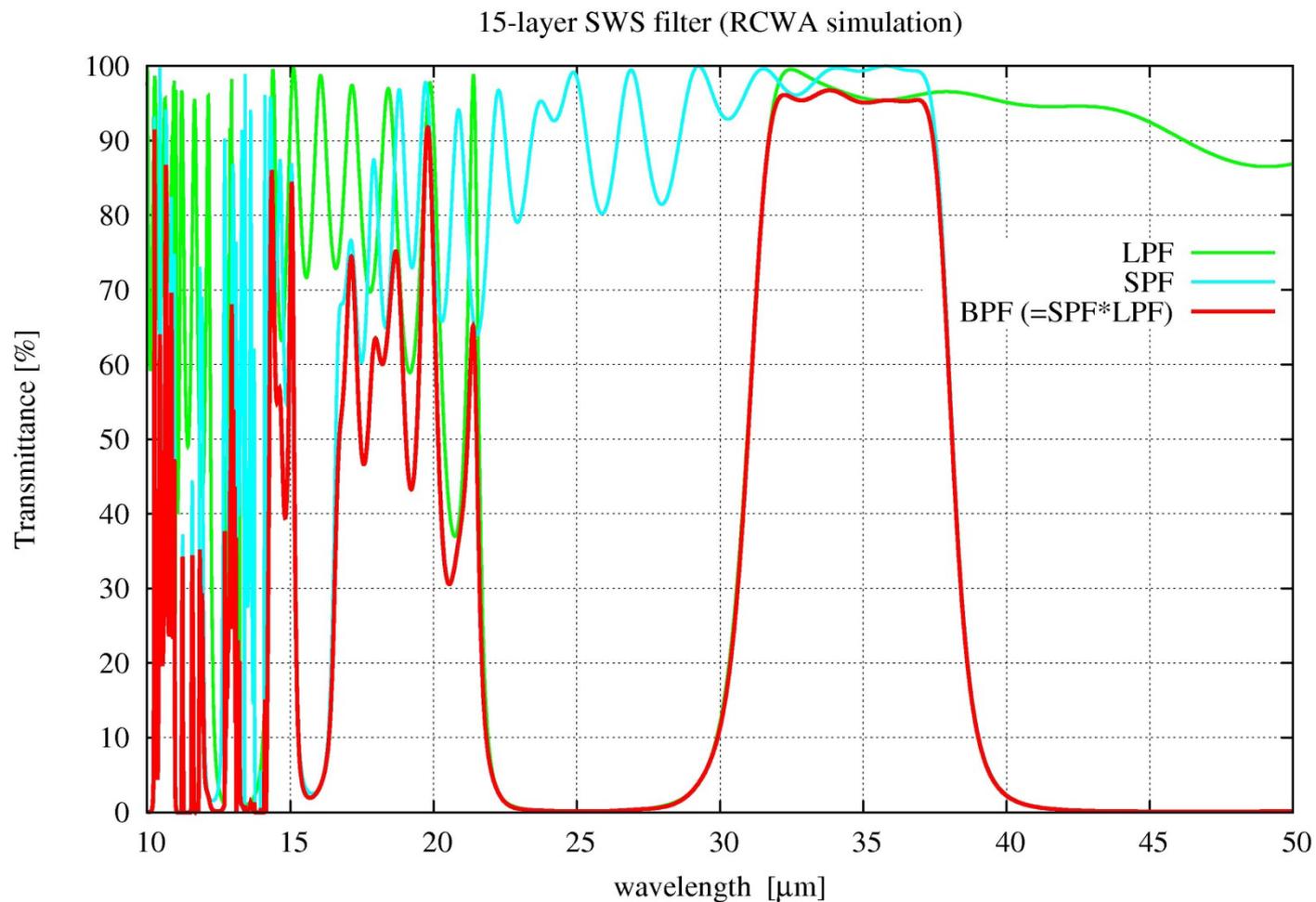


層数の見積もり



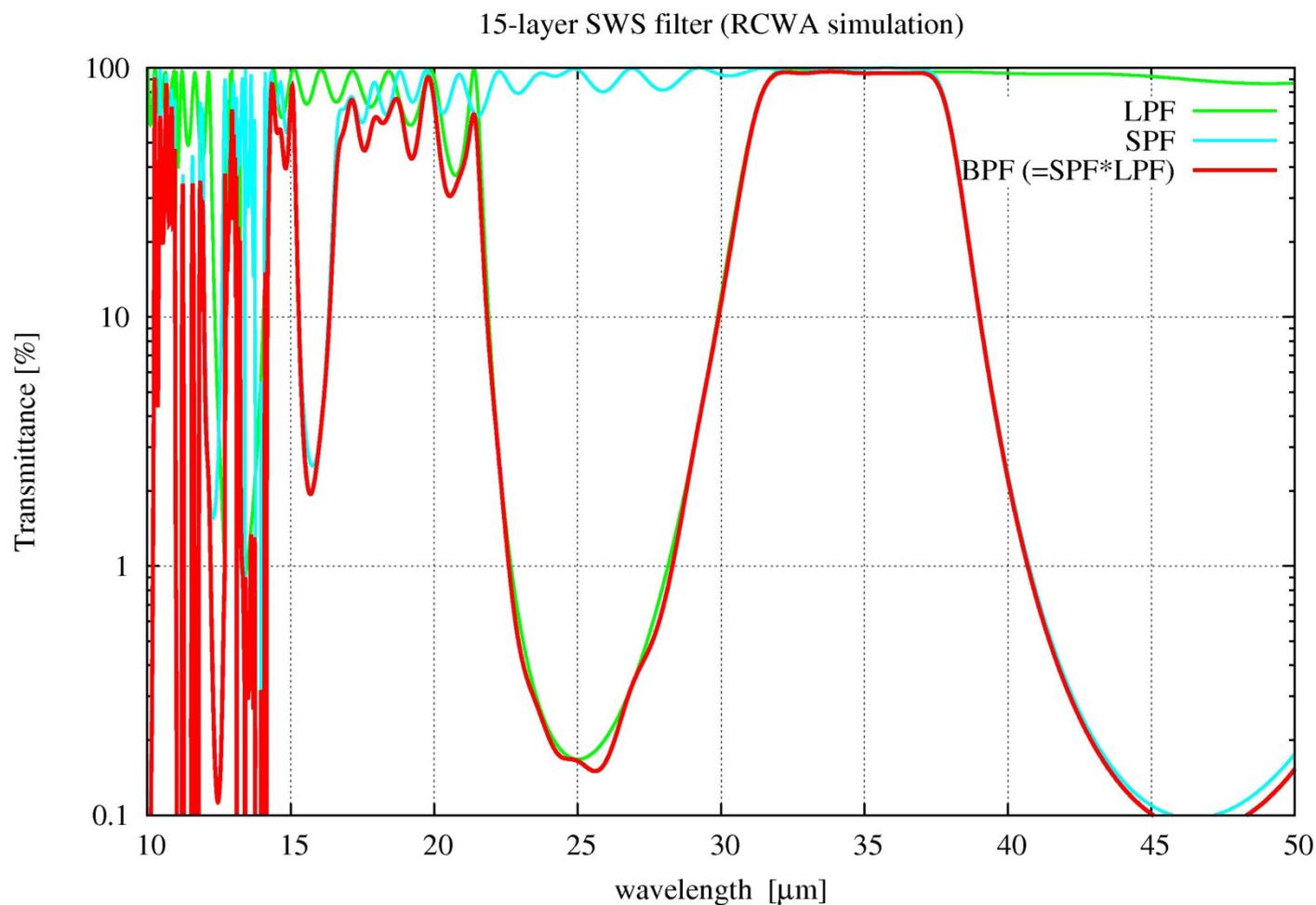
設計例 (15層×2)

- ◆ ロングパス(15層)とショートパス(15層)によるバンドパスフィルター

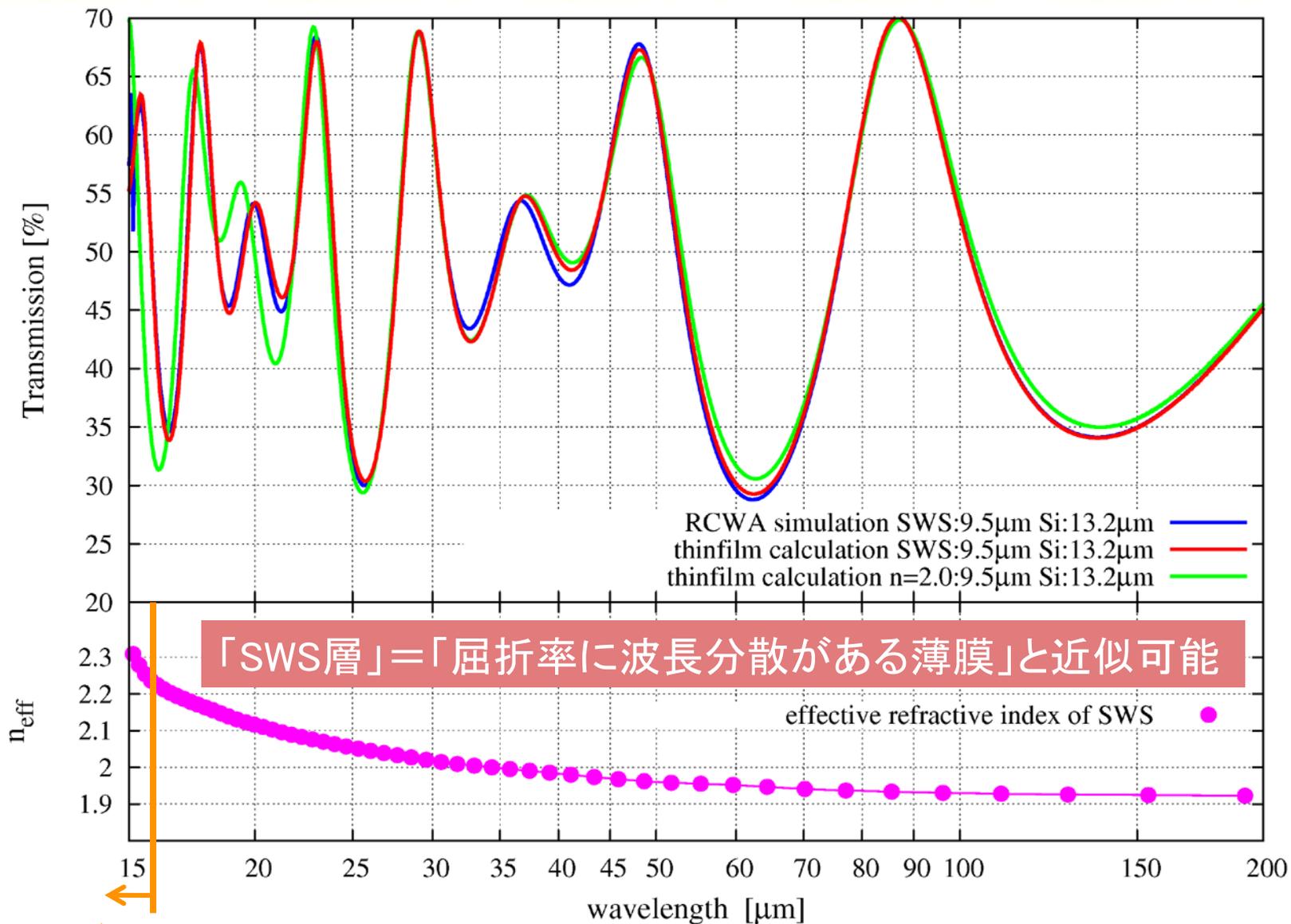


設計例 (15層×2)

- ◆ ロングパス(15層)とショートパス(15層)によるバンドパスフィルター



薄膜計算と電磁場シミュレーションの比較



回折光が発生