

無反射多層基板を用いた 光学的精密計測

神戸大学 大学院工学研究科

電気電子工学専攻

准教授 服部 吉晃

2024年10月17日

研究背景と従来技術

革新的なナノ計測技術は、あらゆる分野の先端技術開発に必要

従来のナノ計測法

X線	XPS、XRD
電子線	SEM、TEM
光	ラマン分光、FTIR、エリプソメーター
探針顕微鏡	STM、AFM

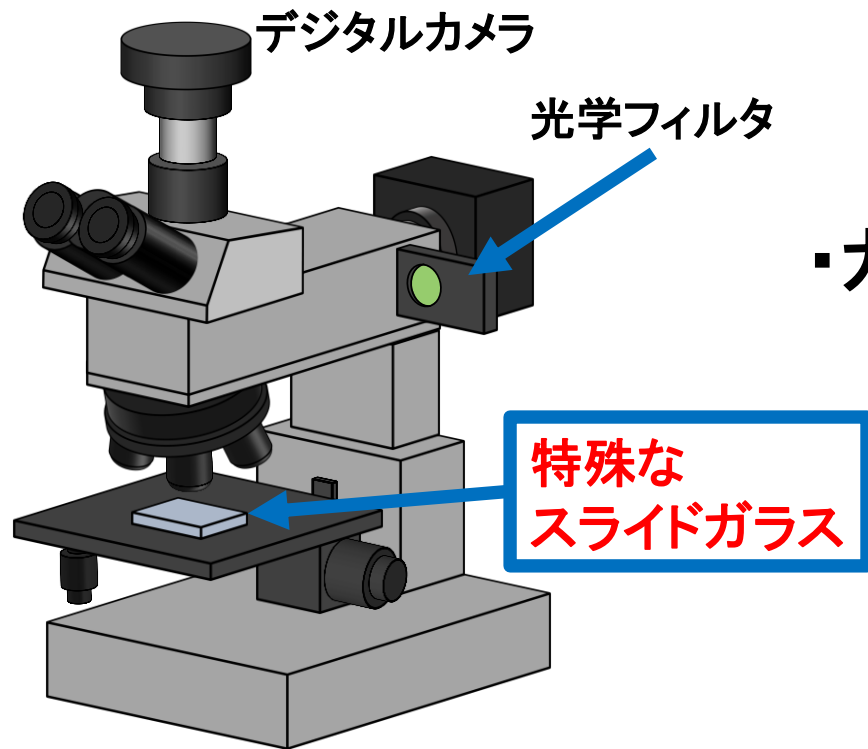
■ 近年の動向

計測技術は日々進歩していくが、高度な計測法になればなるほど…

- ・分析が複雑
- ・導入コスト大
- ・維持費大
- ・装置大型化

本技術の特徴

気軽に原子や分子が見られる手法を開発し、
基礎研究や応用研究に貢献したい



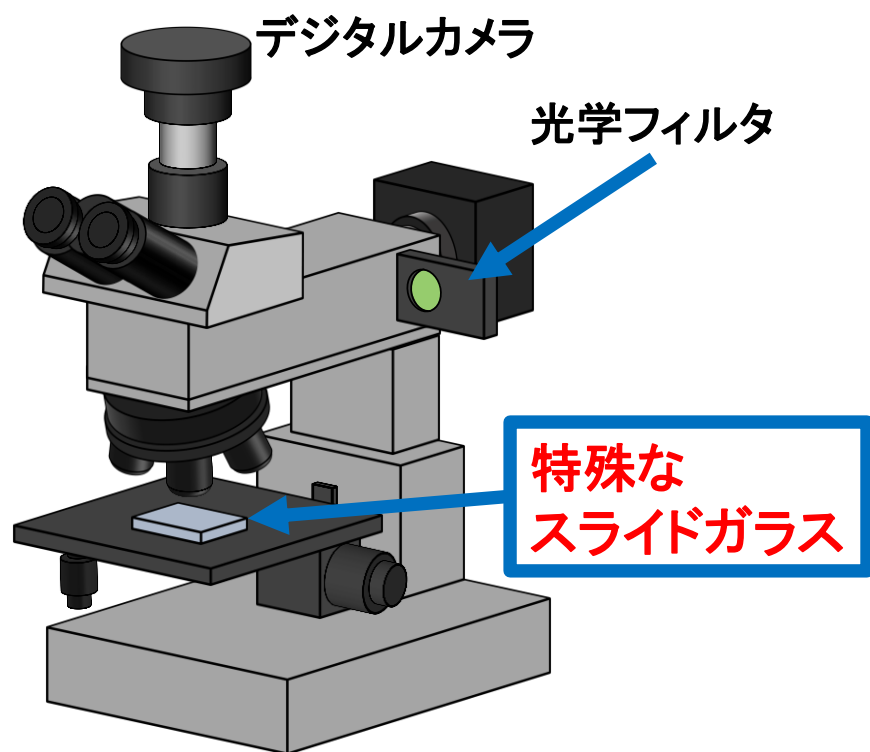
・カメラのシャッターボタンを押すだけ

本技術

一般的な光学顕微鏡とカメラを使い
原子レベルの変化を光学的に検出・イメージングする技術

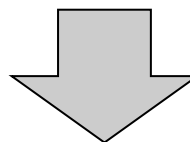
実用化の展望

原子レベルの観察を光学顕微鏡で行うためのスライドガラスの開発



ユーザー

一般的な光学顕微鏡を使い、簡単分析。
観察に適した特殊なスライドガラスを購入



作製するのは難しい
用途に応じて選択・購入

サプライヤー

・様々な用途に応じたスライドガラスを販売

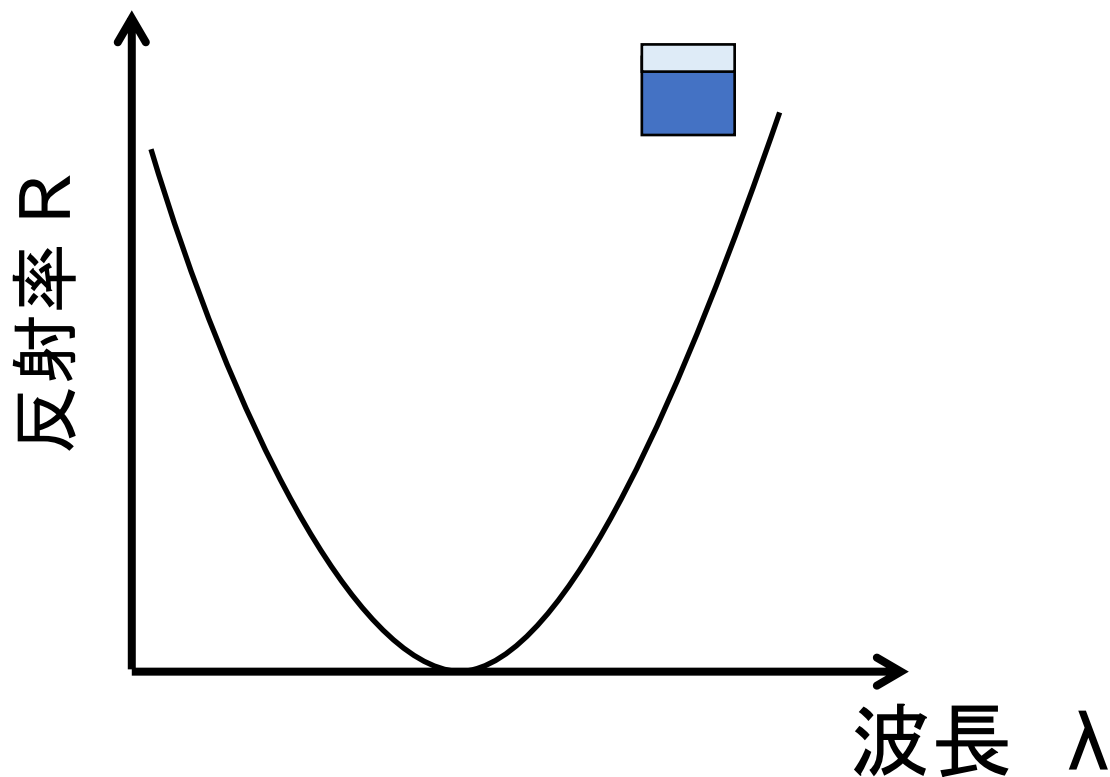
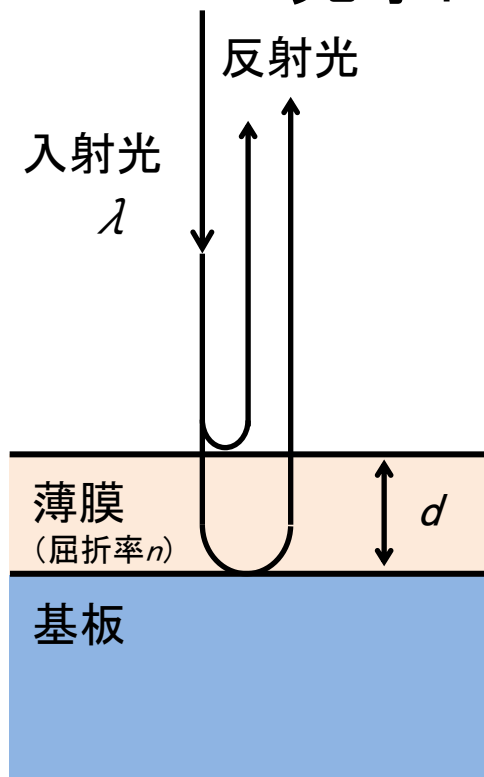
例) 表面酸化観察用スライドガラス
ナノ粒子固定スライドガラス

世界の顕微鏡用スライドガラスの市場規模

2022年の200-700億円 2029年までに4%拡大予想

本技術の原理

光学的干渉効果を用いた極薄膜の検出

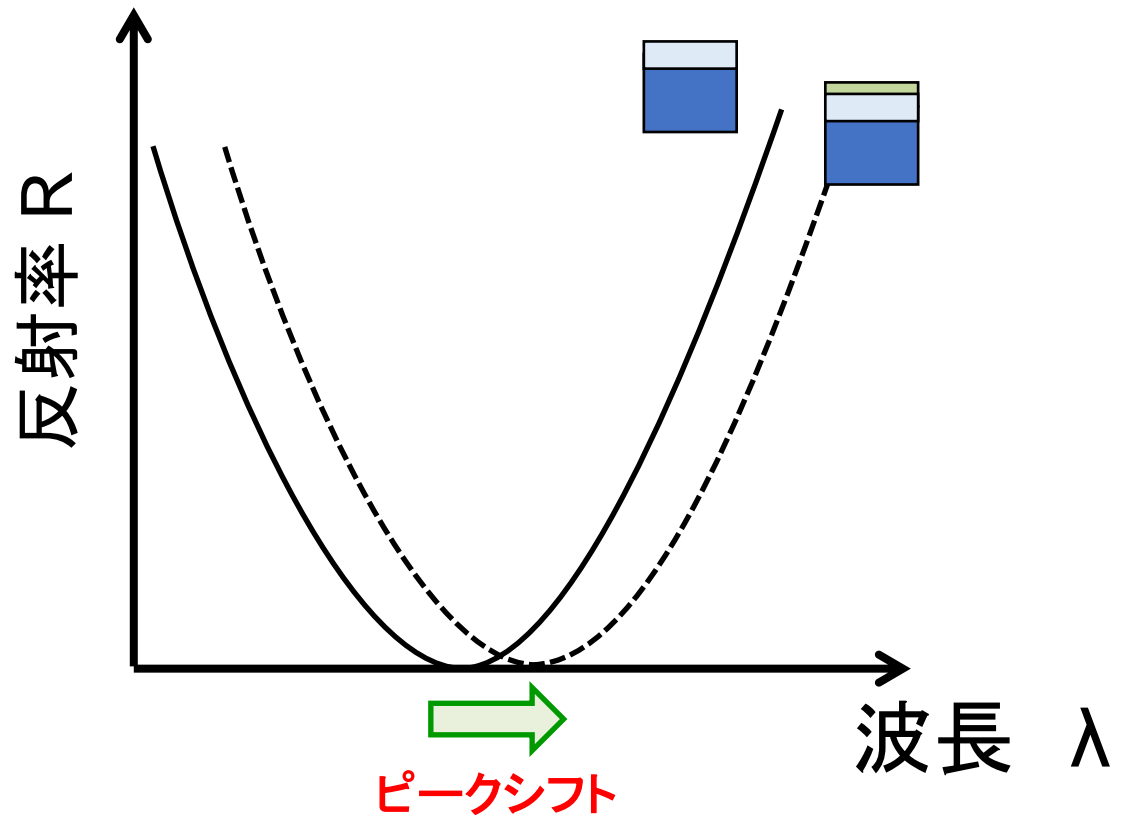
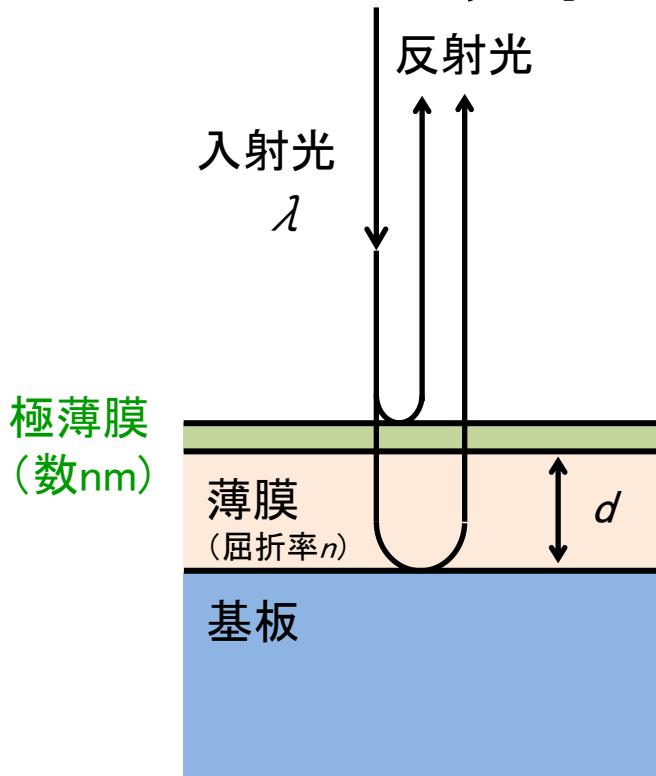


高校物理

光路差 $2nd$ に対する波長 λ の関係で
反射光の強めあい・弱めあいが起こる

本技術の原理

光学的干渉効果を用いた極薄膜の検出



高校物理

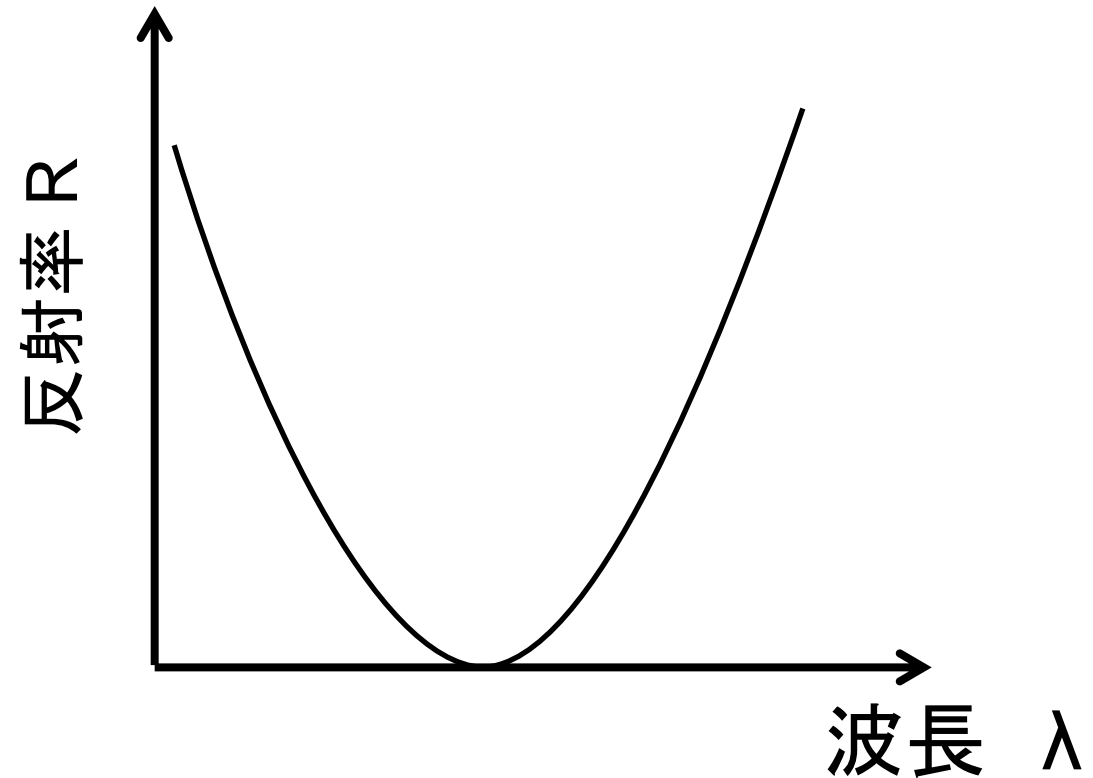
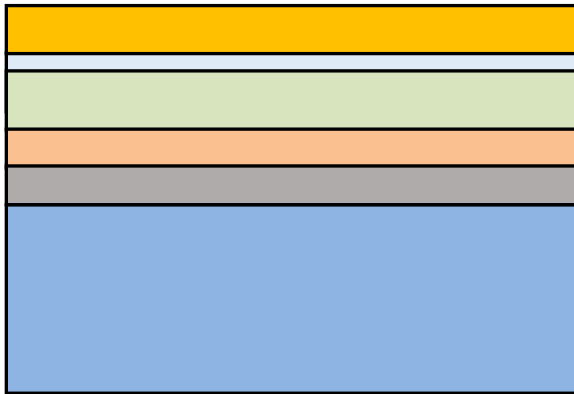
光路差 $2nd$ に対する波長 λ の関係で
反射光の強めあい・弱めあいが起こる

光路差が少し長くなったので
長波長側にシフト
(基板の色が少し変わる)

本技術の原理

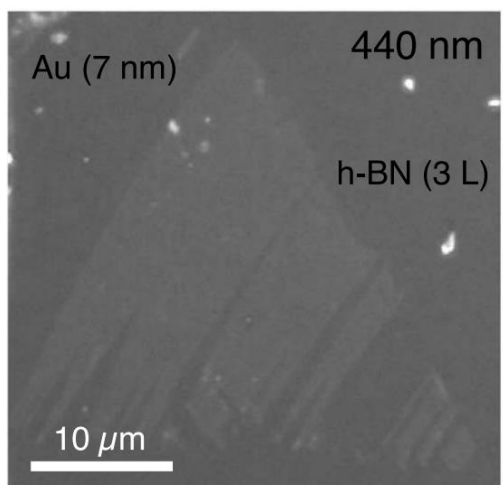
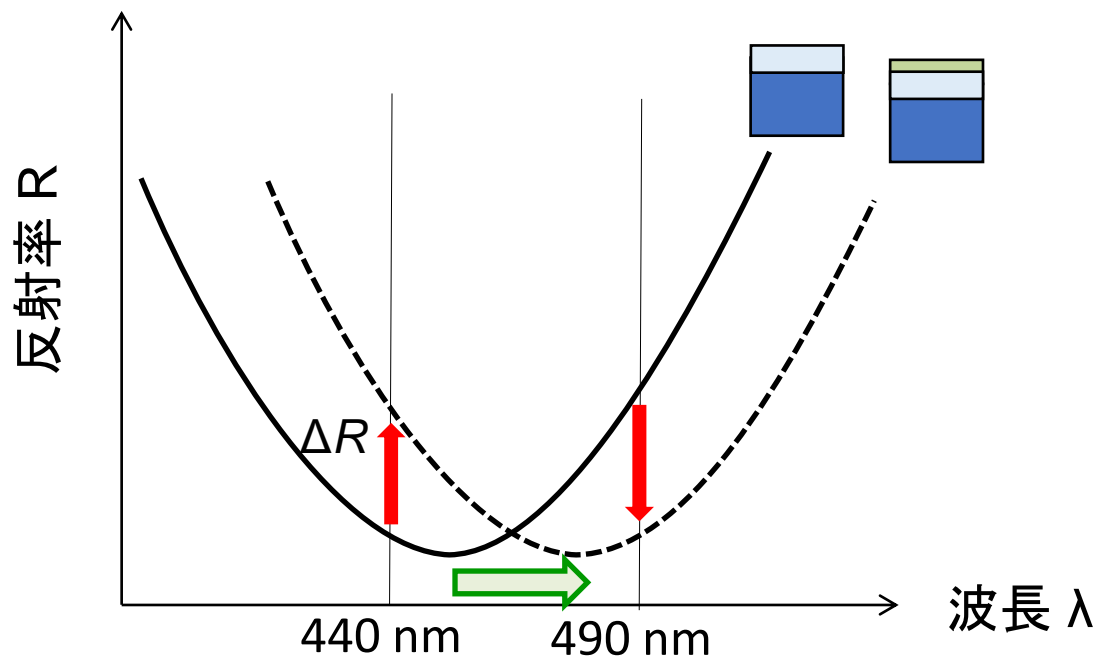
光学的干渉効果を用いた極薄膜の検出

緻密に光学設計された
無反射多層基板

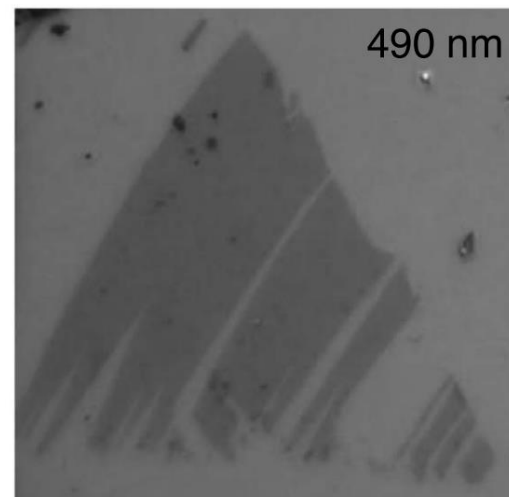
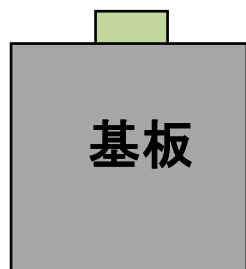


無反射多層基板の設計と利用が本技術のポイント

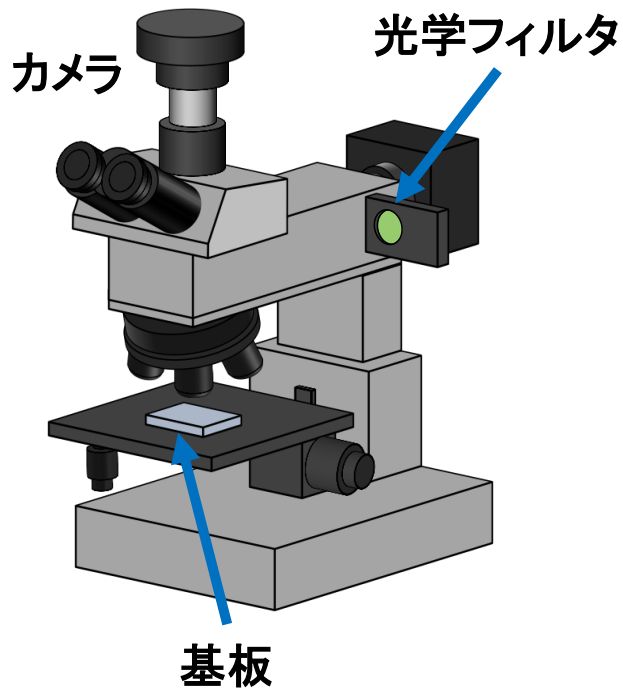
極薄膜のイメージング



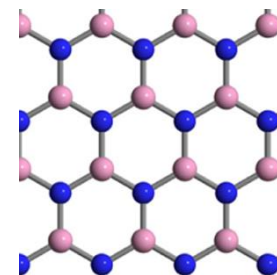
1 nmの透明な膜
hBN (層状材料)



単原子膜のイメージング

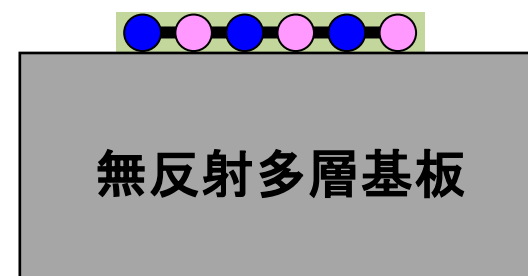


hBN (層状材料、グラフェンの仲間)



上から見た図

単原子膜

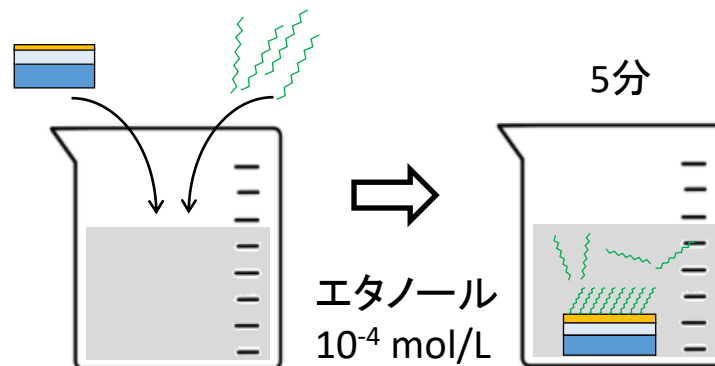
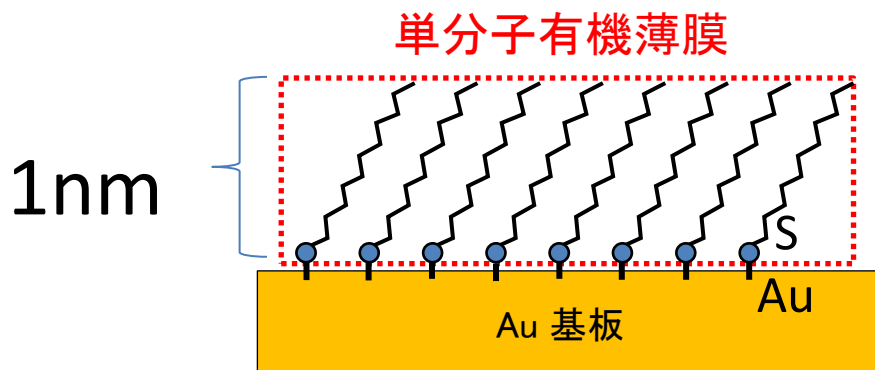


市販の一眼レフカメラで撮影(画像処理なし)

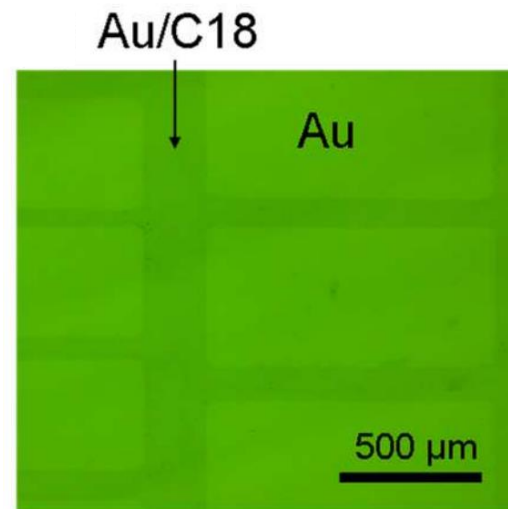
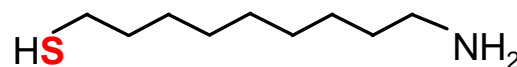
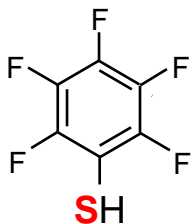
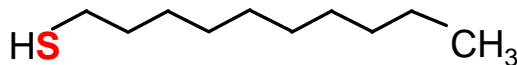
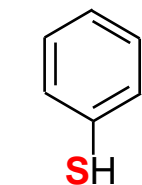
従来技術では可視化は困難だった材料

透明な厚さ 0.3nmの膜が
一般的な光学顕微鏡のシステムで簡単に観察できる

単分子膜のイメージング

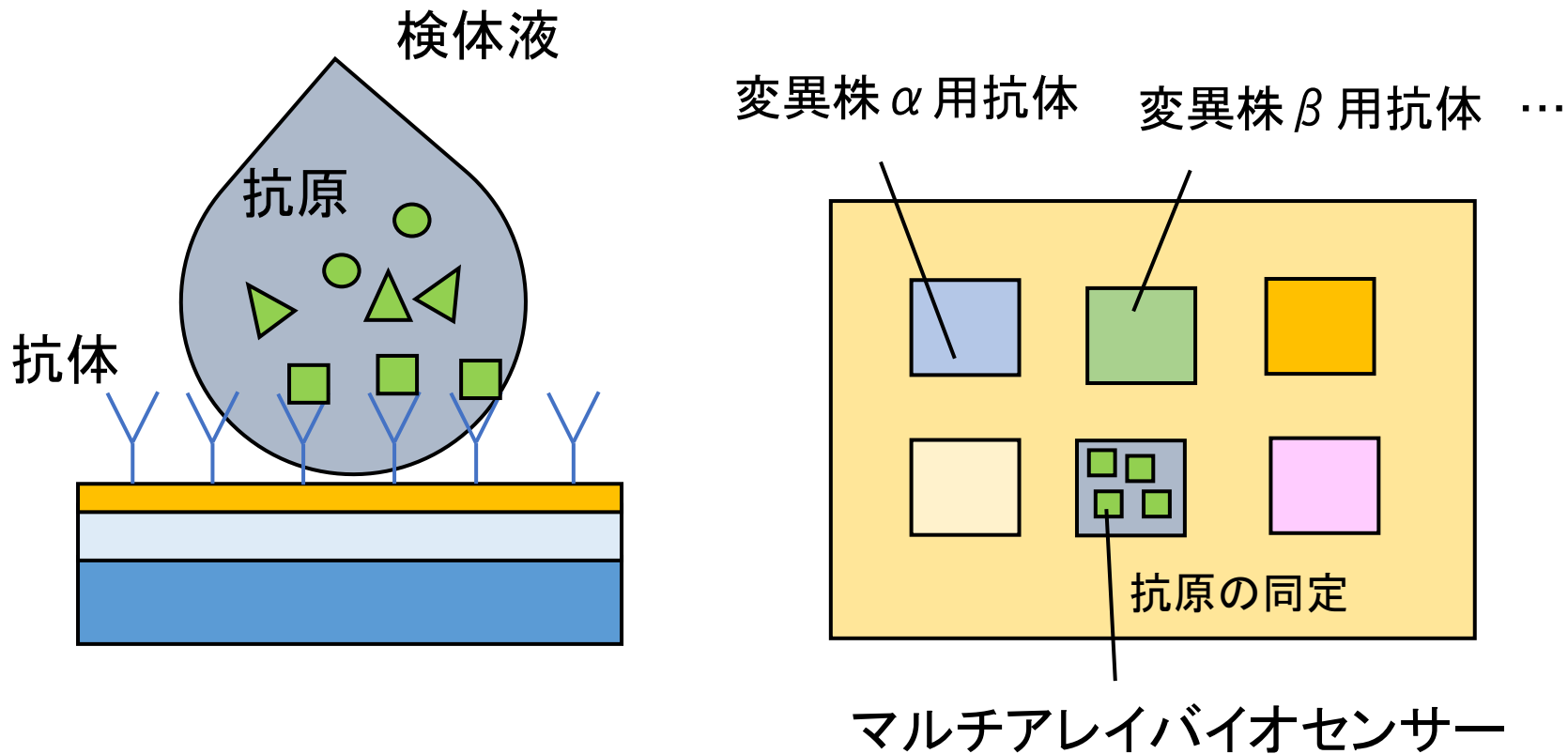


チオール有機分子



単分子膜ならもっと簡単に観察できる

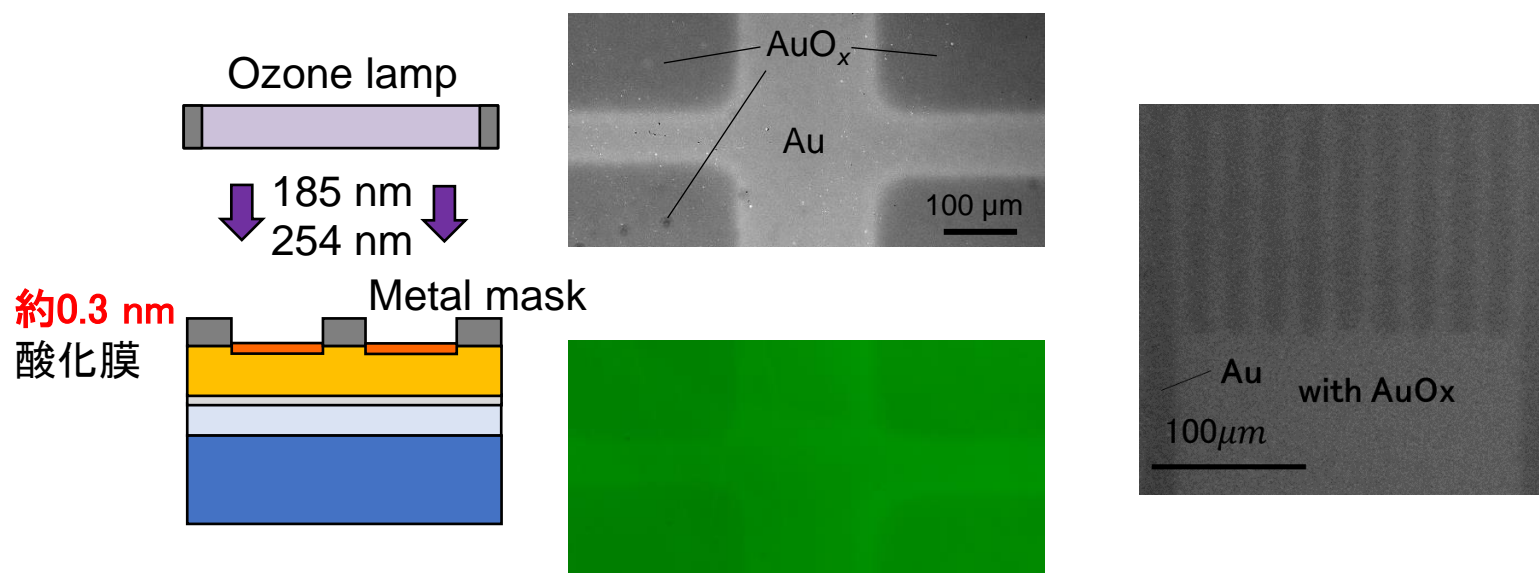
バイオサイエンスへの応用



ある特定のウイルスだけ吸着するチオールが市販されている

酸化還元反応の可視化

Au表面の酸化/還元反応の可視化



通常では見えない、0.3nm程度の不安定な表面酸化と還元現象を可視化

化学反応をリアルタイムで原子レベルで可視化

本技術の特徴

一般的なスライドガラスと同じ様な使い方で、簡便にナノ観察が可能

1. 汎用の光学顕微鏡とデジタルカメラが利用可能

⇒ ユーザーは適切なスライドガラスを買って観察するだけ

2. 非破壊 非走査 リアルタイム顕微測定

⇒ カメラのシャッターボタンを押すだけでOK

⇒ 複雑な分析装置に代わる、迅速・簡易手法

3. 大気圧測定、暗室、防振装置も不要

⇒ 導入コストゼロ



従来技術との比較

手法	特徴	分解能
XPS、FTIR	極薄膜の組成由来のシグナルを直接計測	面内分解能 ~ 1 μm
顕微ラマン		
水接触角測定	物理的、化学的な表面の物性変化を計測、間接的な膜評価	
表面プラズモン共鳴法	高速、経時変化	
本手法	簡便、高速、経時変化、大気圧測定	面内分解能 ~ 300 nm 垂直分解能 ~ 0.05 nm
白色顕微鏡	膜厚評価、イメージング可能	面内分解能 ~ 300 nm 垂直分解能 ~ 0.1 nm
X線反射率法	モデル依存性、表面粗さ	垂直分解能 ~ 0.5 nm
エリプソメーター		垂直分解能 数nm
AFM	段差、力学特性、電気特性の評価可能、イメージング可能	面内分解能 ~ 1 nm 垂直分解能 ~ 0.1 nm

本手法の技術的ポイント(1)

スライドガラス表面の感度を極限に高める、**無反射多層基板の開発**

薄膜蒸着技術と光学設計

(1) 安定かつ平坦に作製する蒸着技術



(2) 光学設計技術

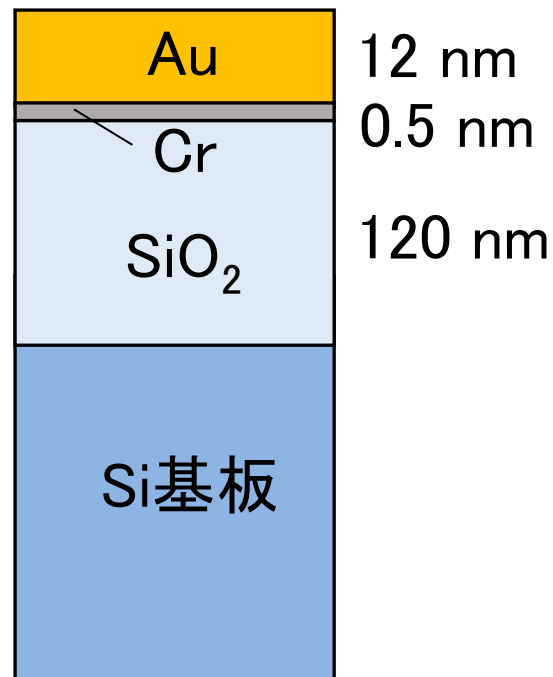
各層の厚さと順番

無反射多層基板の表面を任意材料で設計する手法

本手法の技術的ポイント(2)

優れた無反射多層基板

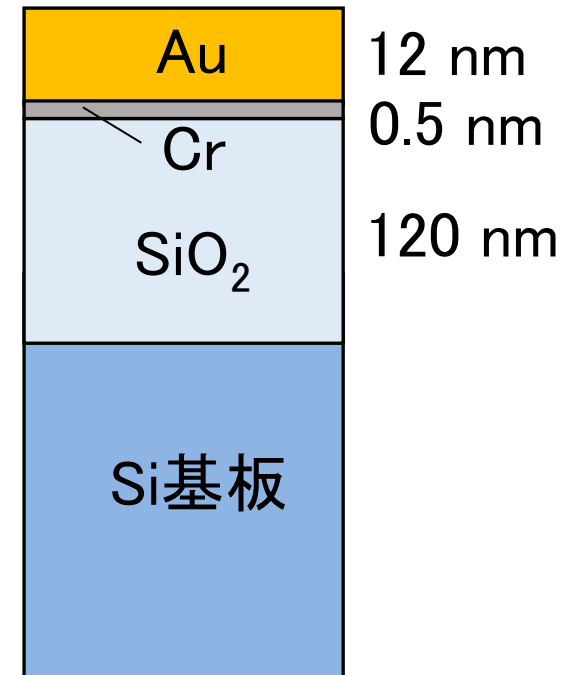
- ・安価な材料
- ・プロセスが容易
(層数は少ないほどよい)
(緻密な膜厚制御が必要)
- ・高い耐熱性や耐薬性
- ・安定性
- ・平坦な基板 (RMS < 0.5 nm)
(粘着層やバッファー層の挿入)



本手法の技術的ポイント(3)

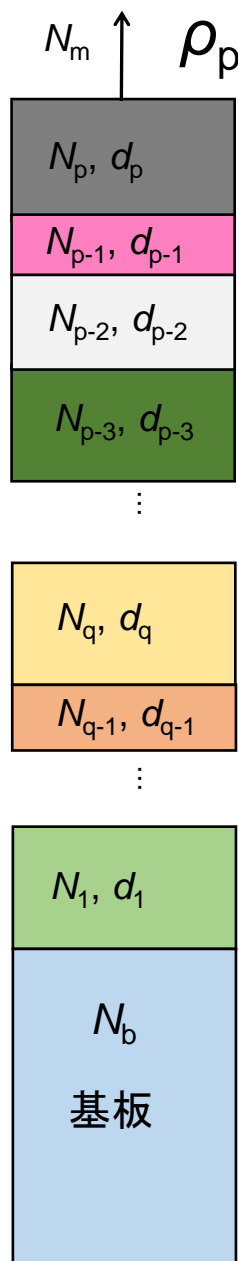
無反射多層基板の光学設計

- ・各層の厚さと順番
- ・材料律速
- ・プロセスに関連付けた設計
- ・**最上層の材質律速**
- ・表面分析として利用
- ・ボトムアップナノ形成技術の観察



従来の反射防止膜設計法では不十分

新しい光学設計法の開発(1)



p層からなる多層基板の数理モデル

目的

ある特定の波長の反射率 ($R_{\text{sub}} \leq 1$) をゼロにする
材料の組み合わせと厚さを決定する

原理

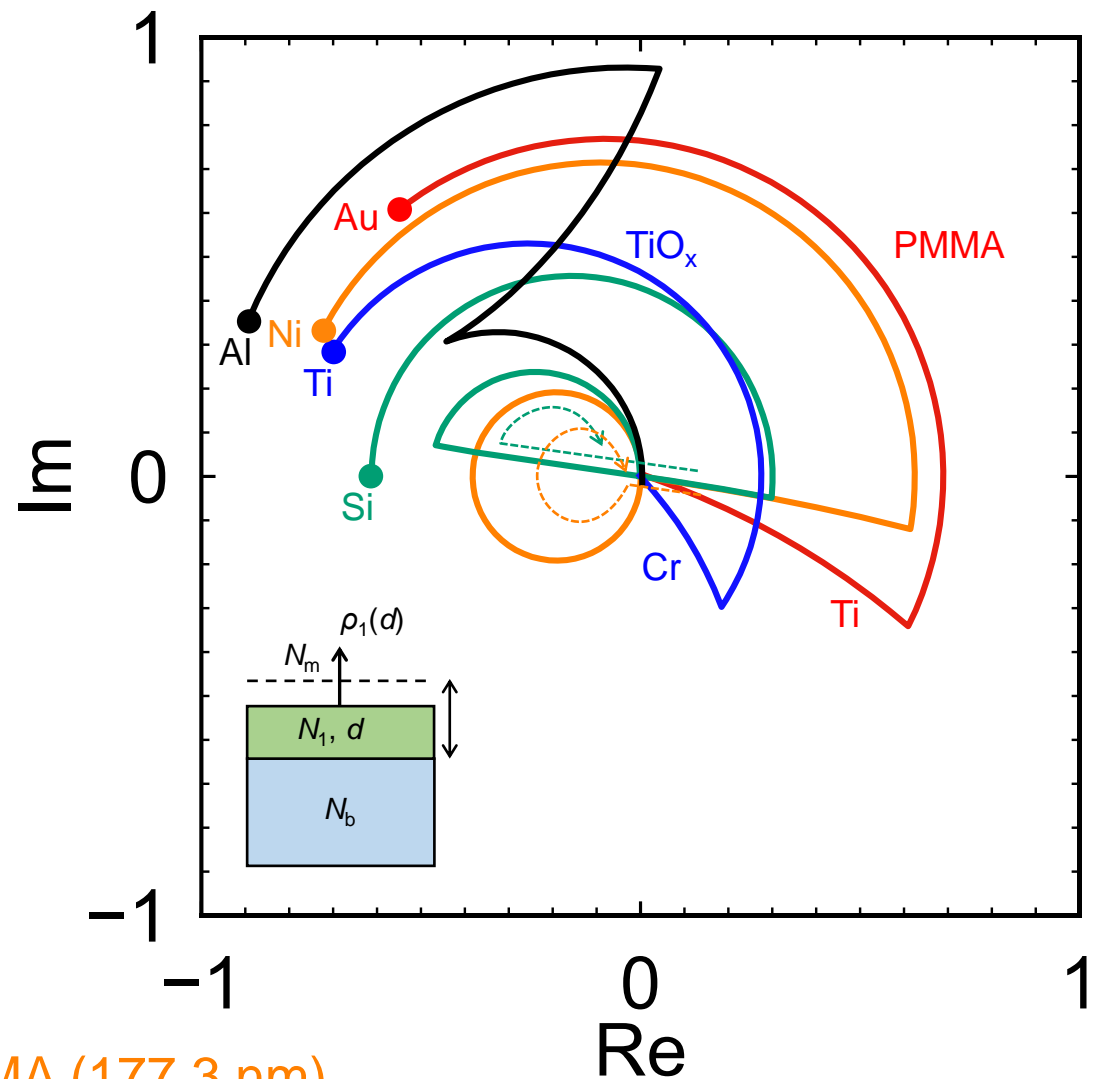
- 基板反射率は複素反射係数(ρ)を用いて $R_{\text{sub}} = |\rho|^2$
- つまり $\rho = 0$ にすることが設計

ρ を複素平面上に図示した光学設計

新しい光学設計法の開発(2)

開発した反射円図法

基板から徐々に薄膜が形成されると考え、その軌跡を複素平面上に図示



Au / PMMA (65.5 nm) / Ti (4.2 nm)

Ti / TiO_x (51.8 nm) / Cu (5.7 nm)

Ni / SiO₂ (75.5 nm) / Cr (3.2 nm) / PMMA (177.3 nm)

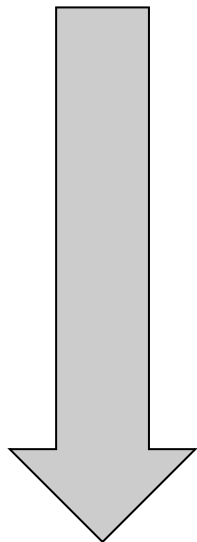
Si / PMMA (90.8 nm) / Cr (9.2 nm) / Al₂O₃ (70.0 nm)

Al / Al₂O₃ (37.0 nm) / Ti (10.0 nm) / TiO₂ (33.0 nm)

ビジネスモデル

ユーザー

一般的な光学顕微鏡を使い、簡単分析。
観察に適した特殊なスライドガラスを購入



使い方は簡単だが、
光学設計し、作製するのは難しい

商品としての価値

サプライヤー

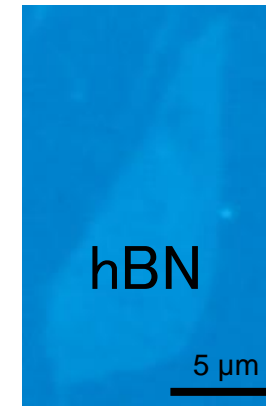
・様々な用途に応じたスライドガラスを販売

例) 表面酸化観察用スライドガラス
ナノ粒子固定スライドガラス

実用化に向けた課題

- ・現状では基礎研究止まり

単層hBN膜が観察できるスライドガラス
⇒市場が小さい。



- ・原理上は段差検出、膜厚計測、表面腐食、
表面化学反応など幅広い分野で利用できる。

- ・魅力的な応用例もっと示すことが課題

○○が観察できるスライドガラス

企業への期待

1. ガラス業界、レンズ業界
2. 多層膜コーティングやマルチコート技術を持つ企業
3. バイオ業界、食品業界、化学業界
4. 半導体業界、材料業界

 具体的な応用研究に関する共同研究

感度の高い表面を利用した応用研究例を模索したい

企業への貢献、PRポイント

- 現在行っている研究開発に
本技術を取り入れ、開発を加速
- 時間のかかる分析の事前調査としての利用
- 表面観察、化学反応を原子レベルで観察・理解
- 導入にあたっての光学設計と技術指導

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 無反射多層基板とその作製方法、作製プログラム
- 出願番号 : 特願2024-167598
- 出願人 : 神戸大学
- 発明者 : 服部吉晃、北村雅季

お問い合わせ先

神戸大学 産官学連携本部

TEL 078 - 803 - 5945

e-mail oacis-sodan@office.kobe-u.ac.jp