

走査型電子顕微鏡に搭載可能な 熱伝導率計測システム

摂南大学 理工学部 機械工学科
教授 三宅 修吾

2026年2月26日

技術開発の背景

Society 5.0、SDGsの実現に向けた産業界の取り組みにおいて、電子機器の高機能化・小型化や、熱電変換材料に代表される**機能性材料開発**が盛んである。

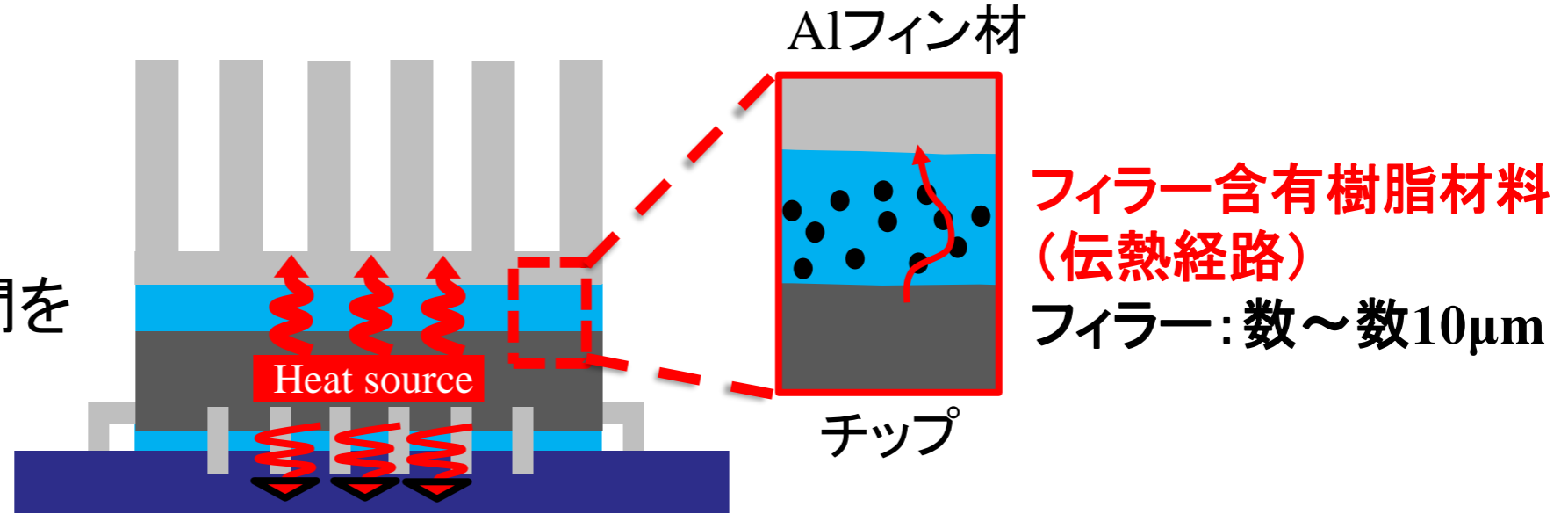
- 電子デバイスの発熱密度増加は避けられない課題
- 機能性材料開発では膨大な元素の組み合わせから最適組成の探索が必要
 - ⇒ デバイスや材料開発における**熱設計の重要性**から**熱物性値の測定需要**が高まっている

特に**異材接合界面**や**微細組織**など**マイクロスケール**での**熱的特性**が注目されている。

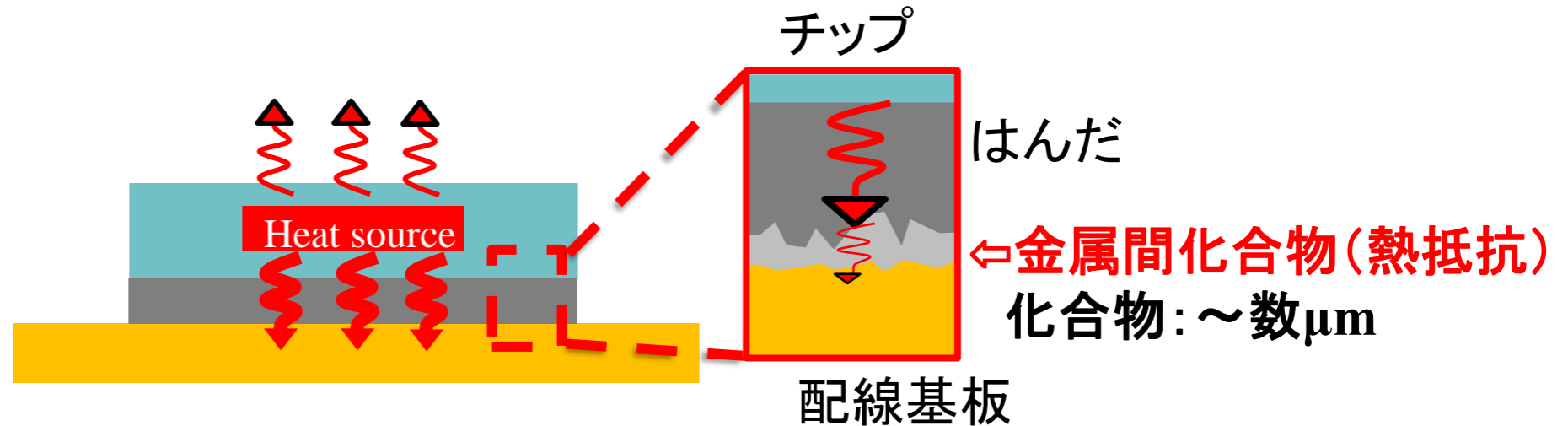
技術開発の背景

(マイクロスケールの熱物性が特性に影響)

放熱フィン／放熱基板の隙間を埋める放熱材料(TIM)



チップと配線基板を接合する鉛フリーはんだ



主な熱物性測定技術

| 方法 | 測定物性 | 空間分解能 (面内方向) | 原理 | 代表的な試料と サイズ | 備考 |
|--------------------------|----------------------|-----------------|--------------------------------------|---|--------------------------|
| フラッシュ法 (非接触) | 熱拡散率 比熱 | mm | 片面にパルス光を照射、裏面の温度上昇曲線を解析 | 平行平板 ($\Phi 4\sim 10\text{mm}$ - $t 1\sim 3\text{mm}$) | 表面黒化処理 (カーボン スプレー) |
| 熱線法 (接触) | 熱伝導率 | cm | 試料に熱線を挟み込み、非定常でジュール加熱したときの熱線の温度変化を解析 | ブロック試料 ($10\text{cm} \times 2\sim 3\text{cm}$) | 熱線接触面の 熱抵抗考慮必要 |
| 温度傾斜法 (接触) | 熱伝導率 | cm | 試料厚さ方向に熱流を与えたときの試料表裏面の温度差を解析 | 平行平板 ($\square 40\text{mm}$ - $t 1\sim 3\text{mm}$) | 熱源接触面の 熱抵抗考慮必要 |
| サーモリフレク タンス法 (非接触) | 熱浸透率 熱伝導率 熱拡散率 | μm | レーザー周期加熱点に照射した連続光の反射強度変化の位相を解析 | 形状不問 (\square 数mm~数cm) | 金属反射膜 成膜必要 |

微小領域の熱物性測定法と課題

既存技術

- ・ 極短パルスレーザー法（時間領域で測定、パルスレーザーが高価）
- ・ 周期加熱サーモリフレクタンス法（周波数領域で測定、変調しやすい）

レーザー照射／反射強度計測のため**金属反射膜（ $t \approx 100\text{nm}$ ）が必須**

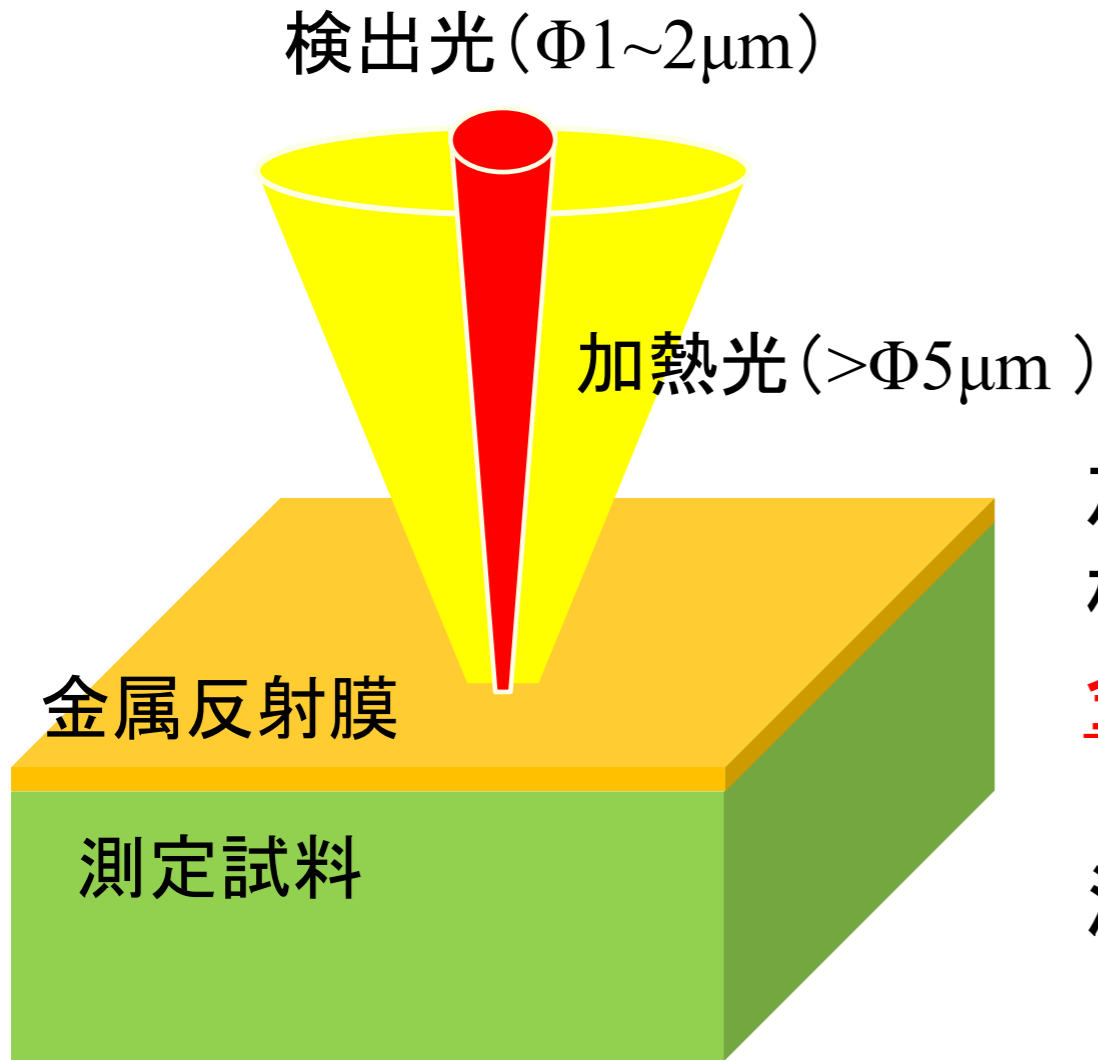
⇒ **CCDカメラや光学顕微鏡では試料表面が見えなくなる**

マイクロスケールでの測定位置確認が困難

走査型電子顕微鏡（SEM）ならば反射膜を透過した観察が可能

⇒ **SEM内で熱物性（熱伝導率）測定ができれば良い！**

周期加熱サーモリフレクタンス (FDTR) 法



温度変化に伴う反射率変化を利用した
物性測定法

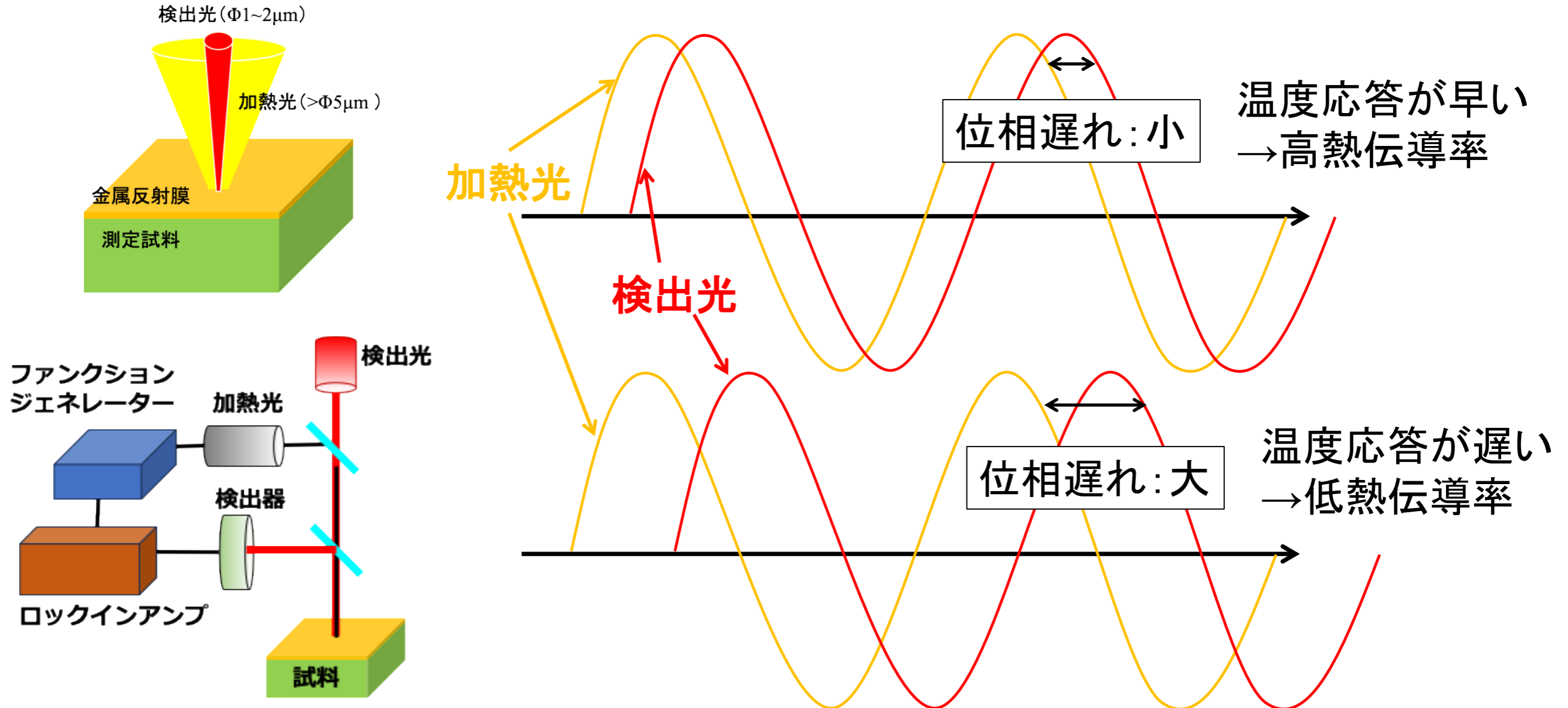
加熱光: 強度変調 → 周期的に試料を加熱

検出光: 強度一定 → 反射光が変調

金属反射膜: 光熱変換 + 反射の役割
(**100nmMoスパッタ膜**)

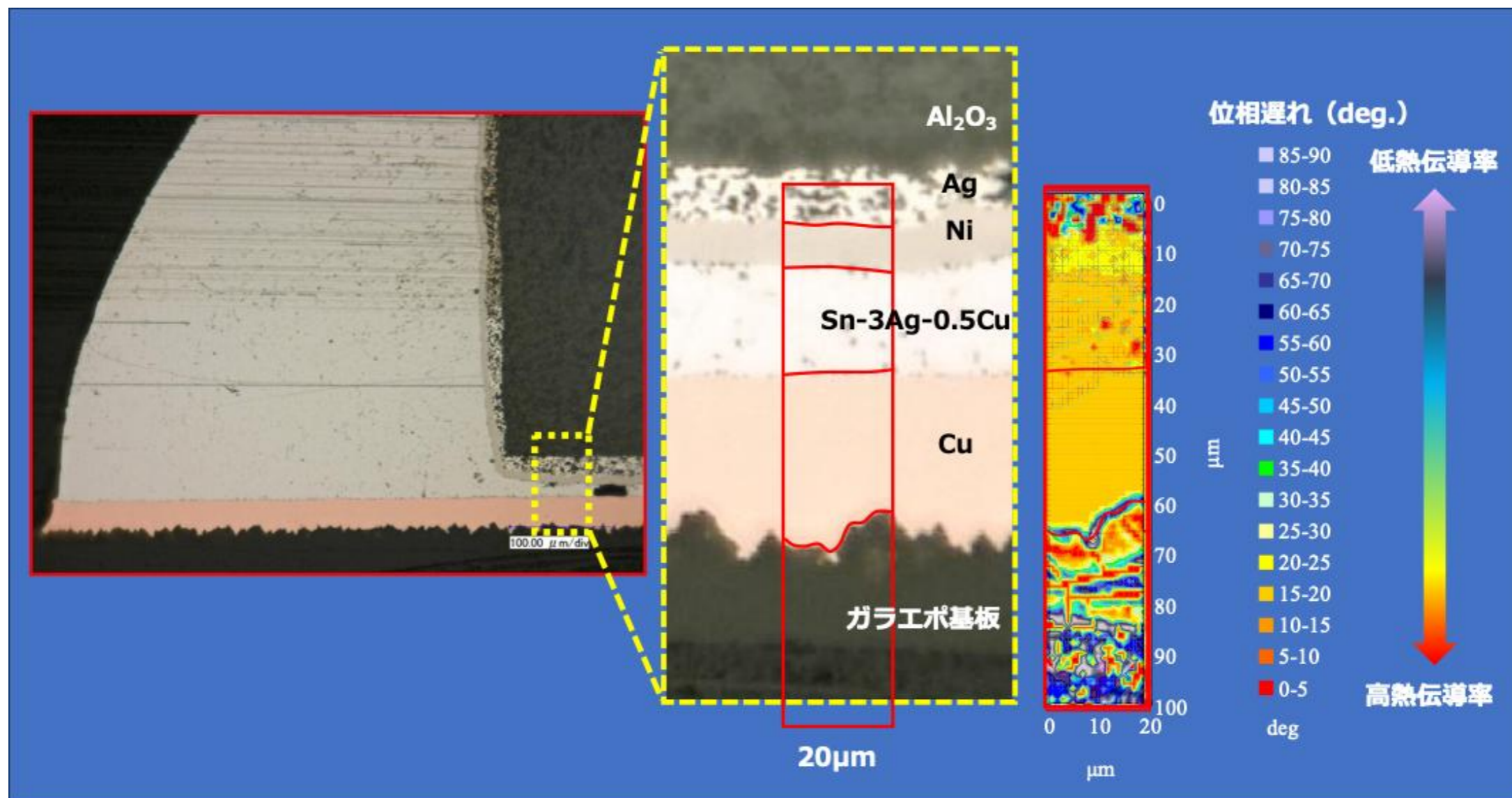
測定試料: 平滑表面の固体物質
(低 ~ 高熱伝導率まで可能)

温度応答性から熱物性を測るFDTR法



FDTR法による接合部界面の熱伝導性評価例

チップ抵抗／銅配線の接合部の位相遅れマッピング



従来技術とその問題点

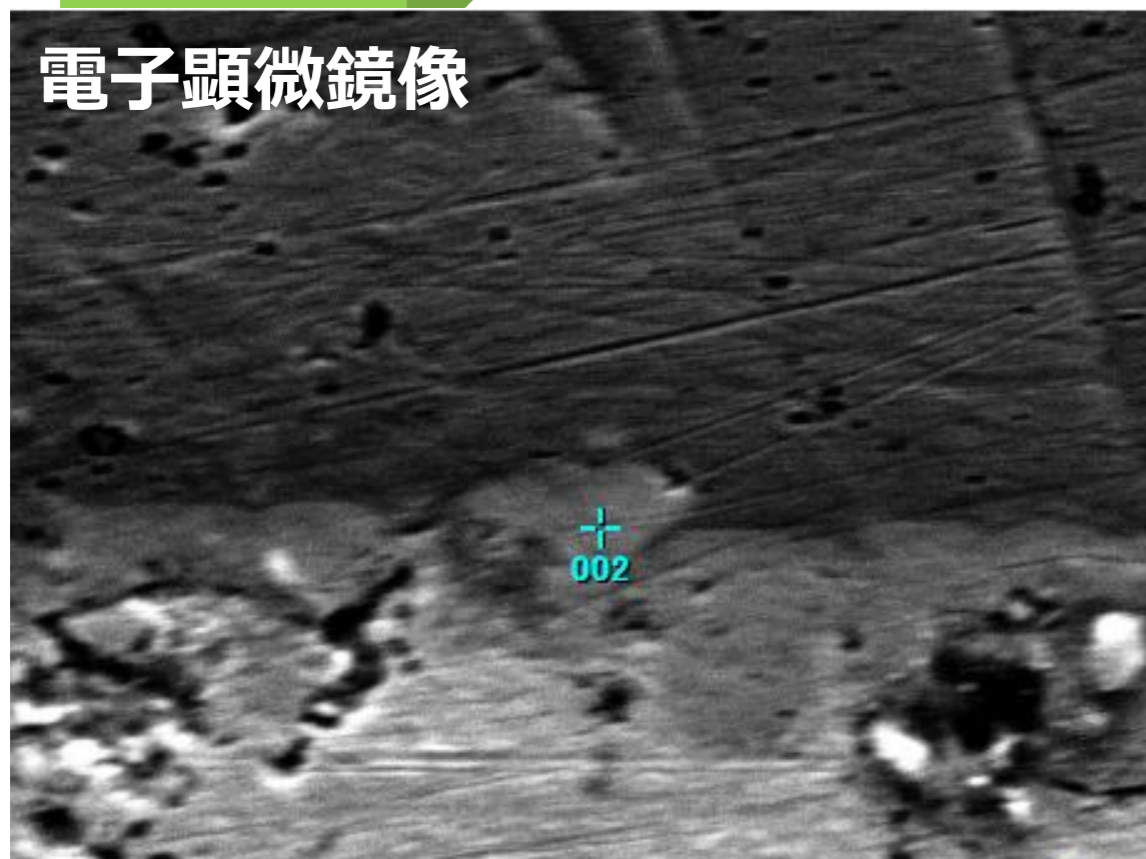
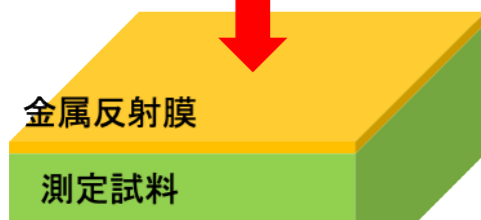
既に実用化されている微小領域の熱物性測定法にレーザー周期加熱サーモリフレクタンズ法があるが、

- 位置決めは装置据付けのCCDカメラによるため、**金属反射膜を通して試料表面が見えない**
- 測定位置の材料組成やミクロ構造は個別の装置で分析が必要であり、**表面観察中に気になった点の熱物性をその場で確認できない**

等の問題があり、**熱物性測定の単独技術としての活用にとどまっている。**



金属反射膜表面の観察像



20μm

反射膜を透過して化合物が見える



20μm

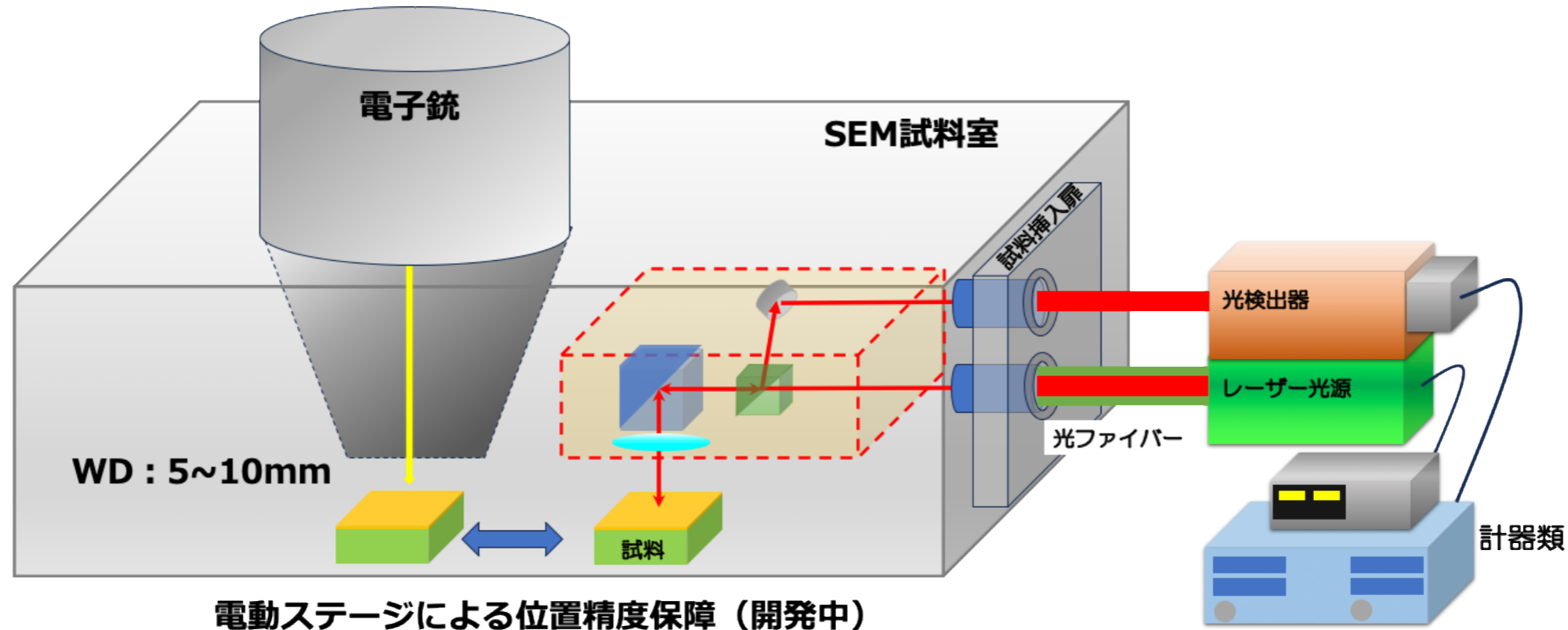
組織が見えない

FDTR法のSEM搭載への課題

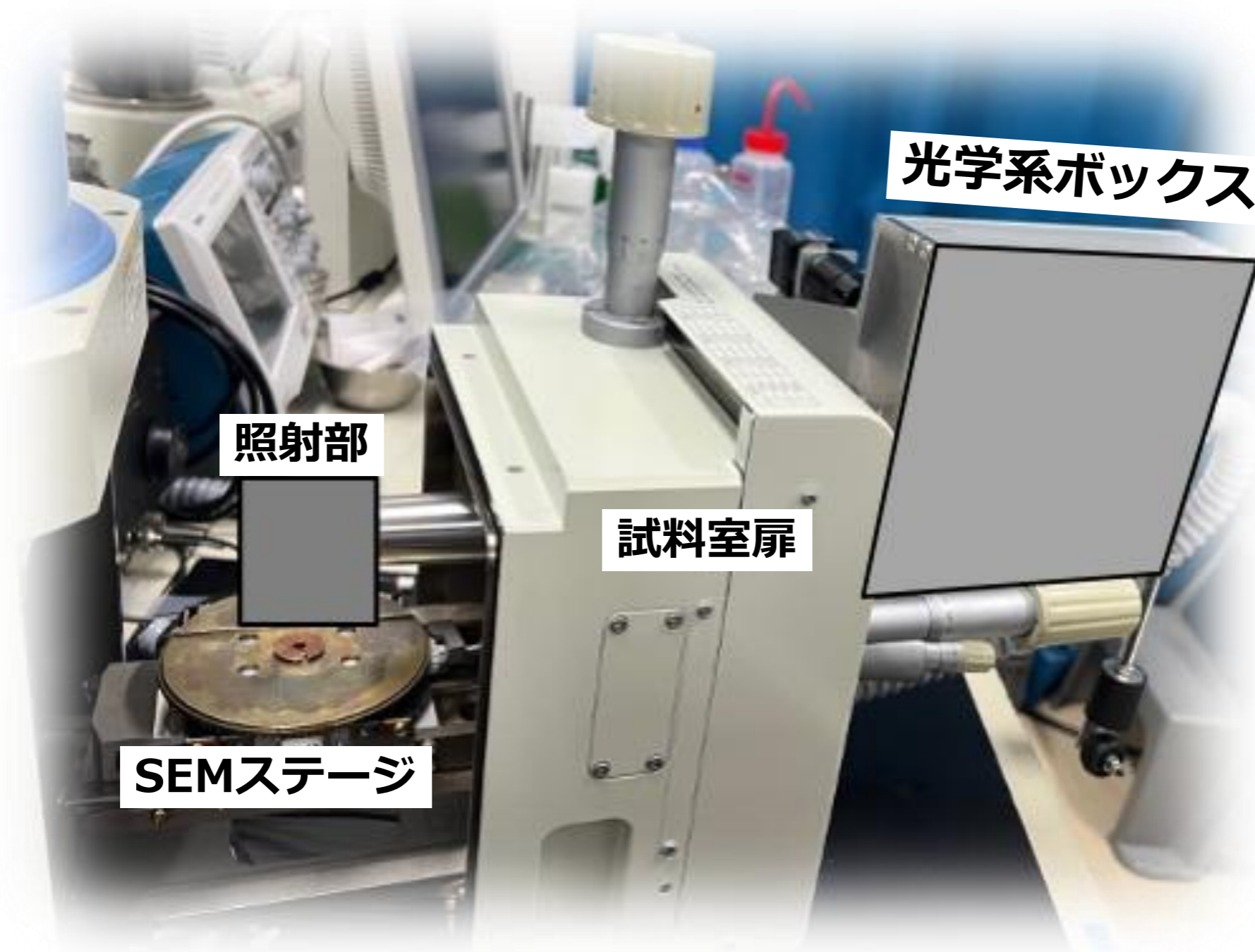
- 電子銃直下の試料ステージ近傍の空間が狭い
- レーザー光照射／検出の真空対応
- レーザー光導入経路と光学系・制御系の配置

開発コンセプト

- 光ファイバー光学系の活用による装置全体の小型化
- レーザー照射／検出部の真空対応
- SEM試料室扉へ搭載可能な光学系ボックス



SEMに搭載したFDTR装置



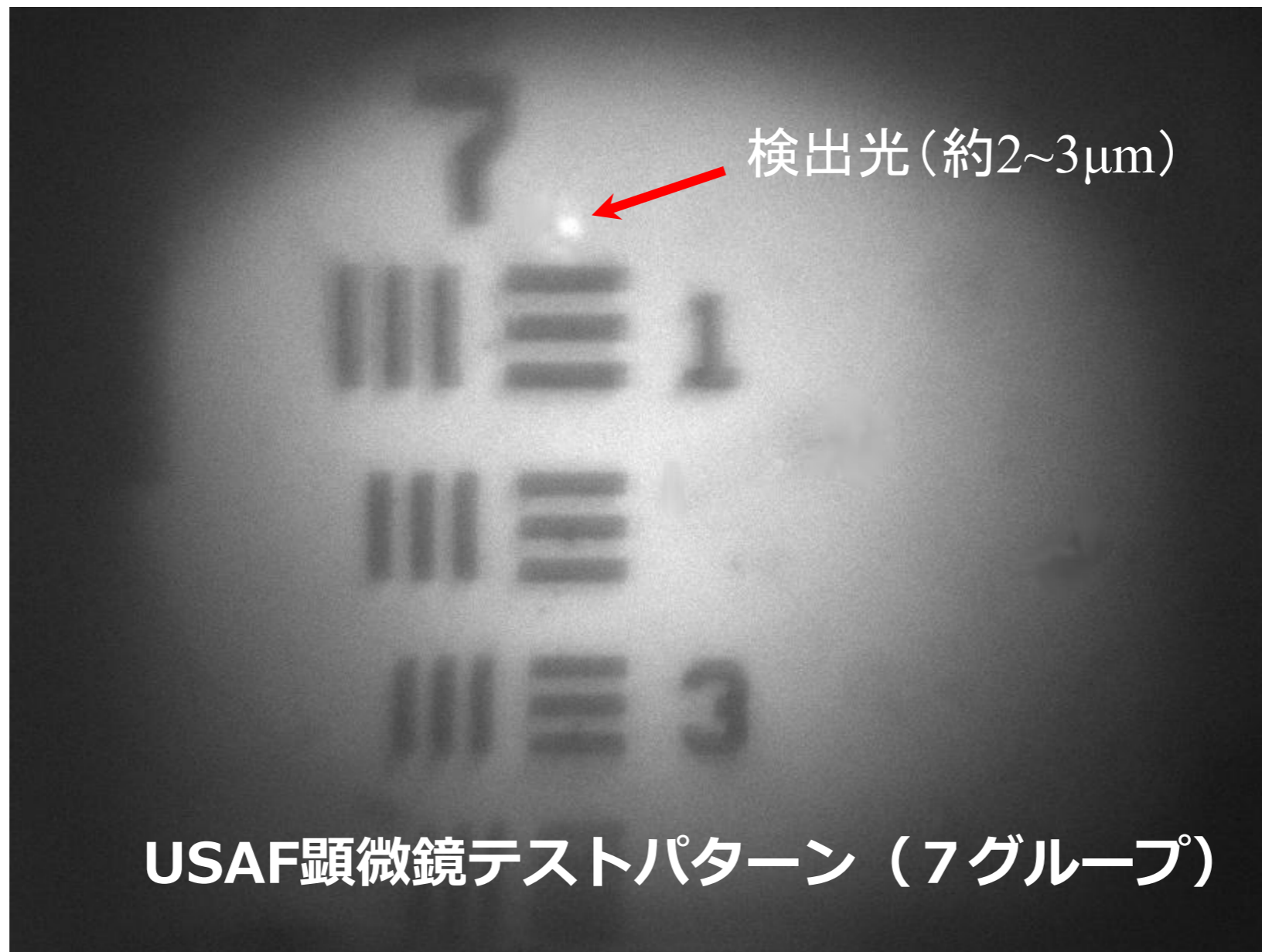
照射部

SEMステージ

試料室扉

光学系ボックス

開発装置のレーザー光(CCDカメラ像)



新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術の問題点であった、サーモリフレクタンス光学系の小型化と真空対応に成功した。
- 従来は試料表面測定位置の確認は、金属反射膜の成膜前までに限られていたが、電子顕微鏡内での測定を実現したため、成膜後に測定位置をマイクロスケールで正確に特定することが可能となった。
- 本技術の適用により、SEM観察／元素分析と熱伝導率測定がワンストップでできるため、より詳細な材料物性情報が取得でき、かつ分析コストも大幅に削減されることが期待される。

想定される用途

- 多元型熱電変換材料の最適組成の探索
- 接合界面近傍の熱抵抗評価
- フィラー／樹脂複合材料中の熱伝導率分布評価 など
- 本技術の特徴は、**測定位置の厳密な選定**に加え、高空間分解能マッピング機能を活かした**熱伝導率スクリーニングに適用**することで、**精緻な情報取得と開発コスト削減**のメリットが大きいと考えられる。
- 上記以外に、微粒子や界面熱抵抗評価への展開も期待される。
- また、達成された**SEM搭載用小型光学系に着目**すると、熱伝導率測定限らず、半導体、樹脂などの**分光分析・物性計測への新しい技術に展開することも可能**と思われる。

実用化に向けた課題

- 現在、SEM搭載用の設計・製作を推進中。信号計測が可能なところまで開発済み。しかし、光学調整による精度検証と熱伝導率解析の精度確認が未解決である。
- 今後、試作機を用いて実験データを取得し、各種金属材料に適用していく場合の条件設定を行っていく。
- 実用化に向けて、サブミクロン位置精度マッピングの実現、熱伝導率測定精度を5%以内まで向上できるような技術を確立する必要もあり。

社会実装への道筋

| 時期 | 取り組む課題や明らかにしたい原理等 | 社会実装への取り組みについて |
|------|---|--|
| 基礎研究 | <ul style="list-style-type: none">・小型光学系の基本設計が完了 | |
| 現在 | <ul style="list-style-type: none">・試作機製作、光学調整と基礎データ取得中 | <u>新技術説明会(初披露)</u> |
| 1年後 | <ul style="list-style-type: none">・熱伝導率解析精度の進展・超精密ステージによるサブミクロンスケール空間分解能マッピングを実現 | 展示会・学会等でデモンストレーション実施 :JST A-STEP事業や各種研究助成・補助金へ応募し研究資金獲得 |
| 3年後 | <ul style="list-style-type: none">・熱伝導率測定システムの完成・次世代接合材(Agナノ粒子、高融点はんだ)、フィラー含有放熱材料などの局所熱伝導率評価・熱電変換材料研究のコンビナトリアル熱伝導率評価法として実用化 | 評価基礎データの提供 産学からのサンプルトライを実現 |
| 4年後 | <ul style="list-style-type: none">・さらなる小型化設計開発による搭載汎用性向上(微細加工技術とマイクロレンズ、マイクロミラー開発) | 装置販売・受託分析事業化を実現 |

企業への期待

- 未解決のサブミクロン精密マッピング分析については、ピエゾステージの導入により克服できると考えている。
- 電子顕微鏡観察中での熱物性測定の実現には、電子顕微鏡メーカーの設計協力が不可欠。
- 電子顕微鏡および関連装置の開発技術を持つ企業との共同研究を希望。
- また、電子部品や複合材料を開発中の企業、評価技術による製品付加価値向上への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術は電子顕微鏡観察部の熱伝導率をマイクロスケールで評価可能なため、従来の別試料作製が不要となり、開発コスト削減により企業に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたり、既存設備に応じた設計と計測データの蓄積を行うことで、実用性と汎用性を備えた独自技術として利用することが可能。
- 本格導入にあたり、熱物性測定および関連技術の指導、学協会での発表・企業PRなどを協力。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 多元系材料の物性計測方法
- 出願番号 : 特願2025-78406
- 出願人 : 学校法人常翔学園
- 発明者 : 三宅 修吾、他2名

産学連携の経歴

- 1992年-2015年 企業：産・学からの受託分析・研究業務
- 2014年 兵庫県立大学客員研究員：
JST A-STEP(FS)探索タイプ採択
- 2015年-2024年 神戸高専：毎年数社と共同研究実施
- 2020年-2024年 地域協働研究センター長
- 2021年-2022年 兵庫県最先端技術研究事業(COE)採択
- 2022年 ひょうご科学技術協会
技術高度化研究開発支援助成事業採択
- 2024年- 摂南大学：毎年数社と共同研究実施

お問い合わせ先

摂南大学
研究支援・社会連携センター

T E L 072-800-1160

e-mail SETSUNAN.Kenkyu.Shakai@josho.ac.jp