

半導体と金属界面の接触抵抗の 評価手法を一新

2025年9月2日



KYOTO
INSTITUTE OF
TECHNOLOGY

京都工芸繊維大学
材料化学系 教授

菅原 徹

自己紹介/研究経歴



- '22 京都工芸繊維大学 材料化学系 教授
- '21 早稲田大学 ナノ・ライフ創新研究機構
主任研究員(~ '22.3), 招聘研究員(~ 現在)
- '18 大阪大学産業科学研究所 准教授
- '17 NEDO 材ナノ部 主査(兼任: ~'18.9)
- '12 大阪大学産業科学研究所 助教('11着任)
- '10 大阪大学工学研究科 特任研究員
- '09 九州大学
炭素資源国際教育研究センター 学術研究員
- '05 九州大学 総合理工学府(物質理工学専攻 '09博士(工学))
- '03 琉球大学 理工学研究科(物質地球科学専攻)
- '99 琉球大学 理学部(物質地球科学科・物理系)
- '95 和歌山県立耐久高等学校
- '79 和歌山県 有田郡 吉備町

5年@福岡
(九州大)

4年目@京都

6年@沖縄
(琉球大)

12年@大阪(大阪大:PD, 助教, 准教授)

1+0.5年@神奈川(NEDO:主査)

東京都(早大:主任研究員)

18年@和歌山

研究経歴



2002年-05年、琉大(BC・MC)

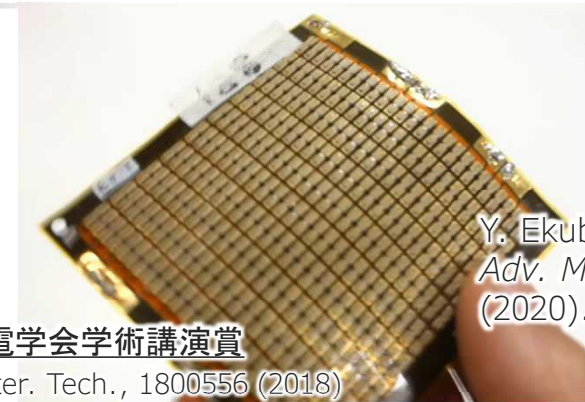
固体イオン導電体:分子動力学シミュレーション(機械学習 etc.)

2005年-11年末、九大(DC・PD)、大阪(PD)

酸化物熱電材料の研究・開発

2010年-11年末、大阪(PD)

原子力材料の研究・開発



Y. Ekubaru, T. Sugahara et al.,
Adv. Mater. Tech. 1901128,
(2020).

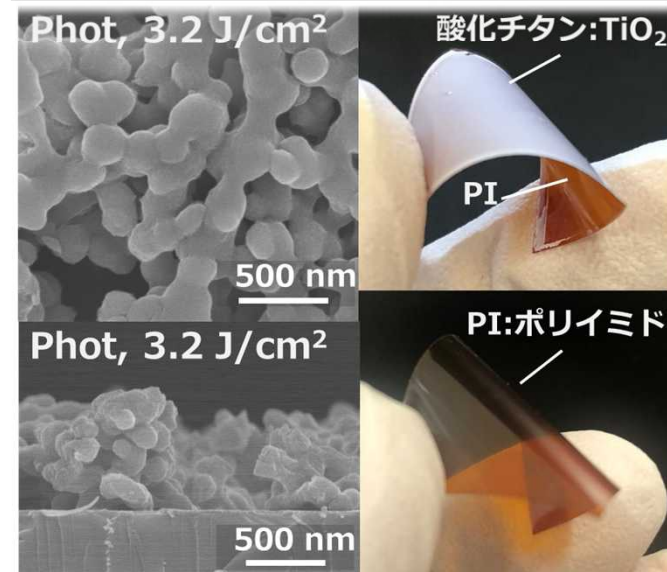
日本熱電学会学術講演賞

Adv. Mater. Tech., 1800556 (2018)

2017年9月-18年9月
クロスアポイントメント制度
NEDO主査(兼任)



1999年



2012年 - 20年...、
阪大産研(助教、准教授 18年12月より)

2021年9月-22年3月
クロスアポイントメント制度
早大・主任研究員(兼任)

2025年

プリントッド・エレクトロニクス(PE)

ナノ粒子(金属、セラミックス)、
機能性セラミックスコーティング(溶液法)

実装技術(接合材料、高密度実装、信頼性)

無鉛はんだ、Znはんだ、Ag・Cu焼結接合

T. Sugahara et al., *ACS. Appl. Ele. Mater.*, 2, 6, 1670 (2020).

菅原研究室

17 人 (菅原を含む) 2025.5.31

Staffs

- 2 研究員(技術補佐員)
- 1 事務補佐員

Students

- 1 博士後期課程(Ph.D course: 社会人)
- 7 博士前期課程(修士課程)
- 4 学部4年生 (4th grads)
- 1 学部3年生 (リサーチアシスタント)



2025年初夏野球大会(6.1)



2025年春新歓(4.27)

人とモノを繋ぐネットワーク データフロー

フィジカル空間

材料・デバイス・プロセス

電力供給

発電機（エネルギーハーベスタ）、
送電機、蓄電池、キャパシタ、etc.

データ取得

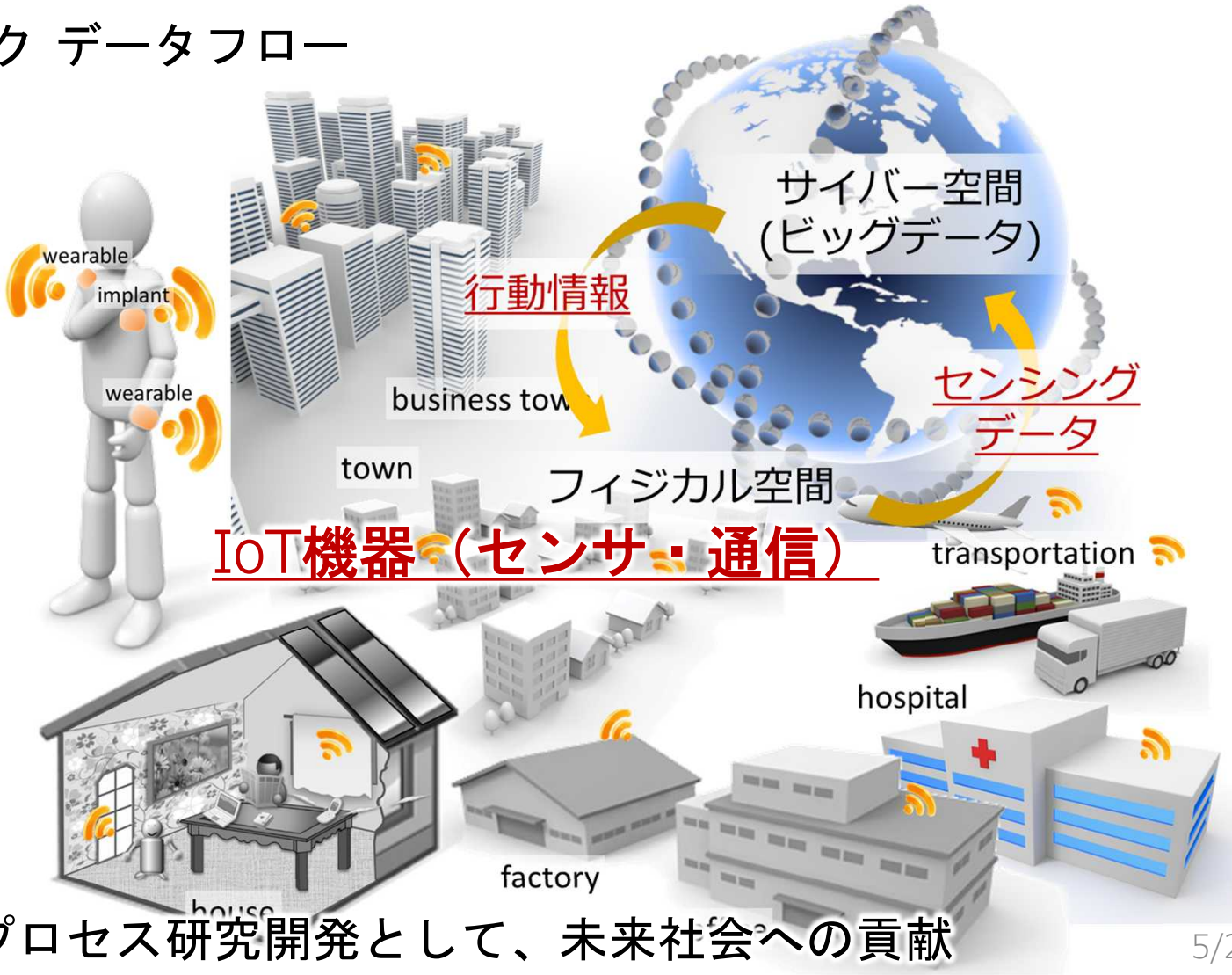
物理センサ、化学センサ、etc.

データ通知・認知

モニタ、アクチュエータ、スピー
カー、etc.

求められる課題

- ・ 高性能、高品質
- ・ 省資源
- ・ 低価格
- ・ 高信頼性



材料・デバイス・プロセス研究開発として、未来社会への貢献

- 薄膜トランジスタ (TFT)
多結晶シリコン(PC-Si), アモルファスシリコン(a-Si), 有機半導体, 酸化物半導体(IGZO, IZO, IGO, etc.) アモルファス半導体, etc.
- パワー半導体デバイス (IGBT、CMOS)
IGBT、RC-IGBT、SiC-MOSFET、GaN-HEMT GaO、etc.
- 太陽電池セル (PVC)
PC-Si, a-Si, 有機半導体、化合物半導体(カルコゲナイド, シリサイド, 酸化物, etc.)
- メモリ
RAM, フラッシュメモリ, etc.
- マルチレイヤ電子デバイス
コンデンサ(BaTiO₃), インダクタ(Ferrite), サーミスタ(BaTiO₃), バリスタ(ZnO), 誘電体微小共振器(SiO₂, TiO₂) etc.

F型: PTB7 n型: PC₆₁BM
Field-Effect Transistor Memory

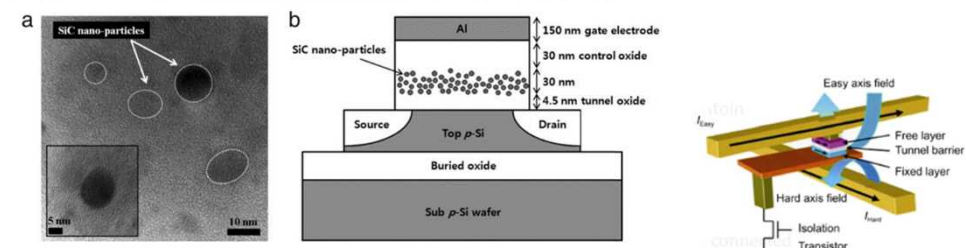


Figure 1. (a) Plan view TEM image of NFGM with SiC nano-particles formed in SiO₂. The insert figure shows the HR-TEM image of SiC nano-particles. (b) Cross-sectional schematic diagram of the NFGM with SiC nano-particles formed in SiO₂. Figure 45 Sketch of magnetic field switching MRAM¹⁾.

Superlattices and Microstructures 46, 182-187 (2009),
doi:10.1016/j.spmi.2008.12.018

Magnetic Random Access Memory (MRAM)

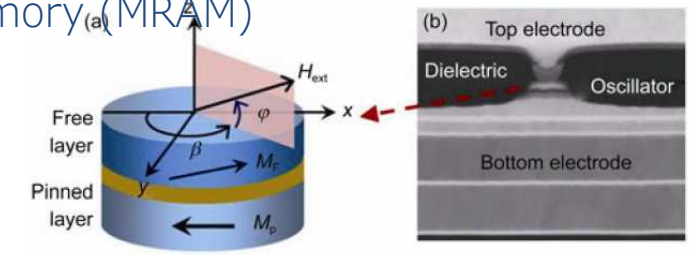


Figure 53 Schematic representation of a spin-transfer nano-oscillator (STNO) with free and pinned magnetic layers (a), and a scanning-electron-microscopy (SEM) image of a cross-section of an STNO (b), showing top and bottom metallic electrodes used for electrical connections. The lateral size of the STNO is about 100 nm. Image credit: UCLA Engineer-

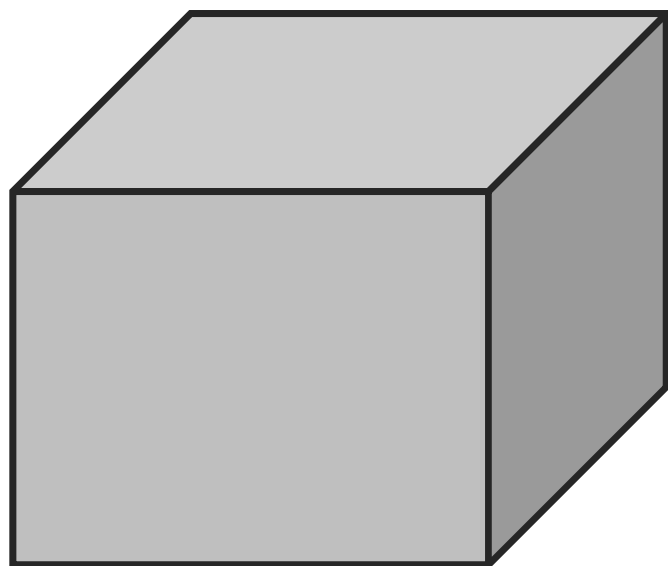


接触抵抗と固有接触抵抗率

電気抵抗

電気の「通り易さ」や「通り難さ」を表現する指標

材料 X

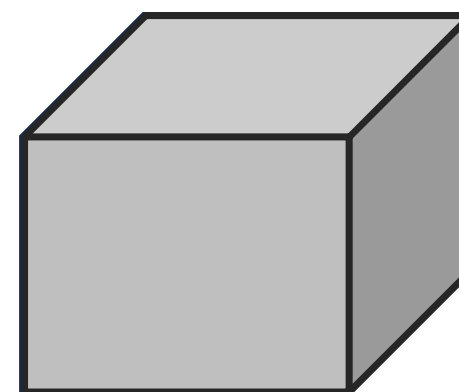


材料 A

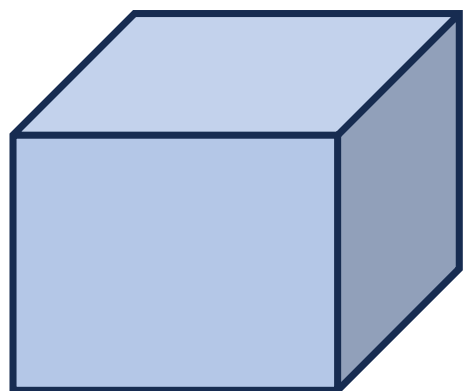
材料 X

わからない

<



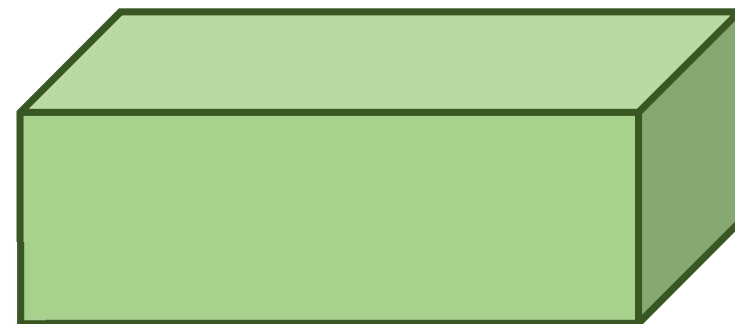
材料 A



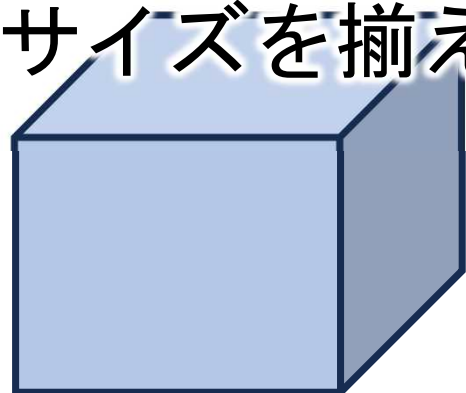
材料 B



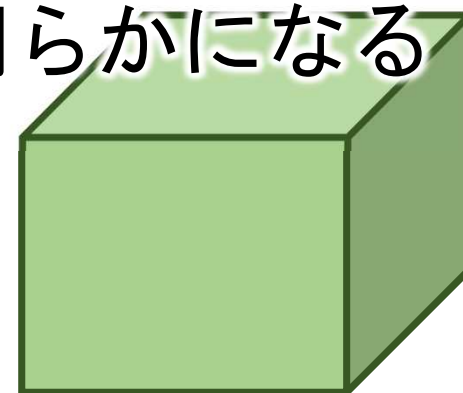
材料 C



サイズを揃えることで大小関係が明らかになる



物性(物性値)



Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Module

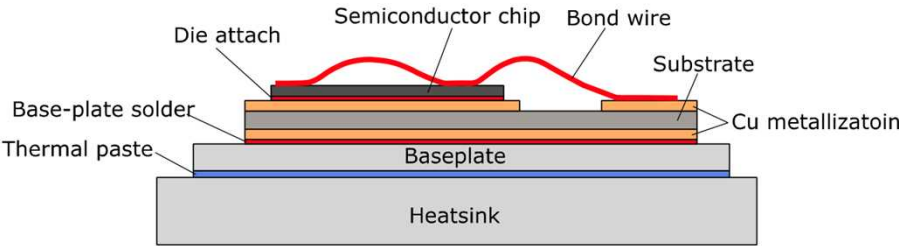
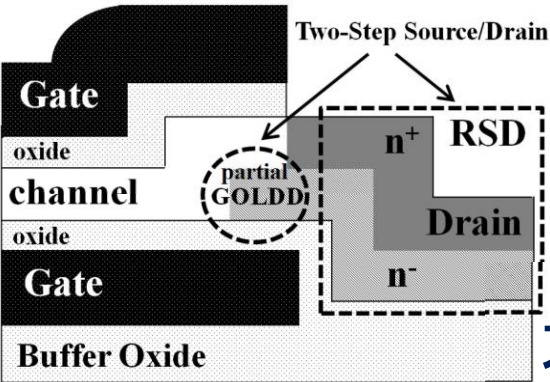
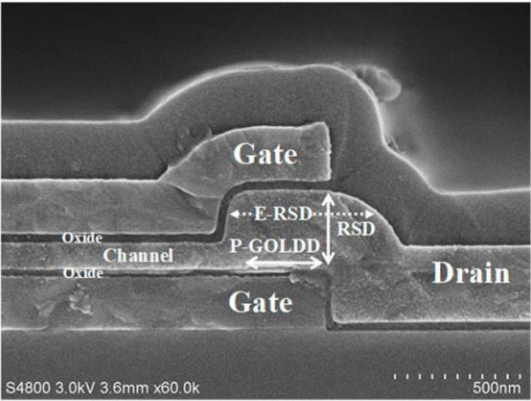
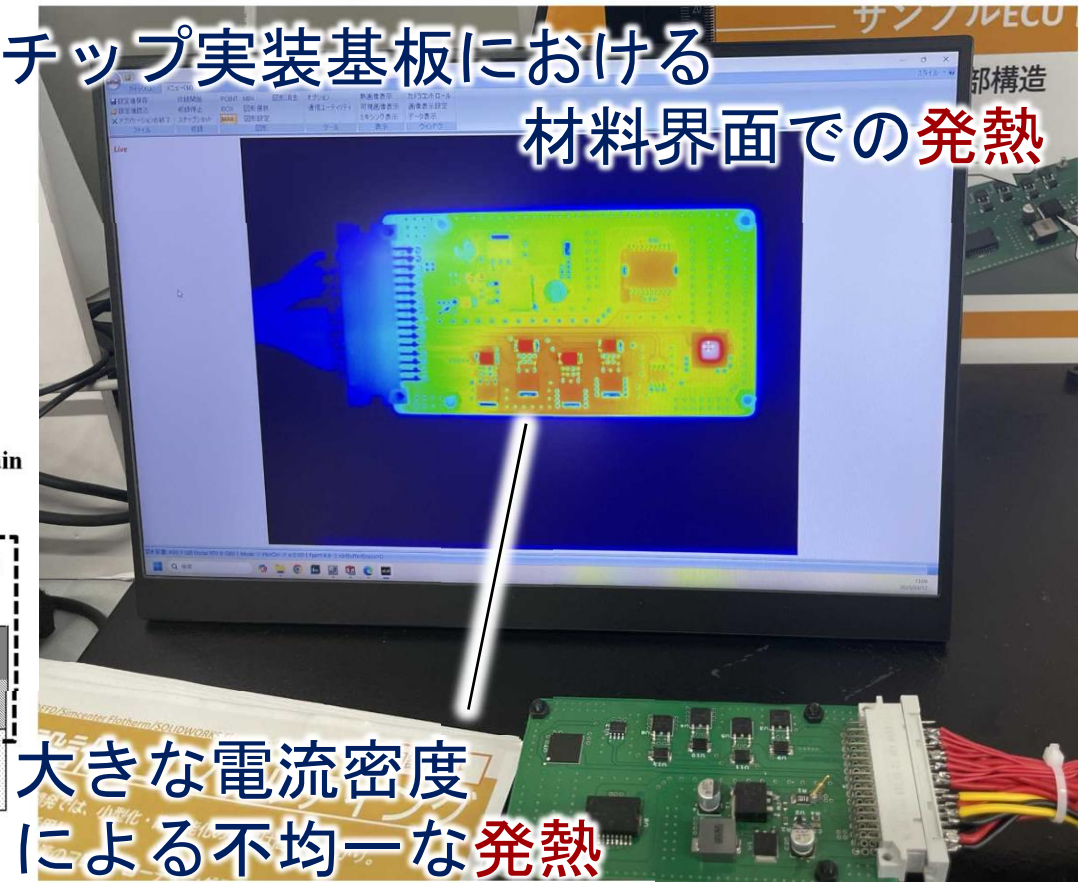


Figure 1. Cross-section of an insulated gate bipolar transistor (IGBT) module including the connected heatsink.

Energies 2020, 13, 2718; doi:10.3390/en13112718



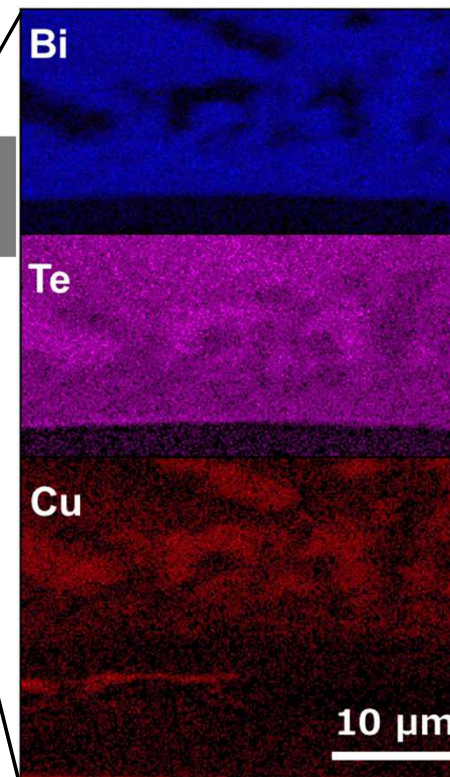
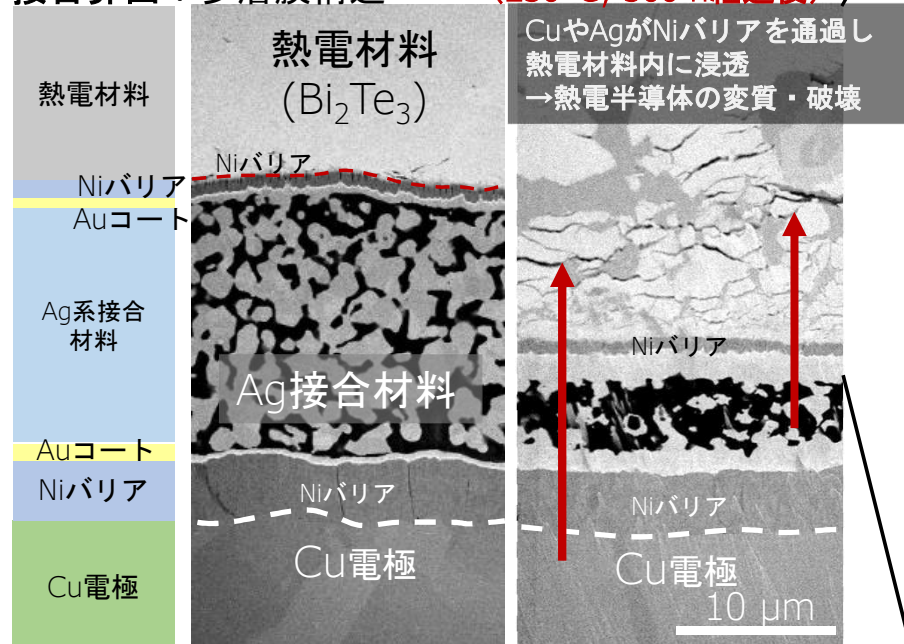
Coatings 2019, 9(4), 233;doi:10.3390/coatings9040233



アニメーションスライド

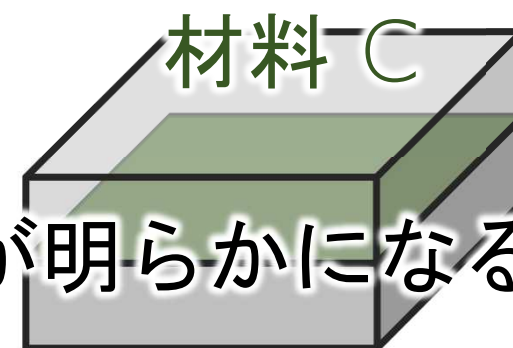
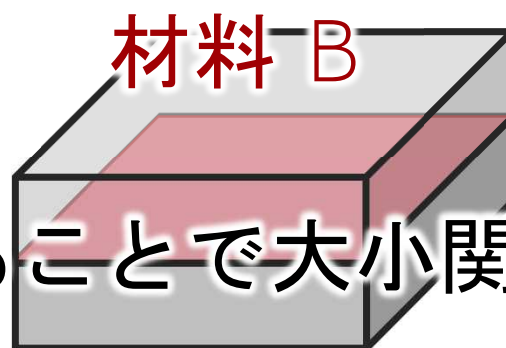
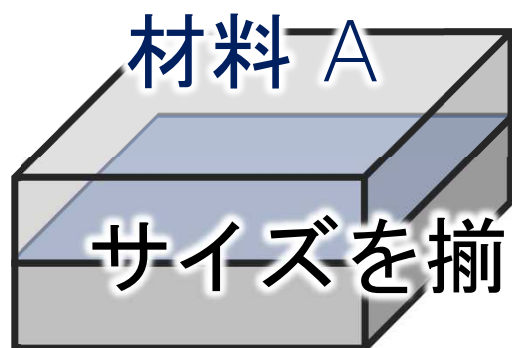
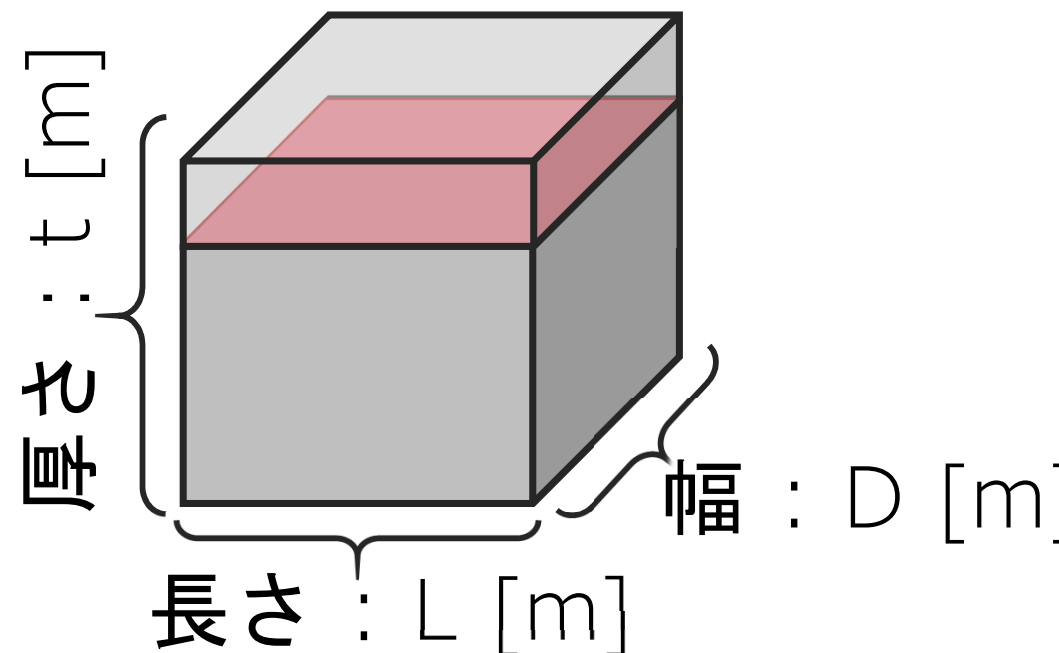
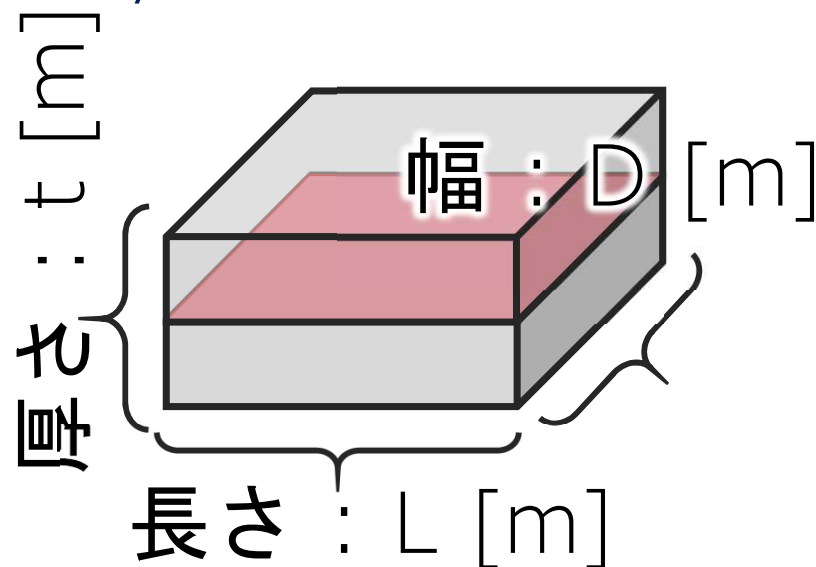
接合界面の安定性/信頼性

接合界面：多層膜構造



Y. Ekubaru, T. Sugahara*, et al., *J. Alloy. Compnd.* 817: 152731 (2020).

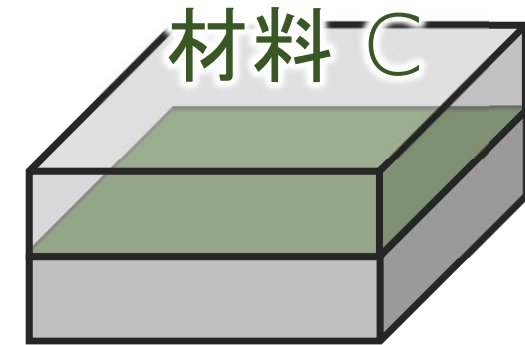
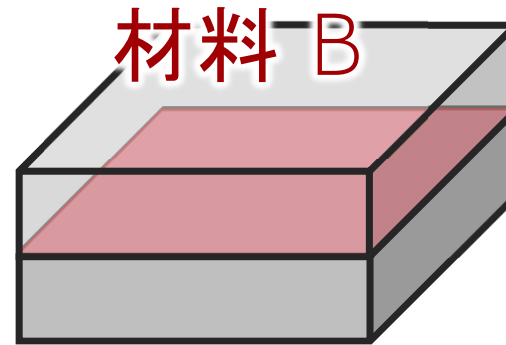
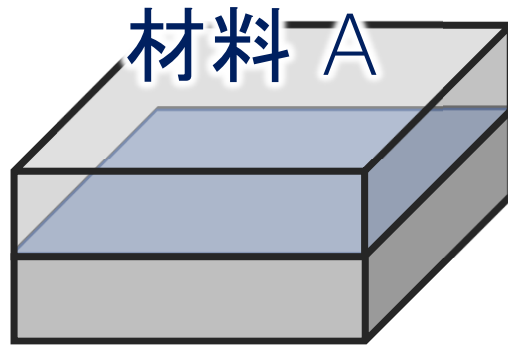
材料X/材料Bの界面特性



サイズを揃えることで大小関係が明らかになる

伝統的に用いられてきた接触抵抗値の測定方法は、原理的にサイズが揃ってなく、接触抵抗値の大小関係を明確にできない。

固有接触抵抗率(物性値)を求めることで、接触抵抗の大小関係を直接比較できる。

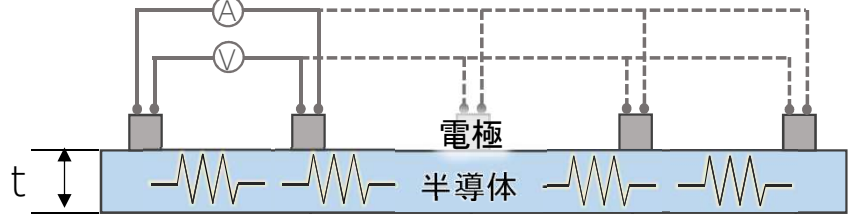


固有接触抵抗率を求めるメリット

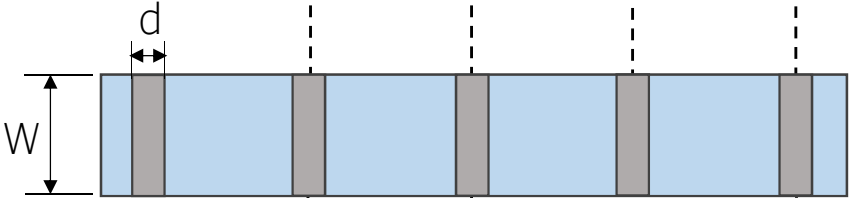
- 半導体デバイスを開発するとき、半導体材料や金属材料など半導体デバイスを構成する材料を適切に選定するなど、設計指針として活用できる。
- また、固有接触抵抗率の温度特性や環境依存性、耐環境性、物理的・化学的特性を得ることで、半導体デバイスの信頼性や耐環境性の材料設計に活用できる。

拡張TLM法

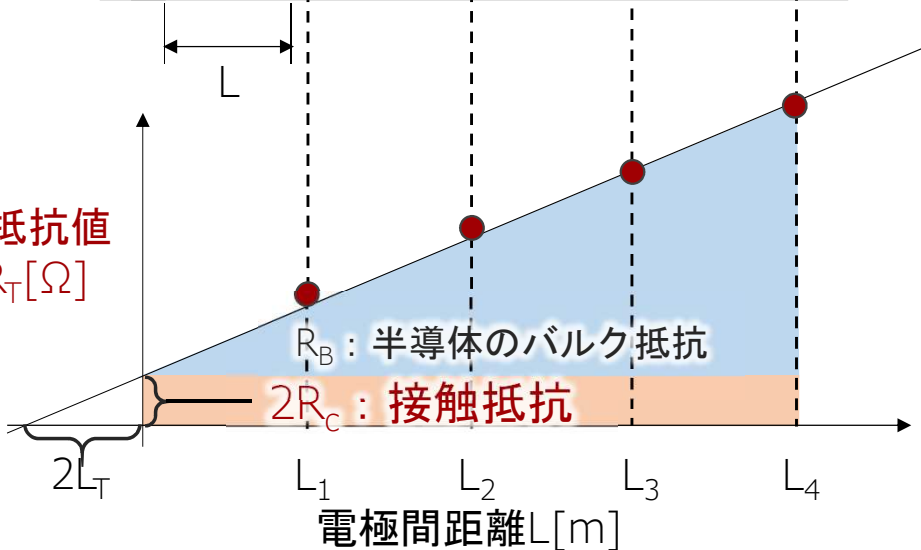
サンプルの断面図



サンプルの平面図



全抵抗値
 $R_T[\Omega]$



● TLM法：接触抵抗(R_c)

全抵抗 = 半導体の抵抗 + $2 \times$ 接触抵抗(R_c)

$$R_T = \frac{R_{sh}L}{W} + \frac{2R_{sk}L_T}{W}$$

[Ω] [Ω/sq]

R_{sk} : 金属直下のシート抵抗(Ω/sq)
 R_{sh} : 半導体のシート抵抗(Ω/sq)
 L_T : 伝搬長(m)

シート抵抗(Ω/sq)を抵抗率($\Omega \cdot \text{m}$)で再定義

● 拡張TLM法：固有接触抵抗率(ρ_c)

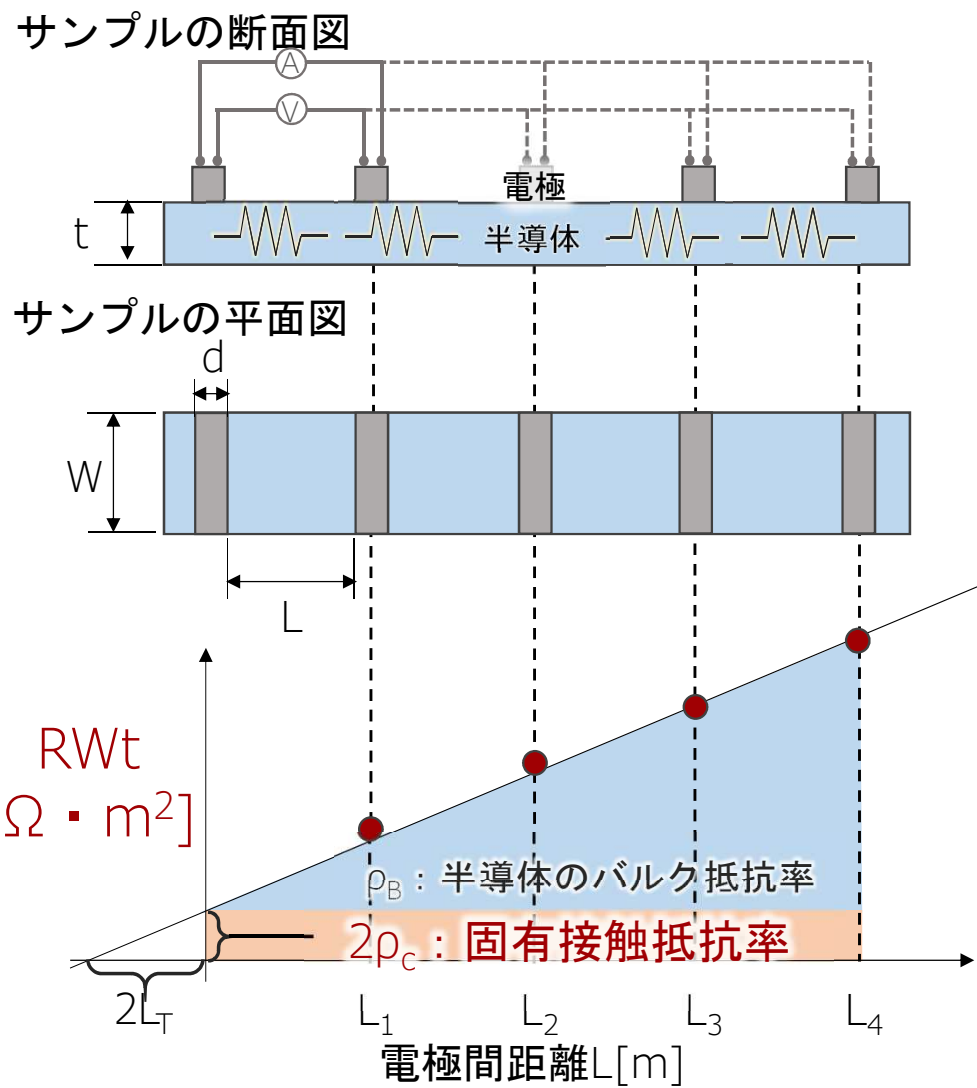
全抵抗率(RWt) = 半導体の抵抗率(ρ_B) + $2 \times$ 接触抵抗率(ρ_c)

$$RWt = \frac{R_{sh}'L}{W} + \frac{2R_{sk}'L_T}{W}$$

$$= \frac{R_{sh}Lt}{W} + \frac{2R_{sk}L_Tt}{W}$$

R_{sk}' : 金属直下の抵抗率($\Omega \cdot \text{m}$)
 R_{sh}' : 半導体の抵抗率($\Omega \cdot \text{m}$)
 ただし、 $R_{sk}' = R_{sk}t$ 、 $R_{sh}' = R_{sh}t$

拡張TLM法



● TLM法：接触抵抗(R_c)

全抵抗 = 半導体の抵抗 + $2 \times$ 接触抵抗(R_c)

$$R_T = \frac{R_{sh}L}{W} + \frac{2R_{sk}L_T}{W}$$

[Ω] [Ω/sq]

R_{sk} : 金属直下のシート抵抗(Ω/sq)
 R_{sh} : 半導体のシート抵抗(Ω/sq)
 L_T : 伝搬長(m)

シート抵抗(Ω/sq)を抵抗率($\Omega \cdot m$)で再定義

● 拡張TLM法：固有接触抵抗率(ρ_c)

全抵抗率(RWt) = 半導体の抵抗率(ρ_B) + $2 \times$ 接触抵抗率(ρ_c)

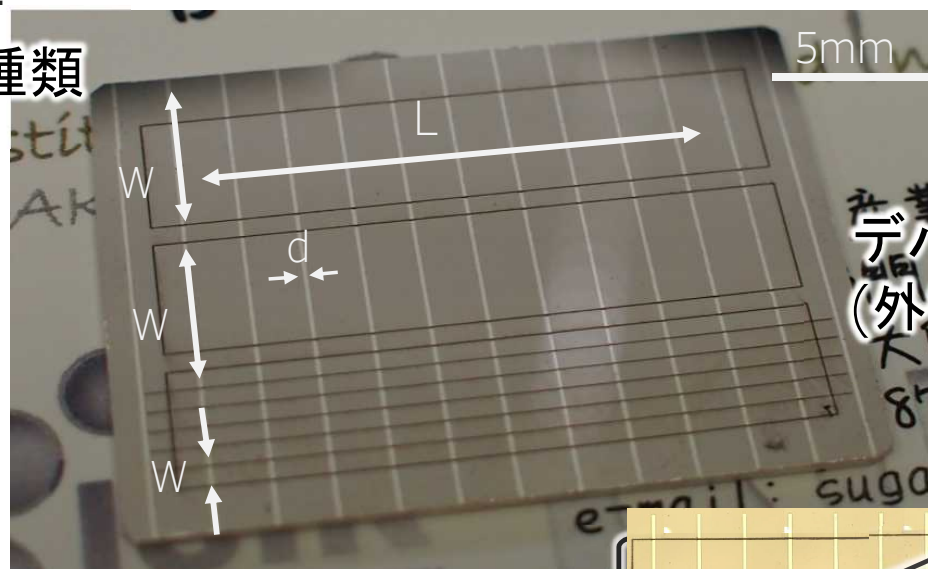
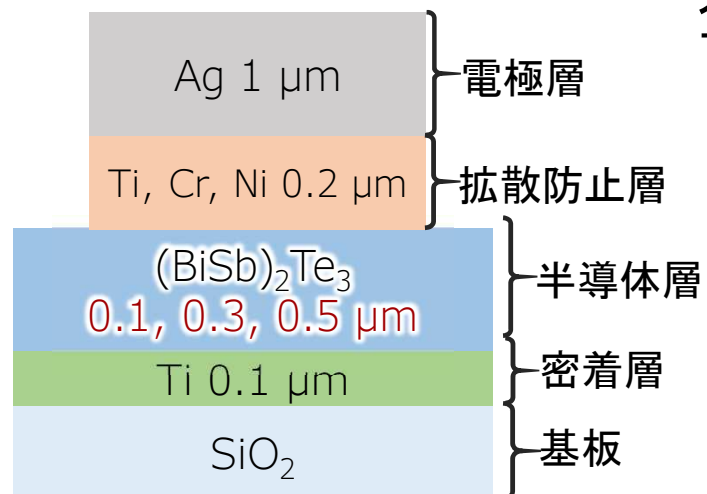
$$RWt = \frac{R_{sh}'L}{W} + \frac{2R_{sk}'L_T}{W}$$

$$= \frac{R_{sh}Lt}{W} + \frac{2R_{sk}L_Tt}{W}$$

R_{sk}' : 金属直下の抵抗率($\Omega \cdot m$)
 R_{sh}' : 半導体の抵抗率($\Omega \cdot m$)
 ただし、 $R_{sk}' = R_{sk}t$ 、 $R_{sh}' = R_{sh}t$

京都工芸繊維大学
KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

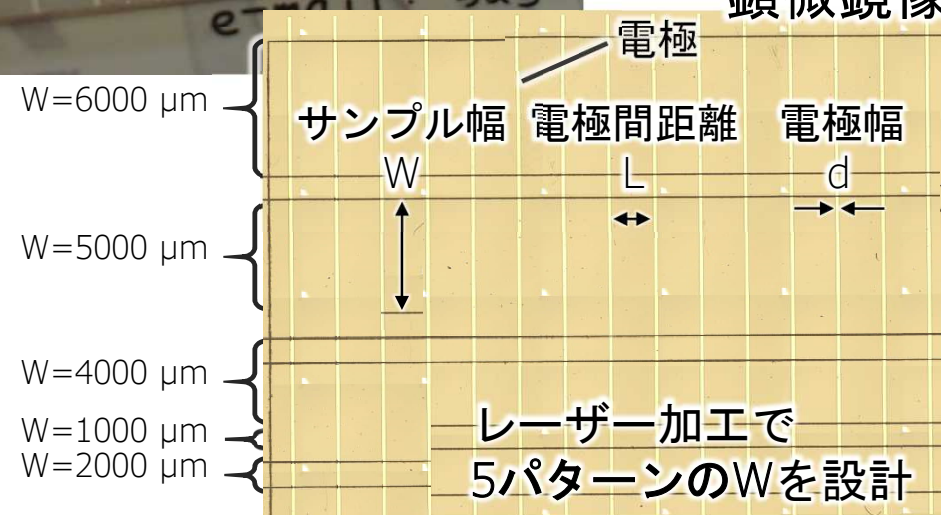
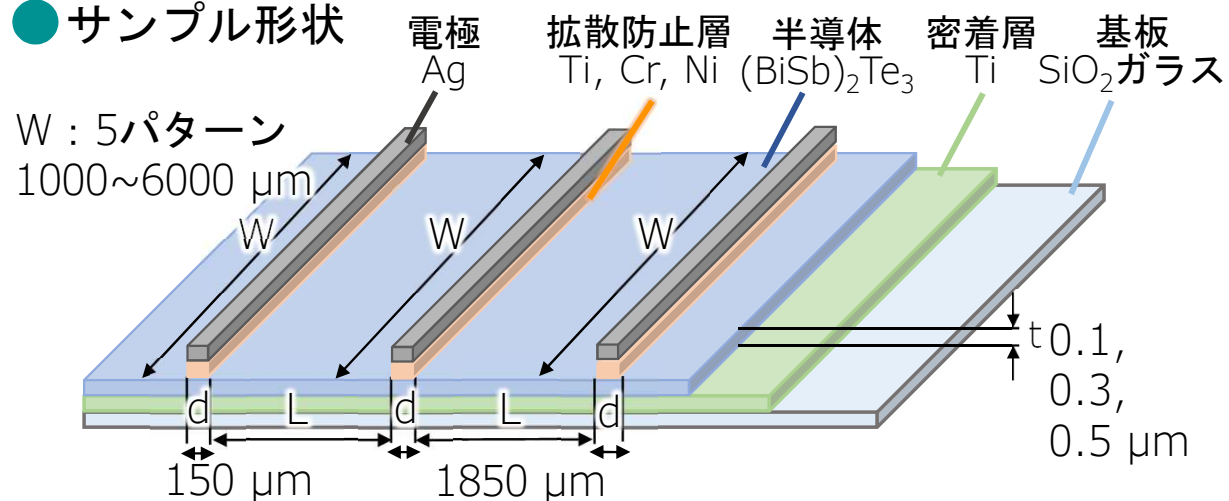
全9種類



デバイス
(外觀写真)

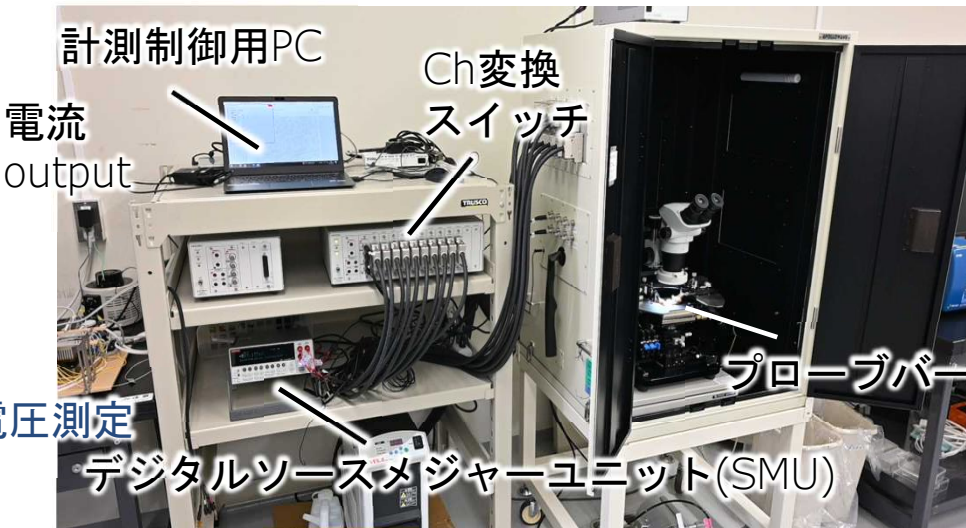
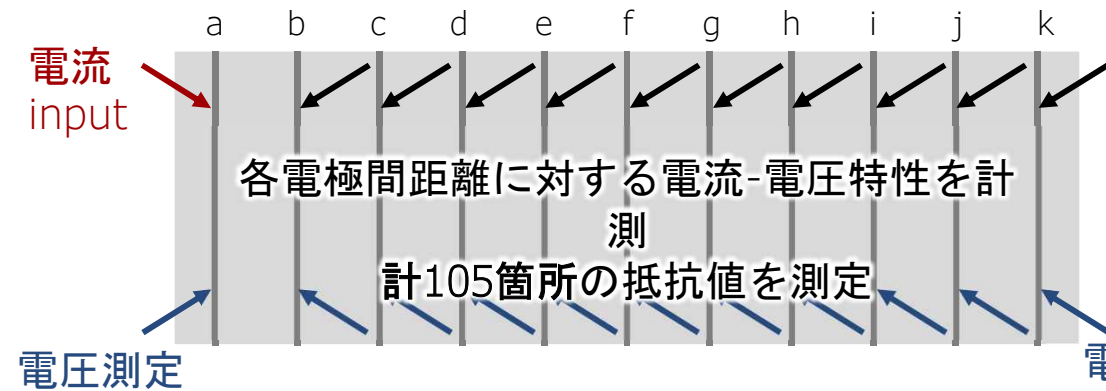
高解像度 顯微鏡像

電極 拡散防止層 半導体 密着層 基板
Ag Ti, Cr, Ni (BiSb)₂Te₃ Ti SiO₂ ガラス



実験方法(抵抗測定)

- 抵抗値測定：4端子法

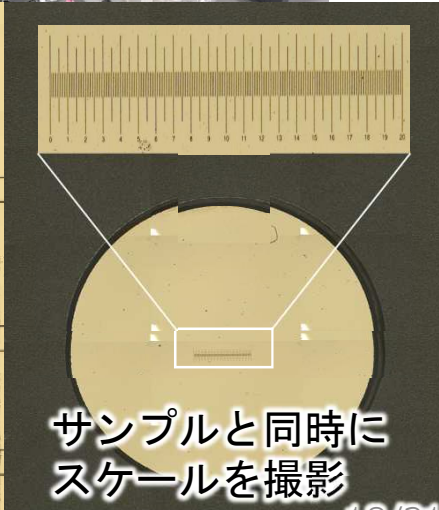


- 画像解析を用いた形状(W, L, d)測定

光学顕微鏡を用いて高倍率に
サンプル・スケールを同時に拡大撮影

画像解析を活用して、
全サンプルの全てのW, L, dを計測

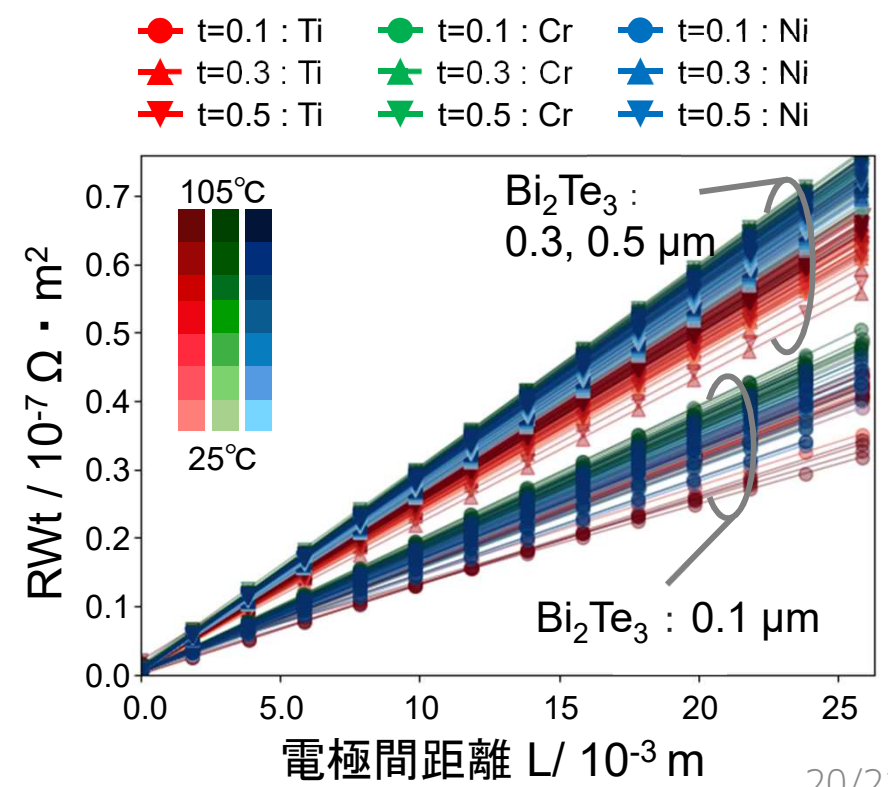
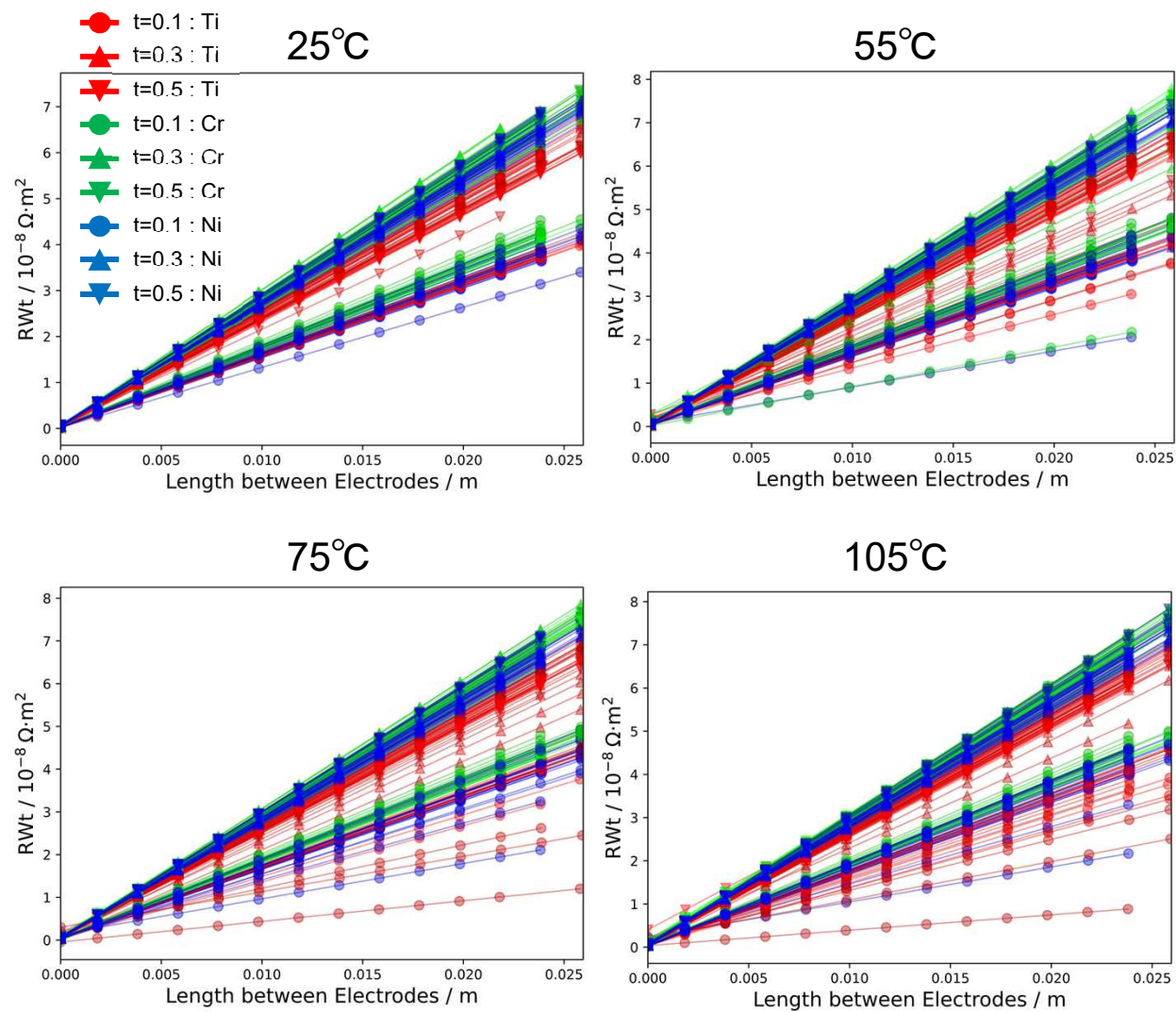
- 厚み(t)の測定
段差膜厚計を用いて、 $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$
半導体層の厚み(t)を測定





動画が入ります

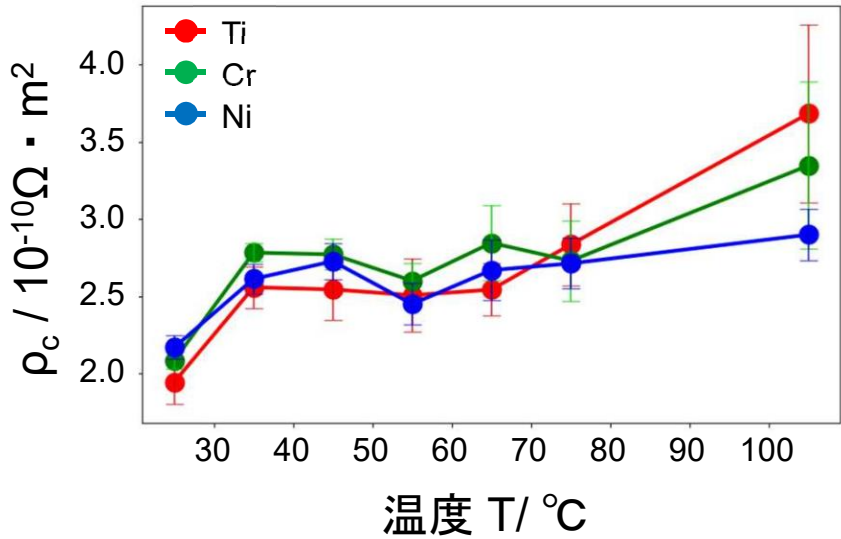
実験結果(電極間距離の抵抗)



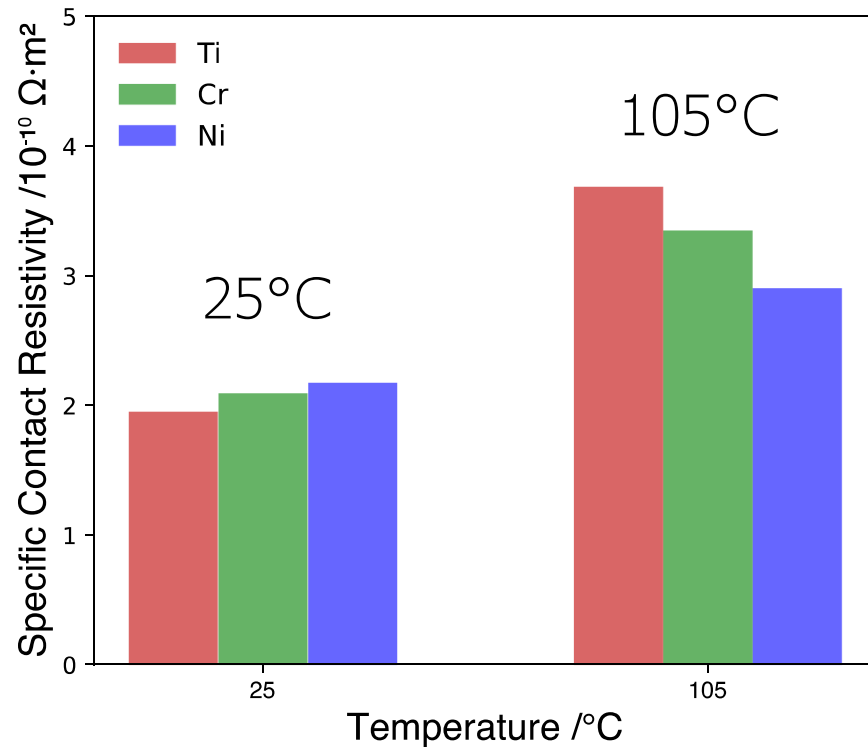
実験結果(電極間距離の抵抗)

アニメーションスライド

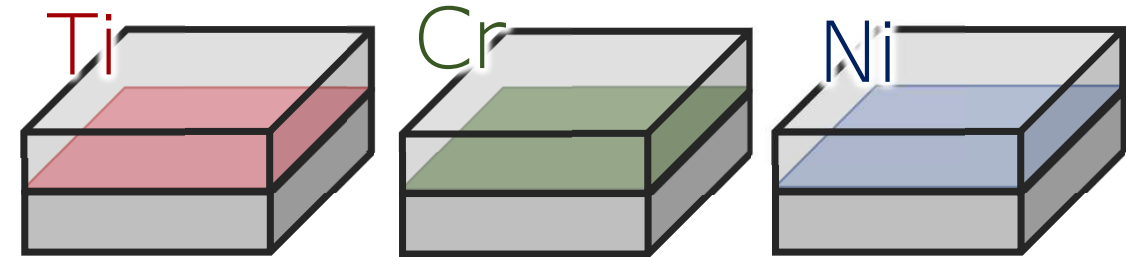
固有接触抵抗率の温度依存性



温度増加に伴ってρ_cが増大



同じ半導体と金属の組み合わせでも、異なる温度に依存して固有接触抵抗率に差異が生じる。



- 異なる材料間の界面物性(固有接触抵抗率)を精密に測定する手法を開発し、固有接触抵抗率の比較に成功した。
- 各所温度条件において、半導体/金属材料界面の固有接触抵抗率がそれぞれ異なることを解明した。
- 半導体デバイスの利用温度・環境に合わせた材料界面の探索技術に期待される。

● 問い合わせ先

京都工芸繊維大学

産学公連携推進センター 知的財産戦略室

(研究推進・産学連携課 知的財産係)

TEL : 075-724-7039

Mail : chizai@kit.ac.jp

Web <https://www.liaison.kit.ac.jp/>

● 産学連携の経歴

2011年 - 2020年

50社以上の企業と共同研究実施の経験

2015年 - 2022年

理化学機器メーカー/商社Y社、化学系材料メーカーN社、総合建設機器メーカーA社との共同研究を実施

2020年 - 現在

大学発スタートアップ 大阪ヒートクール(OHC)設立

2024年 - 現在

総合電子機器メーカーT社との共同研究を実施

● 今回の発明

名称：固有接触抵抗率の測定方法および半導体を有するエネルギー変換装置の設計方法、

出願番号：特願2025-047342

出願人：京都工芸繊維大学、発明者：菅原 徹、桂 章皓、鶴元 真妃



- 現在、一般に熱電変換デバイスに用いられている化合物半導体(BiTe系)のみについて、標準的なバリア金属との接触抵抗を評価している。
- 今後は、あらゆる化合物半導体(例えばパワー半導体用途など)と金属との接触抵抗の物性測定データの収集を必要としている。
- また、実用化に向けて、熱接触抵抗の測定を精密測定できるように技術を確立する必要がある。
- さらに、これらの収集したデータを有効に活用するデバイス設計指針や、その予測モデルの作成などにも着手する必要がある。

集積材料・異相界面科学 研究分野 (菅原研究室)

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

京都工芸繊維大学
KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Acknowledgment

本研究は、科研費基盤B(JSPS)、戦略的創造事業(JP MJCR19J1, JST CREST)、若手官民 (NEDO)、物質・デバイス領域共同拠点 (MEXT)、村田学術振興財団、住友財団、泉科学技術振興財団などの助成を受けたものである。

Thank You for Kind Attention.