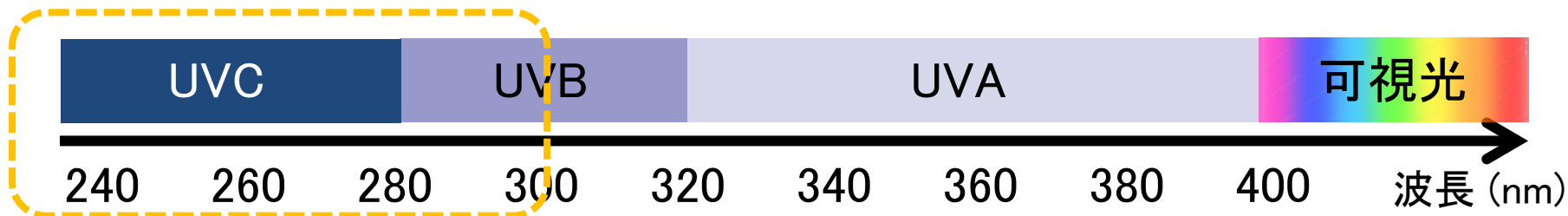


深紫外領域で活用できる 透明電極材料の提案

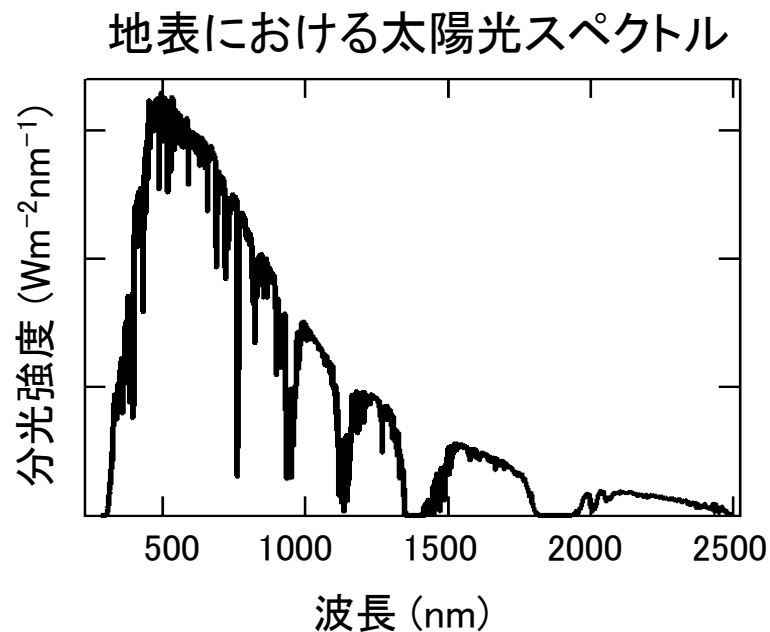
東京都立大学 理学部 化学科
教授 廣瀬 靖

2025年11月25日

深紫外線の特徴



- 細菌やウイルスを不活化
→ 殺菌・浄水・空気浄化
- 地表の太陽光に含まれない
→ 火災検知、屋外無線通信
- 高空間分解能(回折限界)
→ 高密度光記録、露光装置



様々な分野への応用が期待

透明導電膜

- 可視光透過率(数10%)と電気伝導性(数10～数k Ω /sq)を兼ね備えた薄膜(厚さ数10 nm～数100 nm)
- 様々な光デバイスで発光/受光用の窓電極として広く利用
- 一般には伝導キャリアを添加したワイドバンドギャップの酸化物半導体(In₂O₃系, SnO₂系, ZnO系, TiO₂系など)

太陽電池



Image: GOE2010, “Dji fly 20230602 13744 PM 25 1719032157524 photo optimized.jpg”, via [Wikimedia Commons](#), licensed under CC BY-SA 4.0

ディスプレイ、タッチパネル

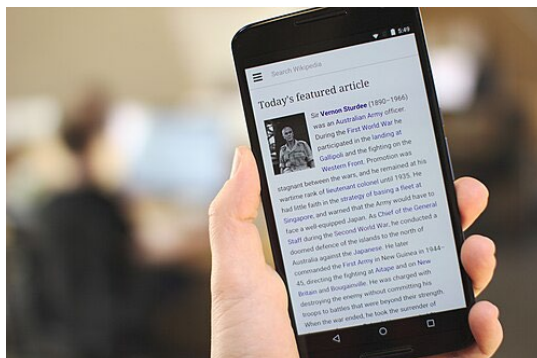


Image: Sage Ross (Ragesoss), “Wikipedia homepage on a large Android phone, 2015-04-16.jpg”, via [Wikimedia Commons](#), licensed under CC BY-SA 4.0

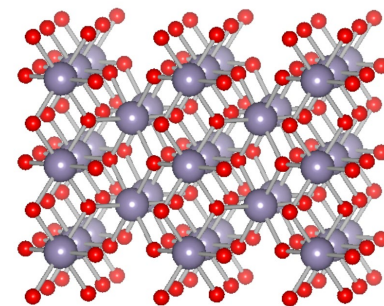
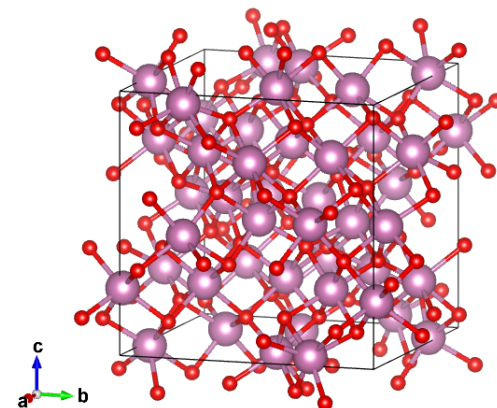
LED



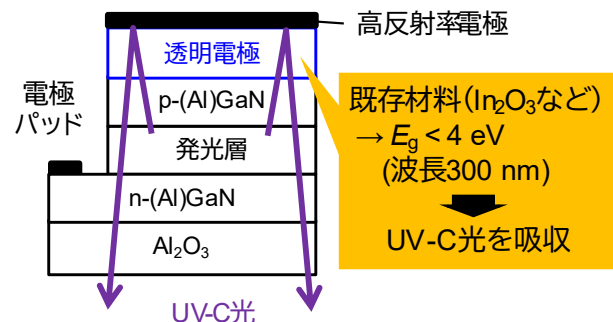
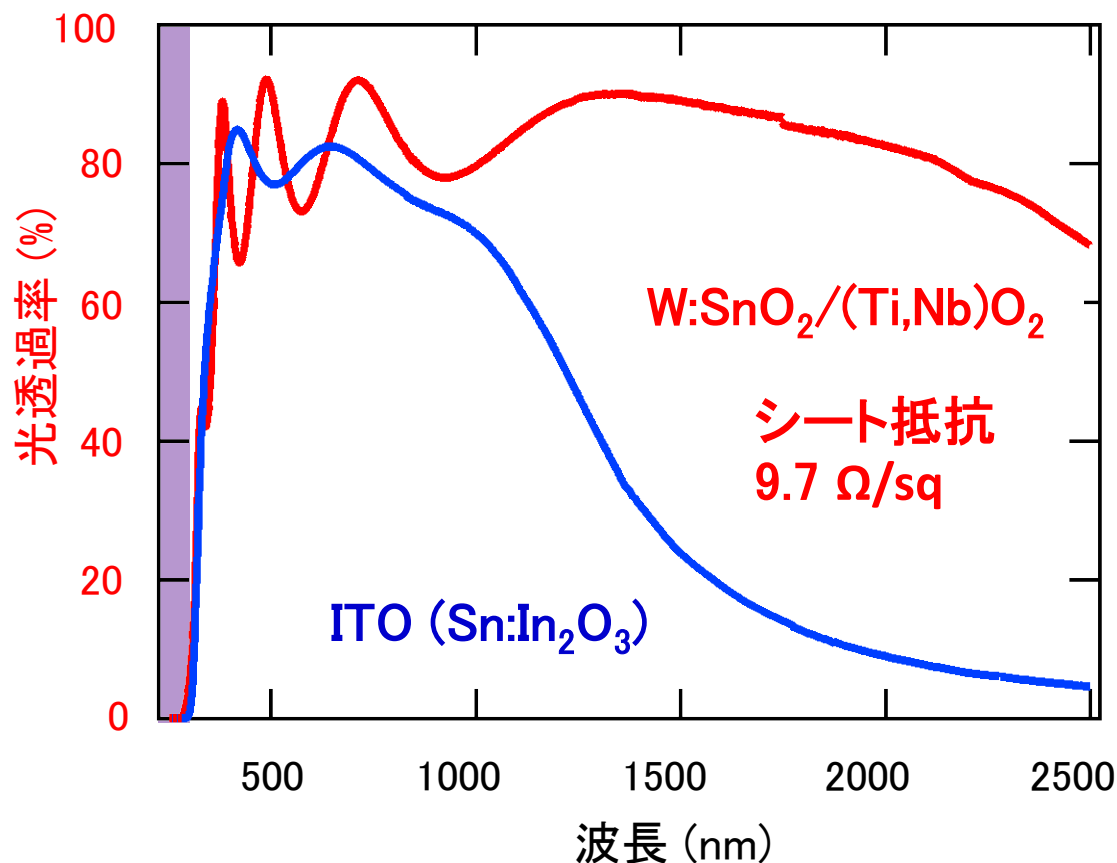
Image: Afrank99, “Verschiedene LEDs.jpg”, via [Wikimedia Commons](#), licensed under CC BY-SA 2.0

実用的な透明導電膜

- $\text{Sn:In}_2\text{O}_3$ (ITO)
 - ビックスバイト型(欠陥蛍石型)構造
 - 高い電気伝導性と適度な化学的安定性
(良好なエッチング特性)
 - 様々なデバイスに広く用いられる
 - 希少金属(In)を含む
- Sb:SnO_2 , F:SnO_2
 - ルチル型構造
 - 化学的安定性
(ウェットエッチング難)
 - 薄膜太陽電池に用いられる
 - ITOよりも大きなバンドギャップ
 - 資源豊富

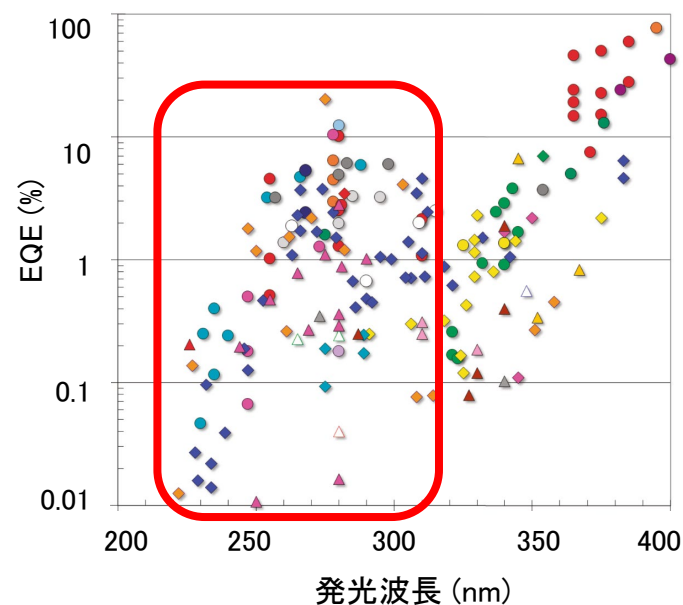


発明の背景



窒化物系LEDの外部量子効率 (EQE)

M. Kneissl *et al.*, Nat. Photon. (2019).

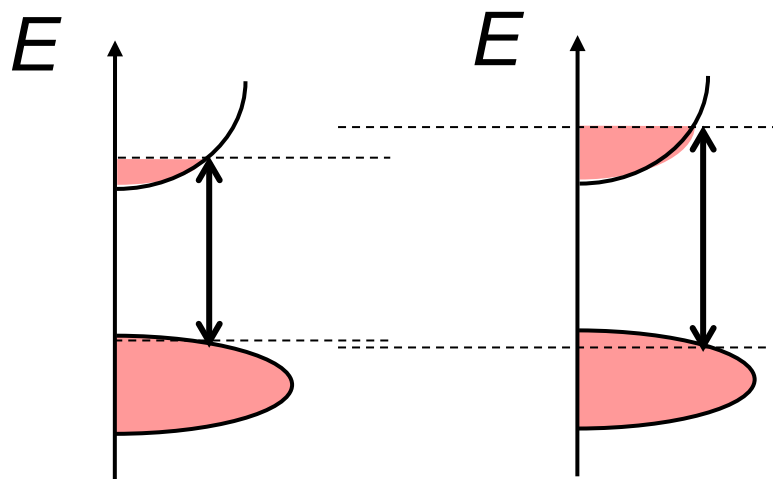


従来の透明導電膜は(深)紫外光に対して不透明
深紫外光まで透明な透明電極が求められる

従来技術とその問題点

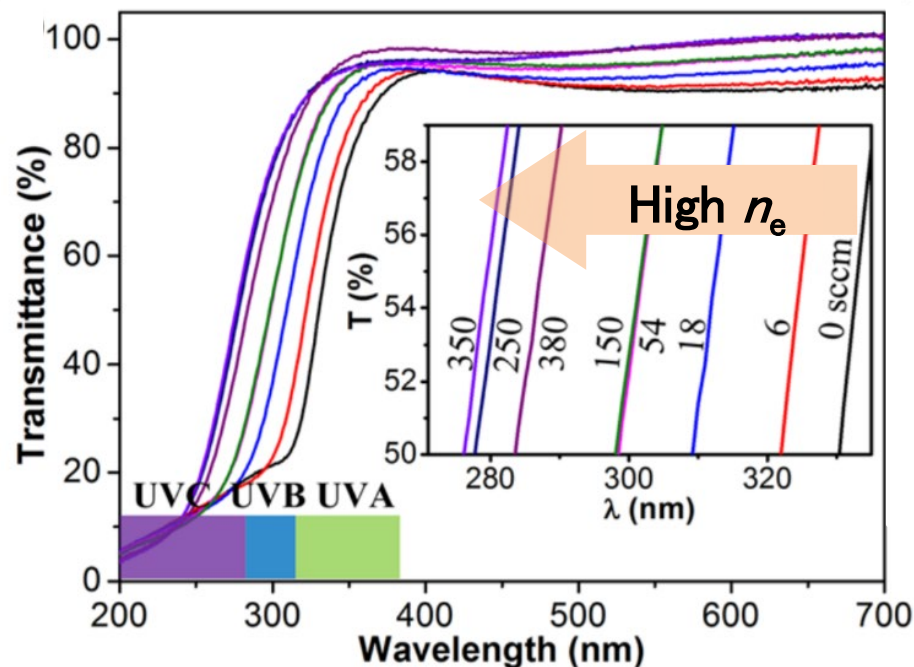
紫外透明電極の開発指針①

高濃度ドーピングによる光吸収端の短波長シフト(Burstein-Mossシフト)



高濃度SnドーピングITO (Al_2O_3 基板)

Z. Chen *et. al.*, Appl. Phys. Lett. (2017).



- シート抵抗 $R_s = 30 \, \Omega/\text{sq.}$
- 内部透過率 $T_{\text{int}} = \sim 55 \% @ 280 \, \text{nm}$

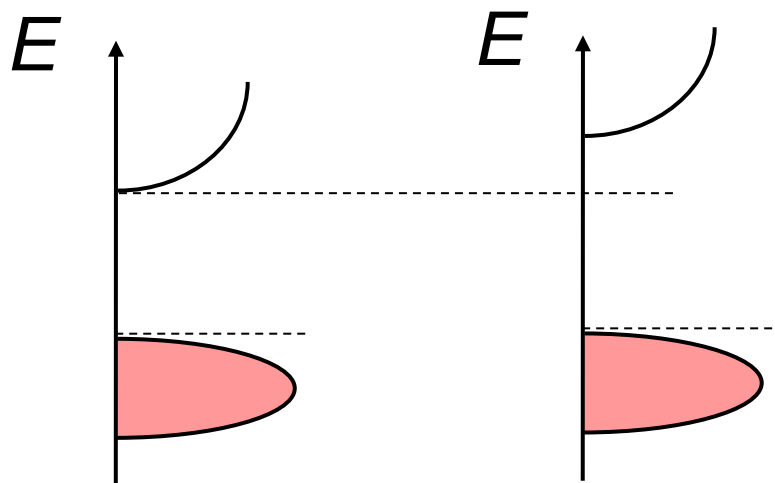
ドーピング可能な量に上限

☹ In_2O_3 系では深紫外領域の光透過率が不十分

従来技術とその問題点

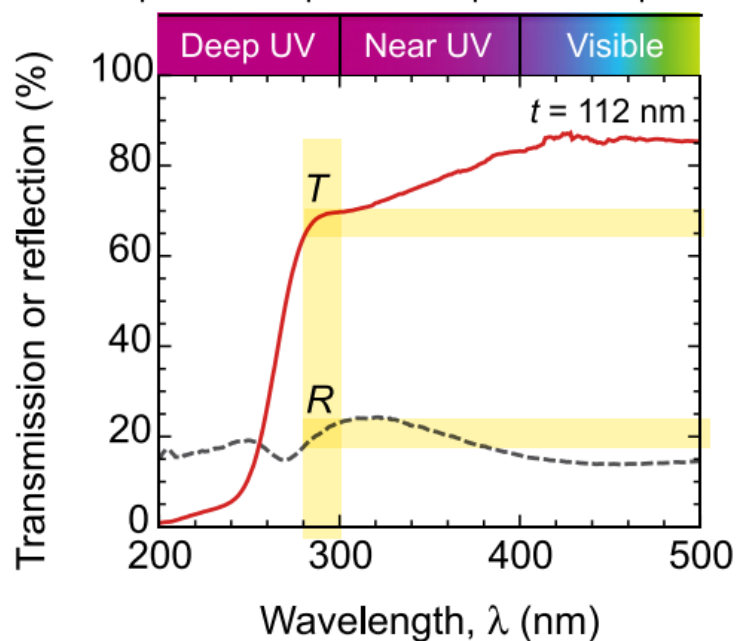
紫外透明電極の開発指針②

バンドギャップが広い半導体に伝導電子をドーピングする



Laドーピング SrSnO_3 (MgO基板)

M. Wei *et. al.*, Appl. Phys. Lett. (2020).



- $R_s = \sim 30 \, \Omega/\text{sq.}$
- $T_{\text{internal}} @ 280 \, \text{nm} = \sim 75 \%$

☺ 優れた透明導電性

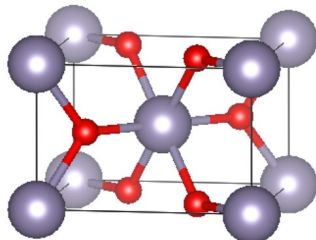
☹ 成膜可能な基板に制限 (MgO, SrTiO_3 , ...)

☹ 3元化合物のため組成ずれにより性能低下

従来技術とその問題点

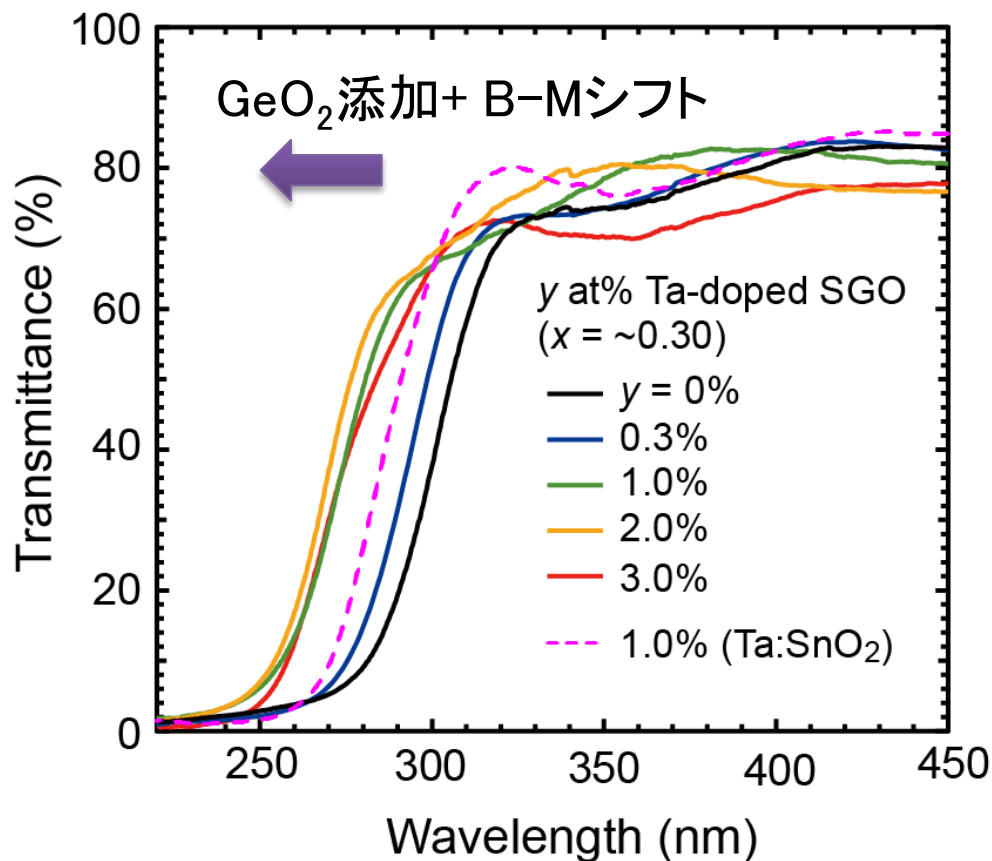
Taドープ(Sn,Ge)O₂

Y. Nagashima, YH, *et. al.*, Chem. Matter. (2022).



SnO₂に結晶構造が同じGeO₂を固溶してバンドギャップを拡大

	SnO ₂	GeO ₂
<i>a</i> (Å)	4.74	4.40
<i>c</i> (Å)	3.19	2.86
<i>E_g</i> (eV)	3.59	4.68



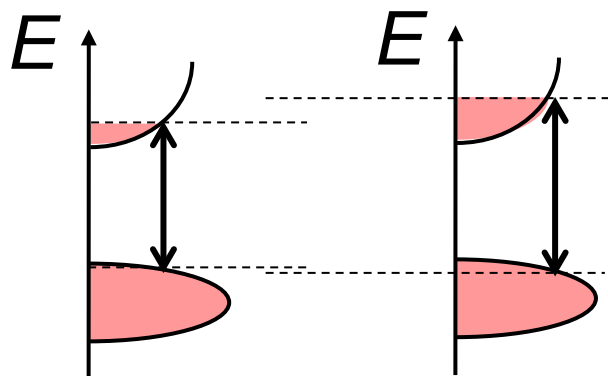
- ☺ 実用基板(サファイア、AlN)上で優れた特性を実現
- ☹ GeOの脱離によるSn/Ge比のずれ

新技術の特長

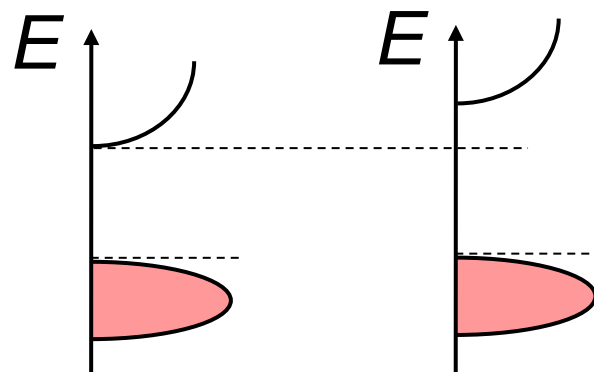
実用材料である SnO_2 に高濃度のTaをドーピングすることで、深紫外透明導電性を向上

- ☺ $(\text{Sn}, \text{Ge})\text{O}_2$ に匹敵する深紫外光透明導電性
- ☺ 紫外光デバイスに用いられる実用的な基板（サファイア、III-V族窒化物半導体）上に形成可能
- ☺ 2元化合物を母材としており、組成制御が容易

高濃度ドーピング



バンドギャップ拡大



薄膜作成方法

パルスレーザー堆積(PLD)法

基板

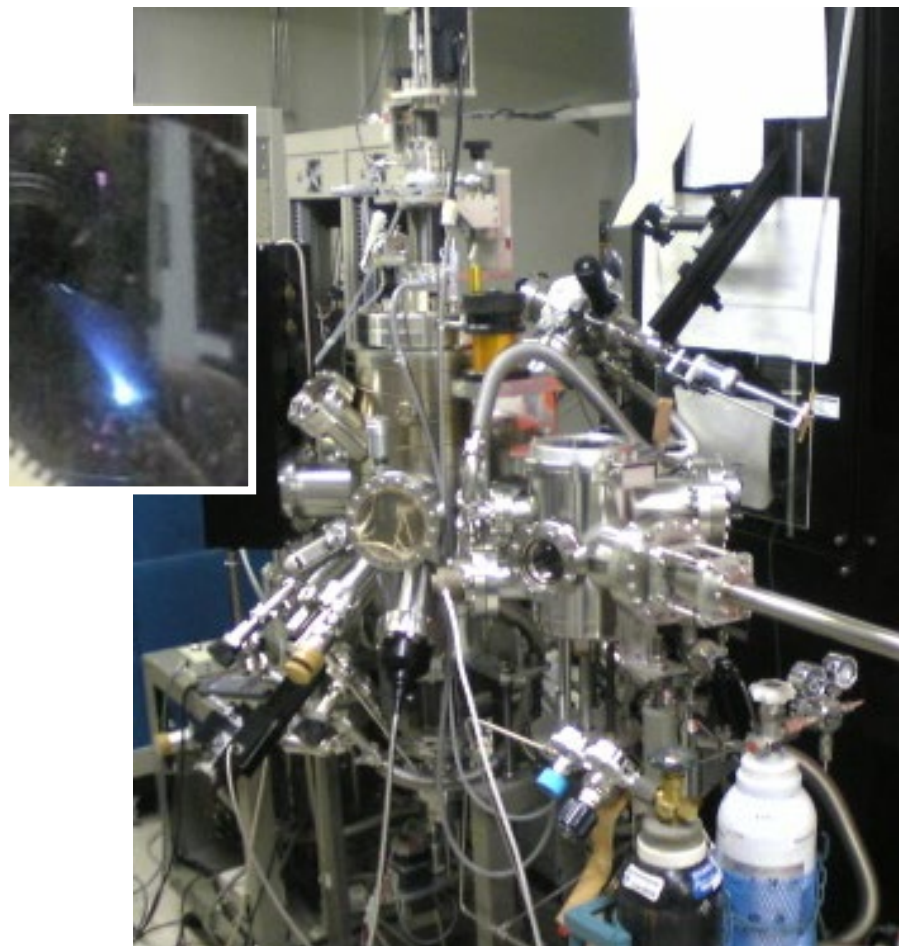
- AlNテンプレート
- Al_2O_3

赤外線加熱

紫外パルス
レーザー

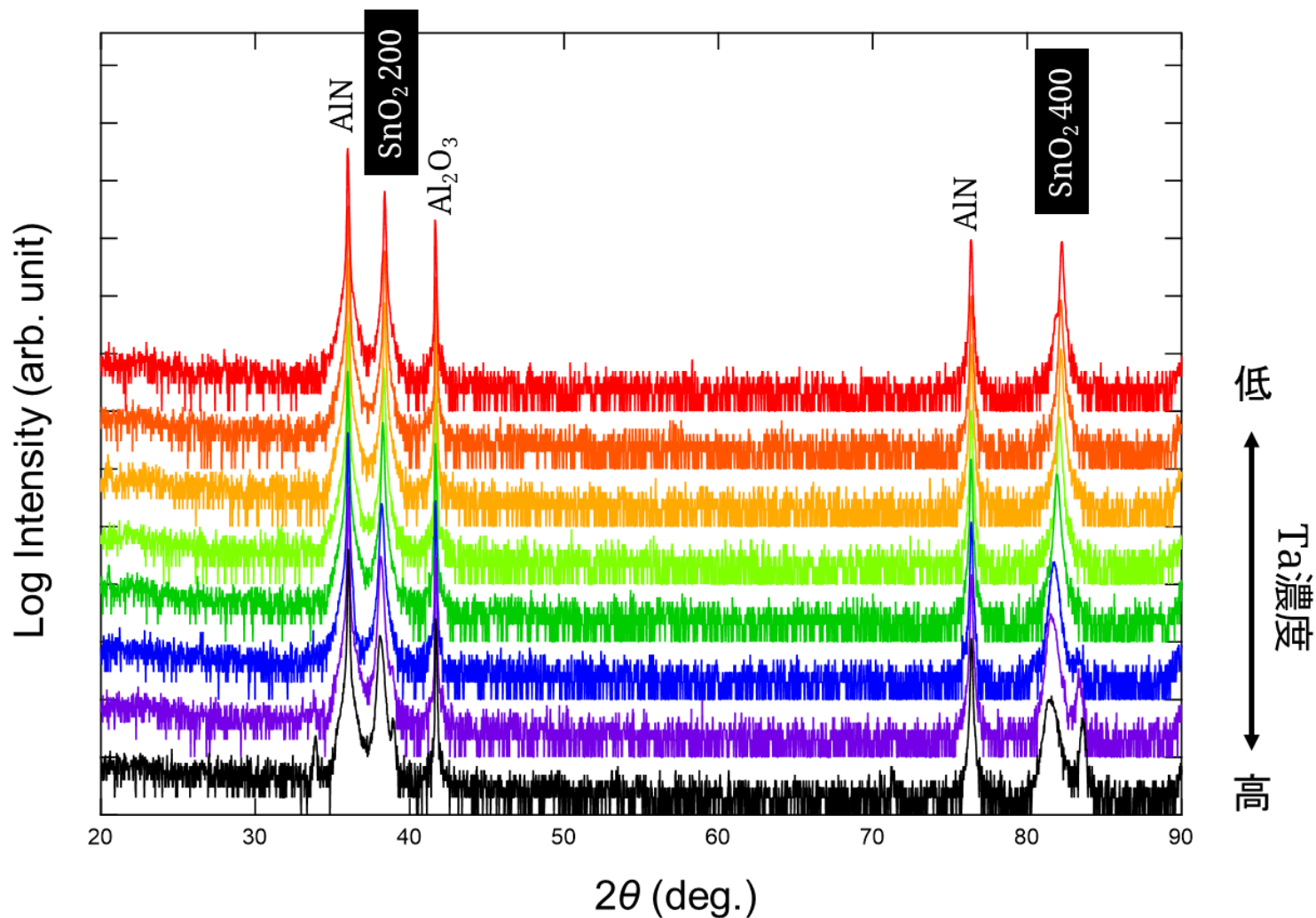
$\text{Ta}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$
焼結体

O_2



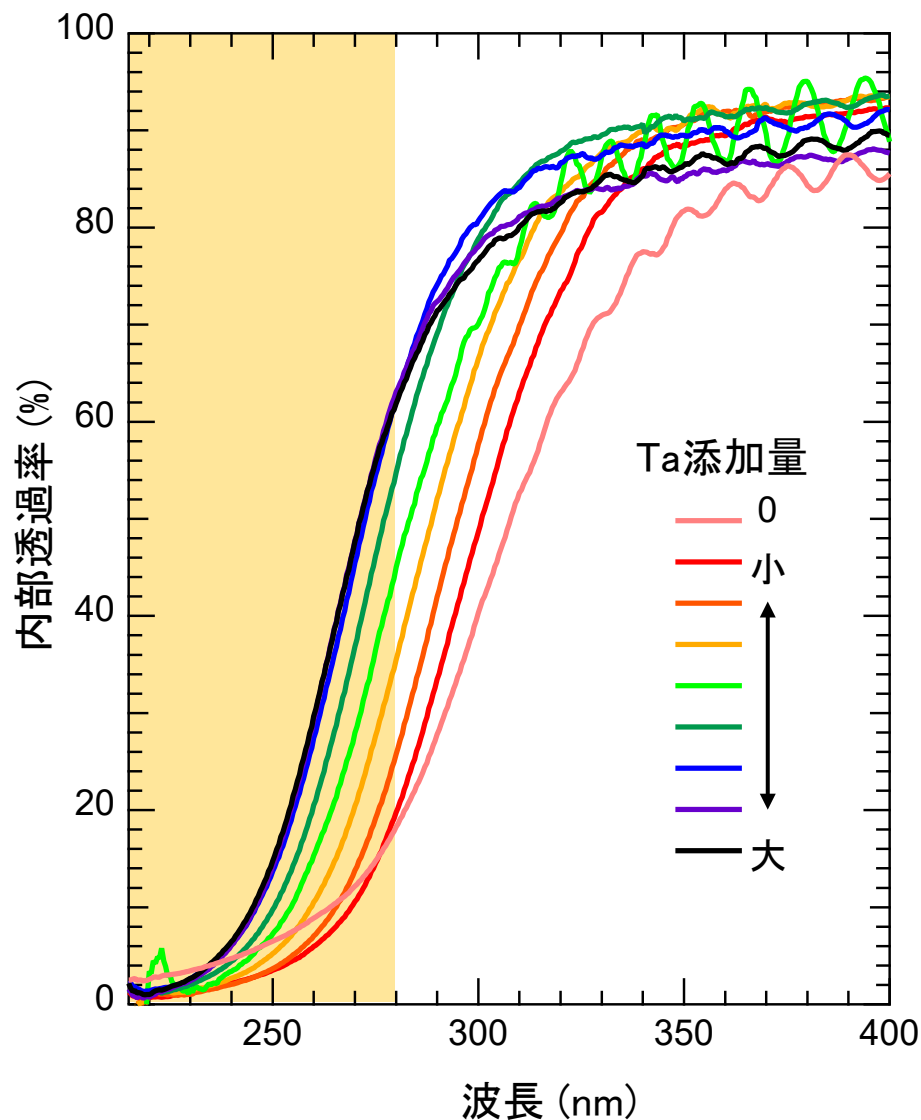
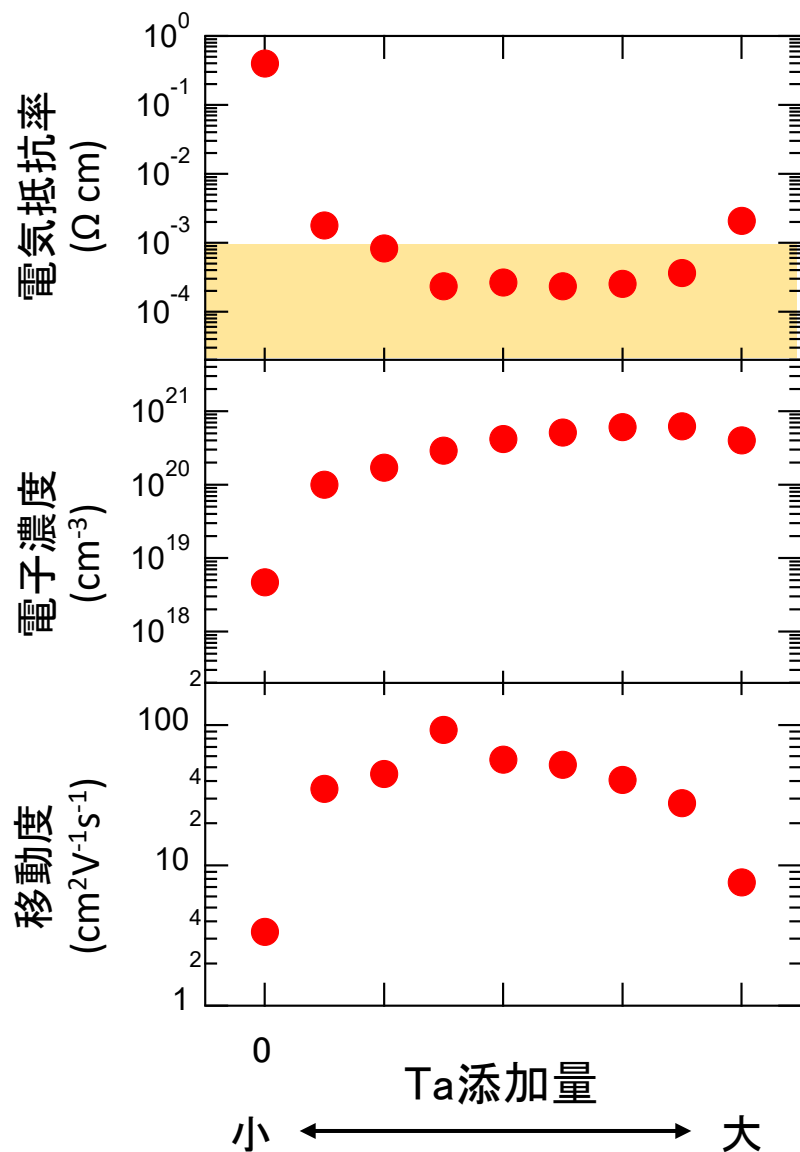
ターゲット交換が容易→最適組成探索などの基礎実験に適する
(現有装置の成膜面積は最大で15 mm角程度)

AlN(0001)上への単結晶薄膜形成



サファイア基板(c, m, r面)やGaN基板にもエピタキシャル成長可能

AlN上に形成した電極の深紫外透明導電性



従来技術との比較

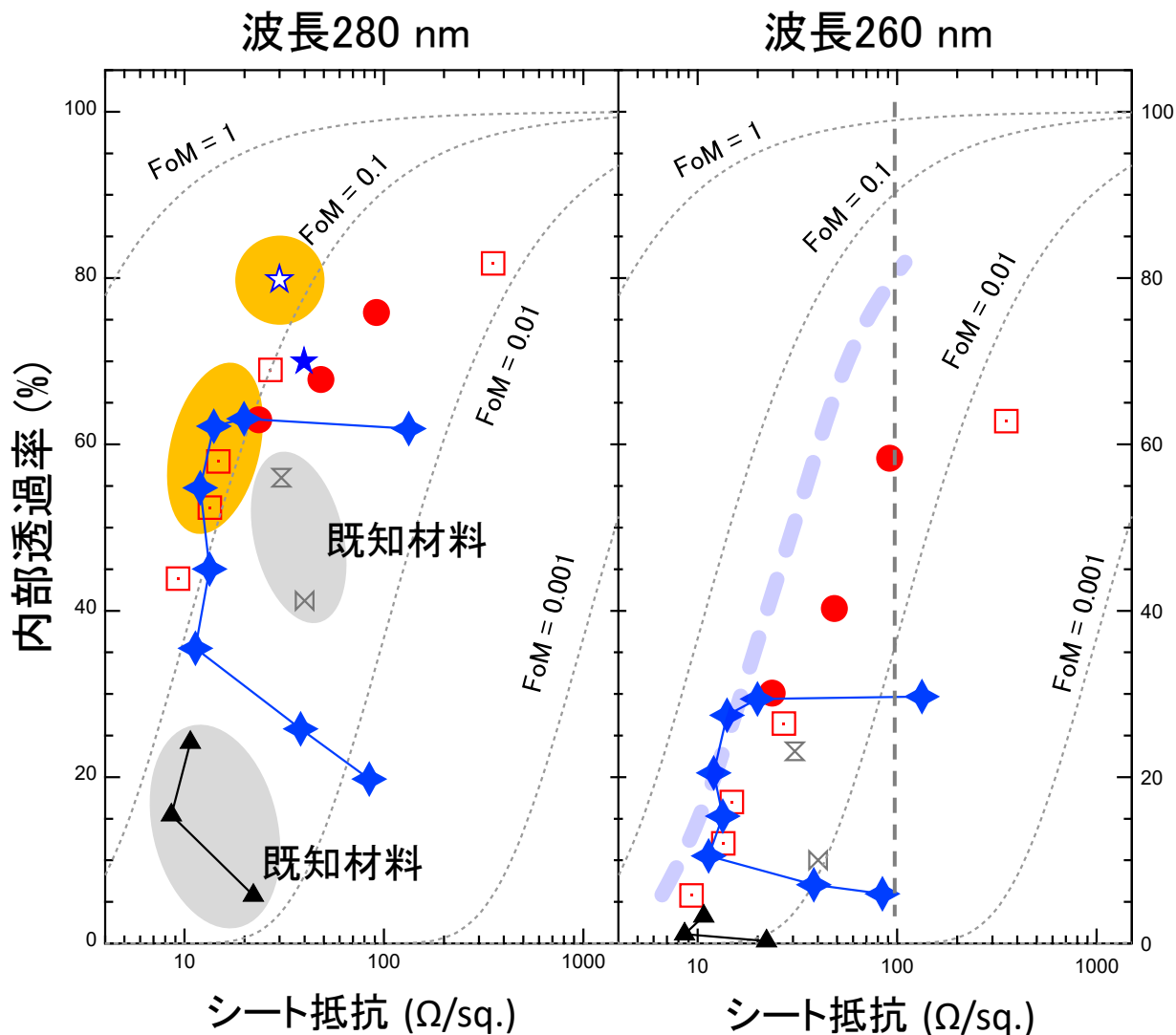
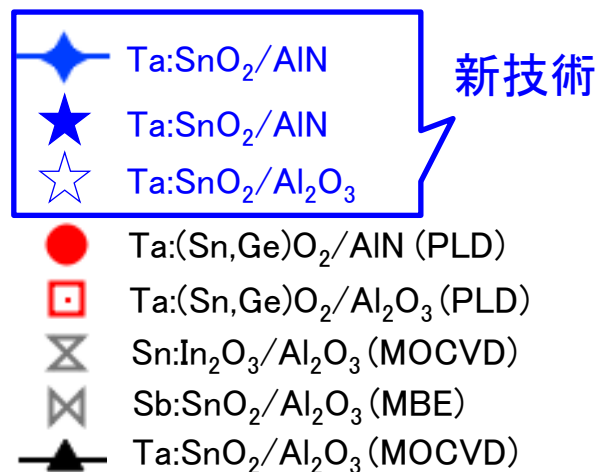
図の左上ほど高性能

破線は性能指数が一定

$$FoM = (\rho \cdot \alpha)^{-1}$$

抵抗率

吸収係数



優れた深紫外透明導電性を実現

想定される用途

- シート抵抗 $\sim 10 \Omega/\text{sq}$ で波長280 nm、 $\sim 100 \Omega/\text{sq}$ で波長260 nm程度までの深紫外線を用いる様々な発光・受光デバイス(LEDや光センサー)の高効率な窓電極として利用可能
- 窓電極の他に、深紫外線を透過可能な帯電防止膜(フォトリソなど)への応用も期待できる

実用化に向けた課題

- 現在までに、パルスレーザー堆積法で10 mm角程度のサファイアやIII-V族窒化物半導体基板上に電極を形成できるところまで開発済み
- 量産化には、スパッタリング法やミスト化学気相成長法を用いた大面積基板への成膜が必要（研究室では2インチ程度まで検討可能）
- 低コスト光センサーや帯電防止膜への応用には、石英ガラス基板上での低抵抗薄膜の形成（配向制御技術の開発）が必要
- 将来的には、ウェットエッチングによるパターニング法の開発も重要（非晶質膜をエッチングした後で固相結晶化する）

社会実装への道筋

時期	解決すべき課題	具体的な取り組み
現在まで	- 材料設計指針の確立 10 mm角のサファイアやIII-V族窒化物半導体基板上への深紫外透明電極の形成を実現	
2年後	2インチ基板への電極形成 - ガラス基板上への電極形成	- スパッタリング法やミスト化学気相堆積法の適用 - 種結晶(シード層)による配向制御
3年後	ウェットエッチングによるパターンニング	- 非晶質膜のエッチングと固相結晶化 - 試作デバイスへの電極形成
5年後	短波長における特性の向上	新たな電極材料の開発

企業への期待

- 本技術を導入することで、深紫外発光・受光素子やモジュールの高効率化に貢献できる可能性がある。
- 2インチ超の大面積基板への成膜や酸化物のウェットエッチングの技術を有する企業との共同研究を希望する。

企業への貢献・PRポイント

- サファイアやAlNといった実用基板上に形成できるため、紫外光エレクトロニクスデバイスとの親和性が高い
- 既存材料である SnO_2 を母材としており、プロセスの最適化も容易と期待される
- 本技術の導入にあたっての技術指導が可能

本技術に関する知的財産権

発明の名称：深紫外光透過型透明電極付き基材及び
深紫外光透過型透明電極付き基材の
製造方法

出願番号：特願2023-106223

出願人：東京都公立大学法人

発明者：廣瀬 靖

産学連携の経歴

2021-2023年 NEDO 官民による若手研究者発掘
支援事業に採択

2022-2024年 民間企業との共同研究、技術指導

お問い合わせ先

東京都立大学
産学公連携センター URAライン

TEL 042－677－2202

e-mail sangaku-ura@jmj.tmu.ac.jp