

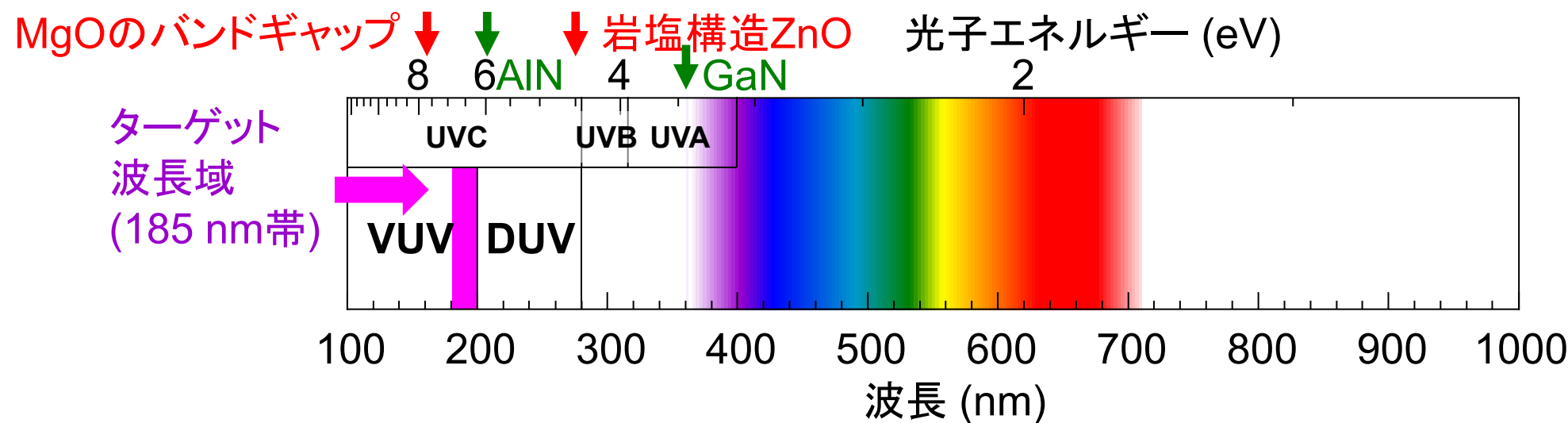
デバイス・装置

半導体ベースの真空紫外光源で 水銀フリーな社会に貢献

工学院大学 先進工学部 応用物理学科
教授 尾沼 猛儀

2026年7月9日(木) 11:00～11:25

従来技術とその問題点(光源の現状)



エキシマランプ
Xe₂: 172 nm
ArF: 193 nm
KrBr: 207 nm
KrCl: 222 nm

- ✓ ガス価格の高騰
- ✓ 波長選択性が低い

低圧水銀灯
λ = 185 and 254 nm
適用除外製品として
例外使用が
認められている

185 nmの代替への
取り組みは少ない

AlGaN系LED
λ > 210 nm

高圧水銀灯
2020年末 製造禁止

蛍光灯

電球型蛍光灯: 2026年末
直管蛍光灯: 2027年末

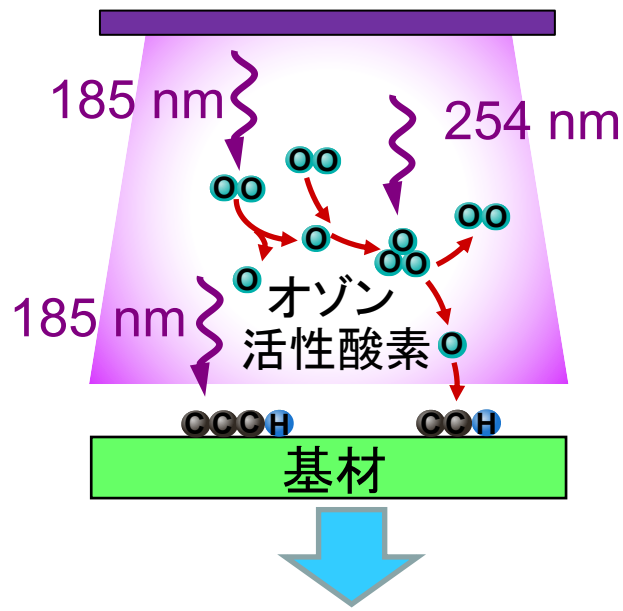
水銀に関する
水俣条約
2017年発効

LED

VUV: 真空紫外, DUV: 深紫外
eV: 電子ボルト, nm: ナノメートル (1ナノメートルは1億分の1メートル)

低圧水銀灯の需要

殺菌、消毒、洗浄



半導体メーカー

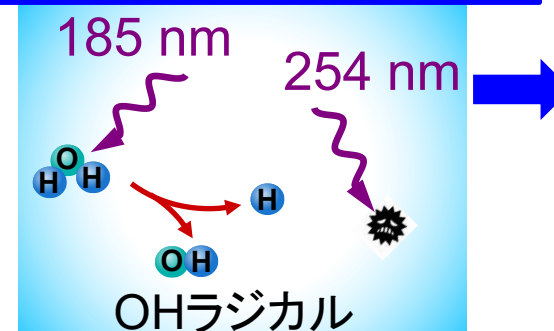
食品メーカー

医療機器メーカー

化学メーカー

低圧水銀灯：
殺菌、水処理に最適な
波長を備える

水処理、空気清浄



AlGaN系LED
により代替

Xe₂: 172 nm

ArF: 193 nm

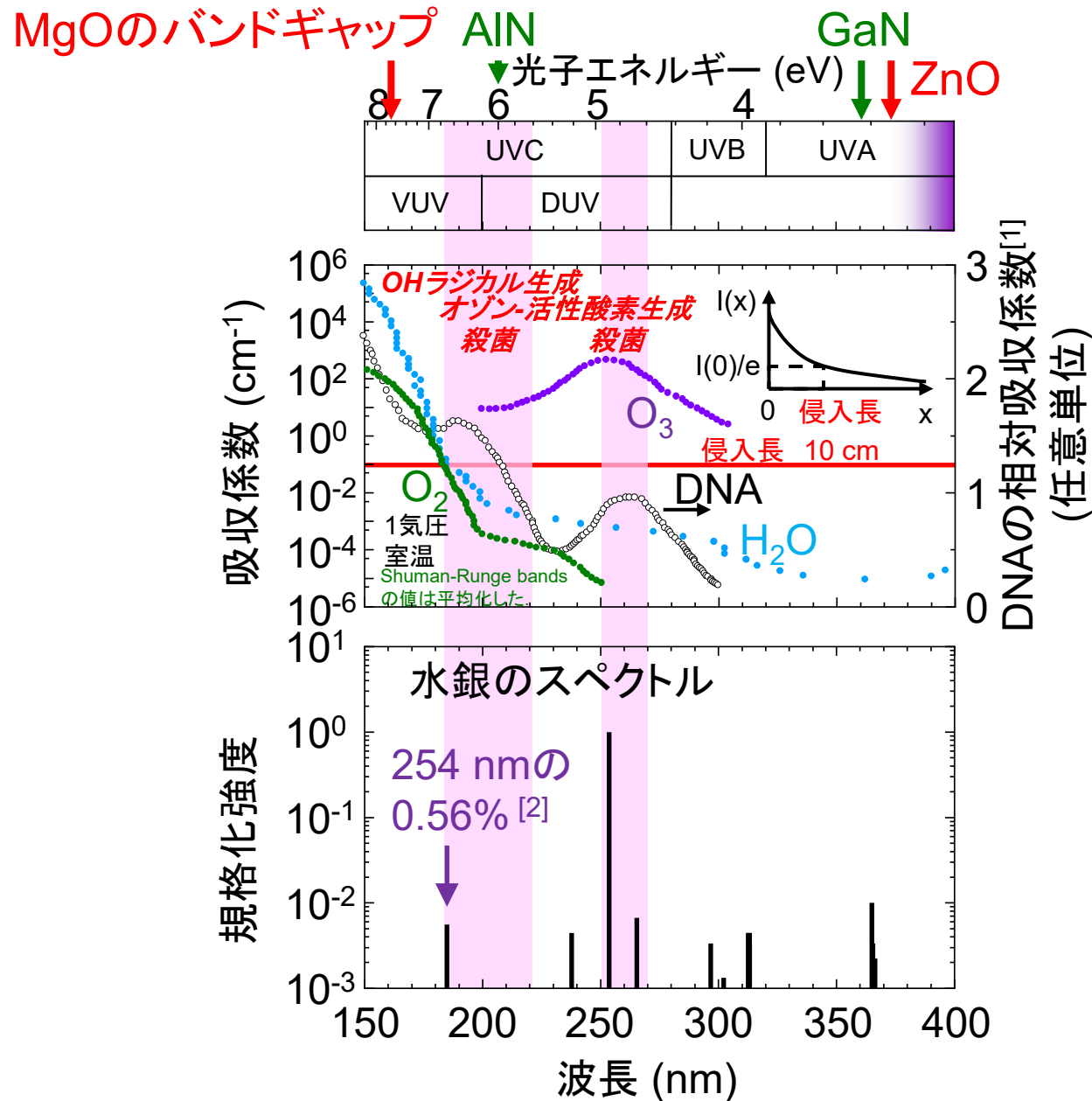
エキシマランプ
✓ ガス価格の高騰
✓ 波長選択性が低い

低圧水銀灯の需要は伸び続けている

市場規模は2030 年末までに 38 億米ドル
(2022年の1.5倍)と予想されている^[1]

[1] <https://www.verifiedmarketreports.com/ja/product/global-low-pressure-mercury-lamps-market-report-2019-competitive-landscape-trends-and-opportunities/>

低圧水銀灯の特徴



低圧水銀灯:
(メリット)

殺菌、水処理に最適な波長を備える
(デメリット)

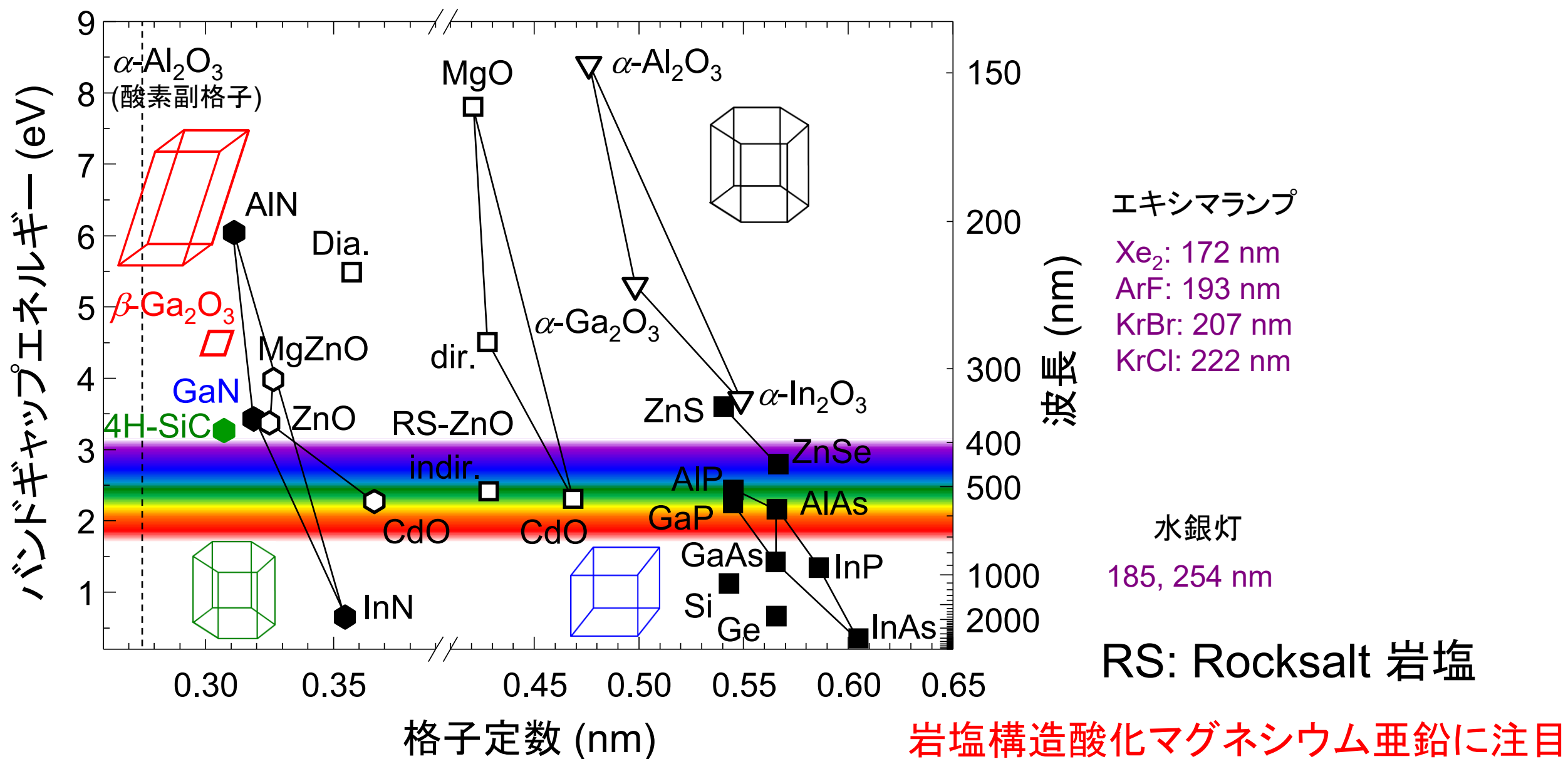
185 nmの発光強度は254 nmの発光
強度に比べて1/100以下

超ワイドギャップ半導体ベースの光源
は、バンド端付近の発光により、選択
的に185 nmを発光させることができる
ため、効率の向上が期待される。

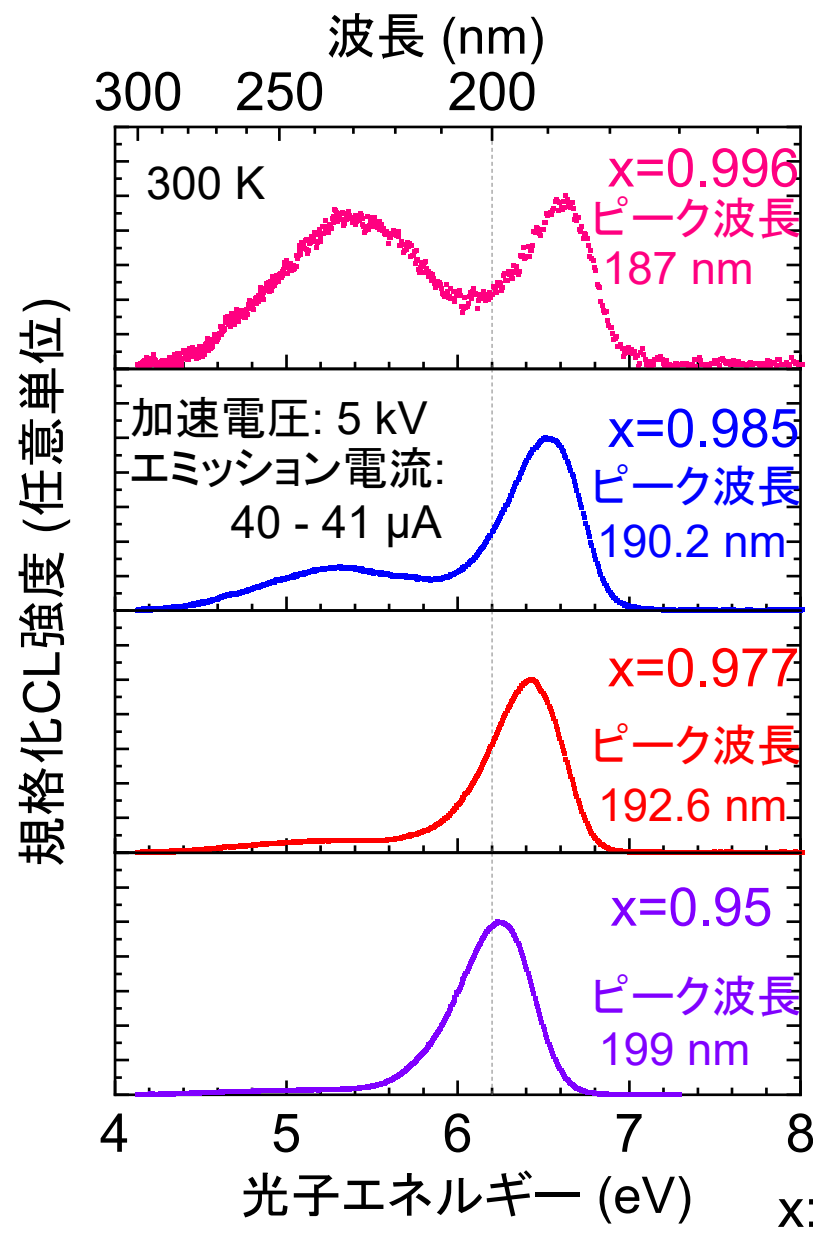
[1] 松永他, Photochem. Photobiol. **54**, 403 (1991).

[2] NIST HP <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

各種半導体のバンドギャップエネルギー



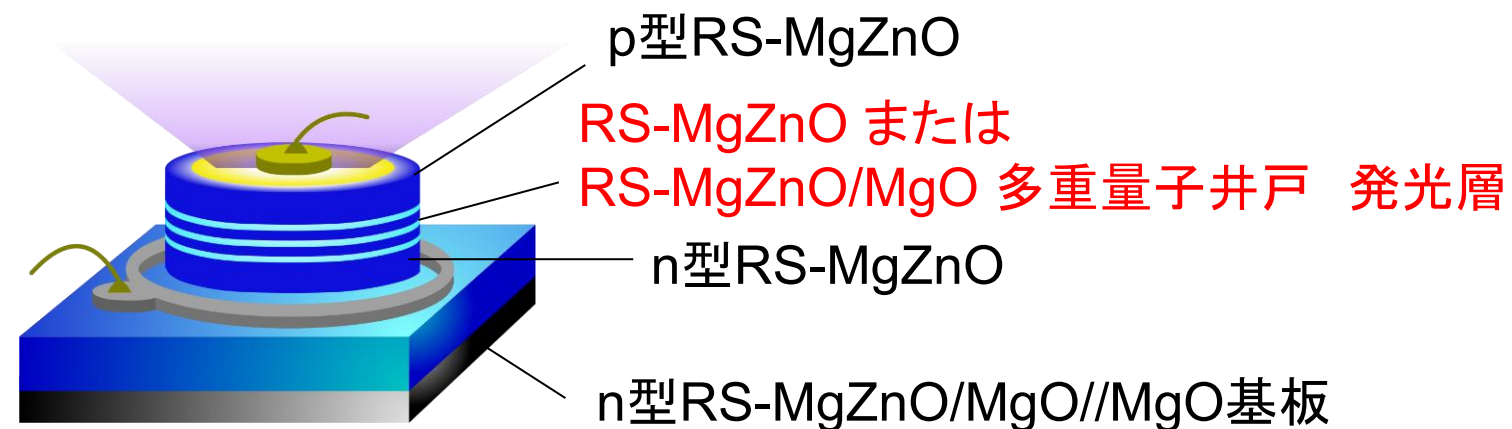
これまでの主な成果①



室温で185 nm帯の発光を実現

水銀フリーな半導体ベースの
真空紫外光源の構造の一例

発光ダイオードの模式図



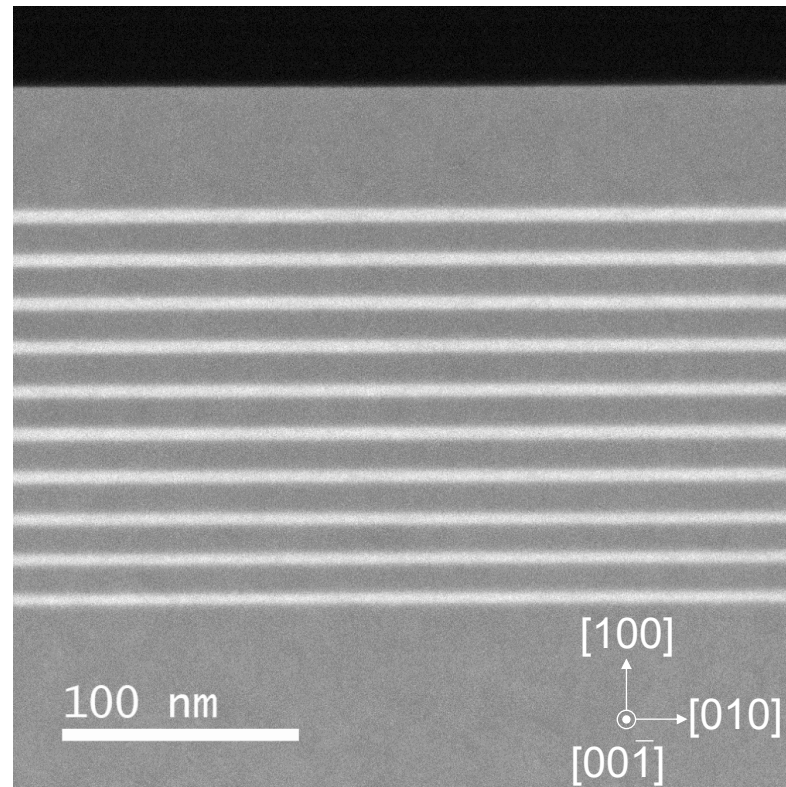
岩塩構造 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 薄膜の
室温のカソードルミネセンス(CL)スペクトル

小川, 尾沼他, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 02SP30 (2024).

これまでの主な成果②

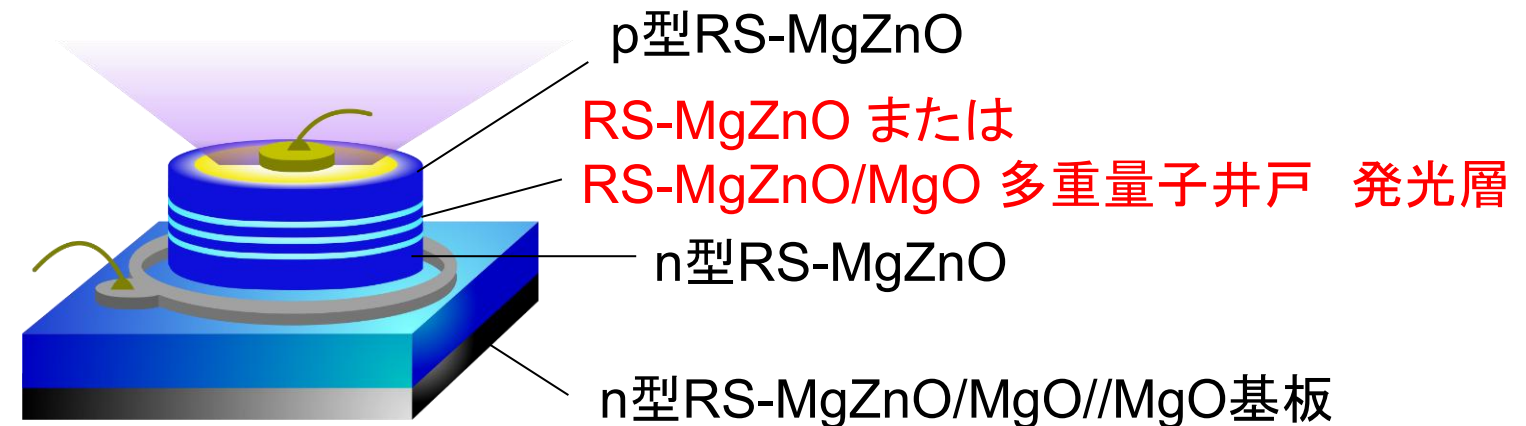
RS-MgZnO/MgO多重量子井戸の製作に成功

■ 断面走査透過電子顕微鏡像



水銀フリーな半導体ベースの
真空紫外光源の構造の一例

発光ダイオードの模式図



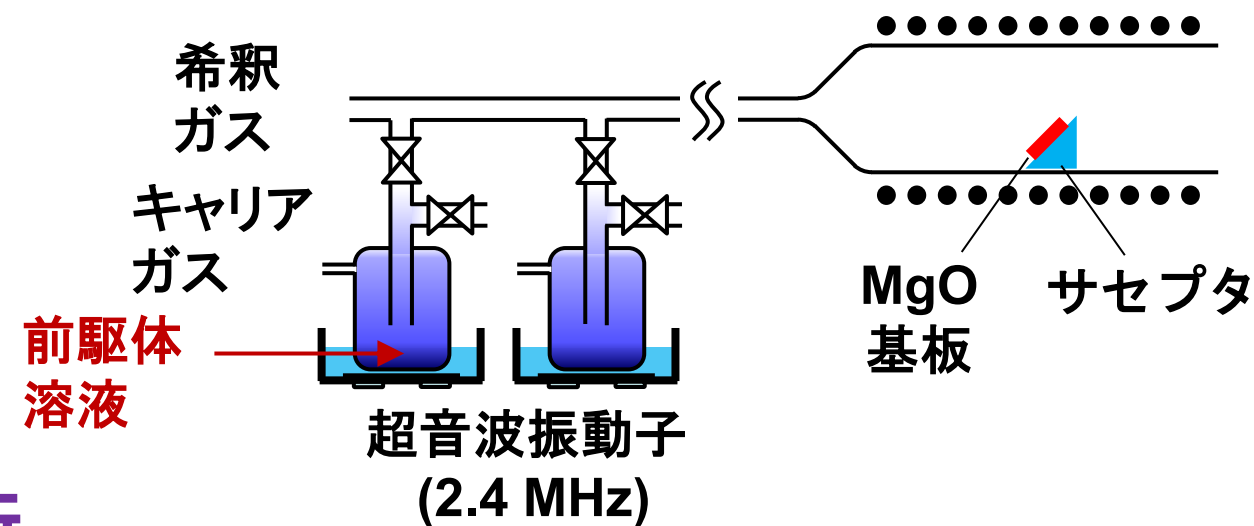
小川, 愛智, 尾沼他, Jpn. J. Appl. Phys. **65**, 080904 (2026).

185 nm帯の発光を実現する新技術

1. 原料交互供給システムを備える

ミスト化学気相堆積(ミストCVD)成長技術

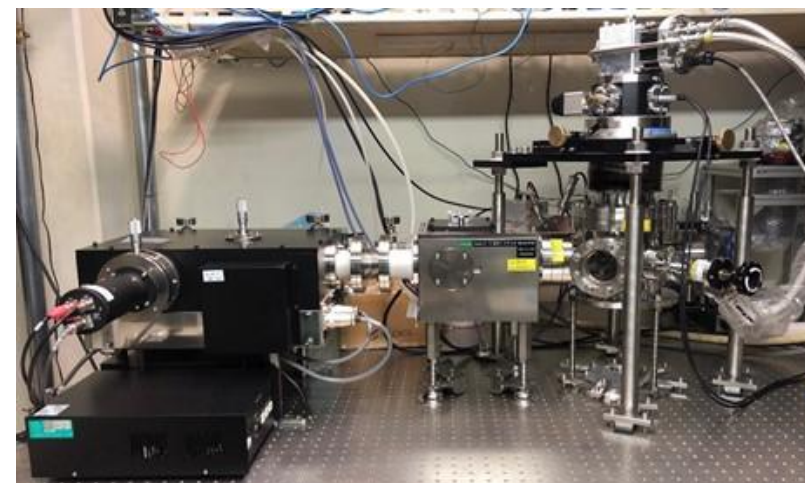
前駆体溶液の組み合わせを変えることで、量子井戸や不純物ドーピング層の連続成膜が可能(特願2025-119206)



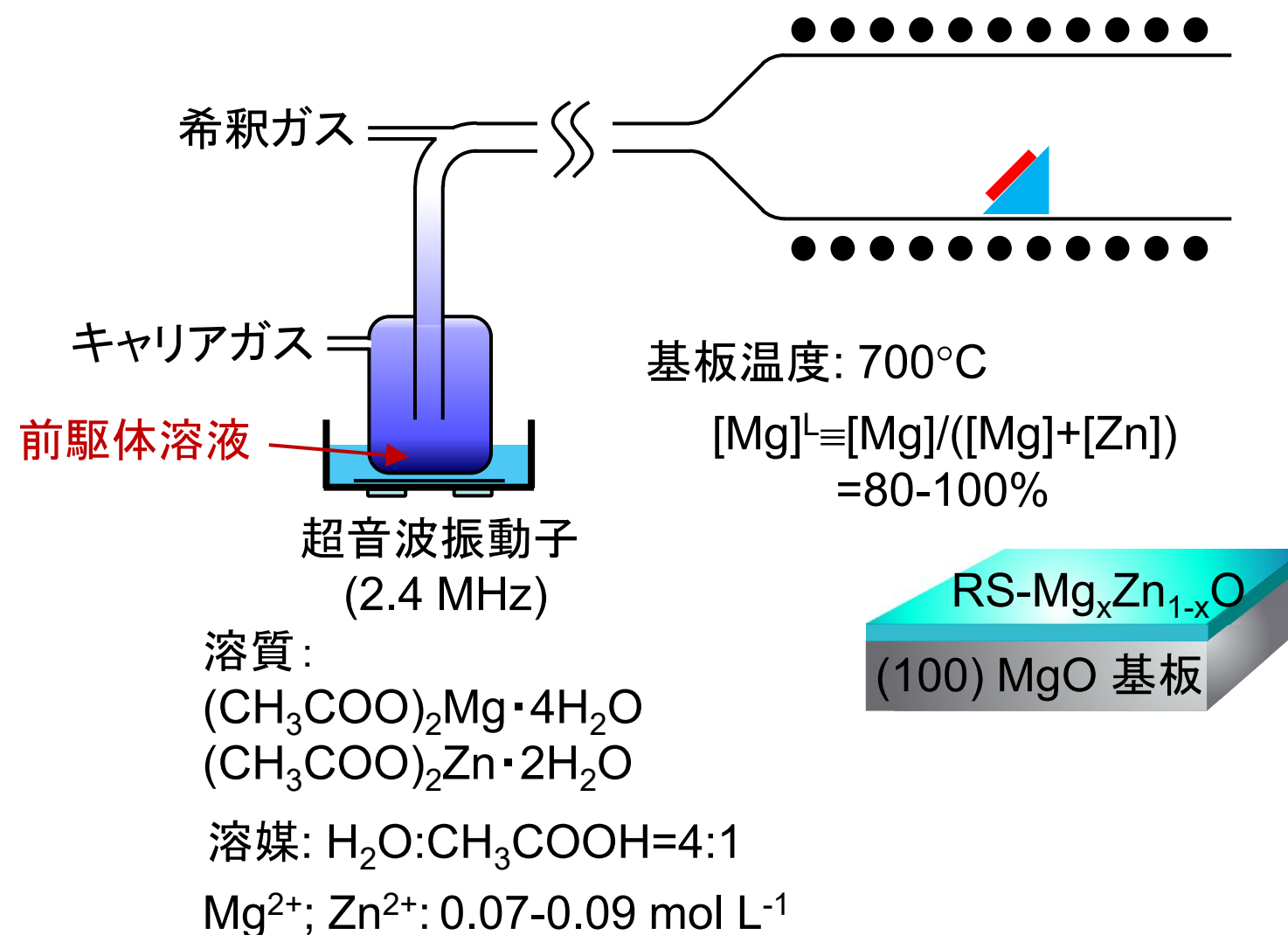
2. 真空・深紫外域での光物性評価技術

最短で115 nmまでのVUV域での透過、反射、発光、フォトルミネセンス励起スペクトル測定が可能

尾沼他, Appl. Phys. Lett. **119**, 132105 (2021).



(100)MgO基板上への 岩塩構造MgZnOのミストCVD成長



小川, 尾沼他, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 02SP30 (2024).

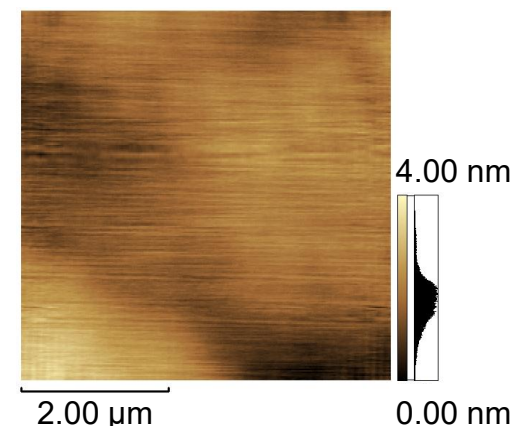
(100)MgO基板上へのRS-MgZnOのミストCVD

熱膨張係数 ($\times 10^{-6} / \text{K}$)	300 K	1000 K
RS-MgO (Ref. 1)	10.5	15.0
RS-ZnO (Ref. 2)	53.6	57
WZ-ZnO (Ref. 3)		
α_a	4.31	
α_c	2.49	
サファイア (Ref. 4)		
α_a	7.3	
α_c	8.1	
石英ガラス (Ref. 5)	0.55	

- 1) G. K. White and O. L. Anderson, J. Appl. Phys. **37**, 430 (1966).
- 2) F. Decremps, Europhys. Lett. **51**, 268 (2000).
- 3) S. Adachi, *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors* (John Wiley & Sons, 2009).
- 4) W. M. Yim and R. J. Paff, J. Appl. Phys, **45**, 1456 (1974).
- 5) B. El-Kareh, *Fundamentals of Semiconductor Processing Technologies*, (Kluwer Academic Publishers, 1995).

表面原子間力顕微鏡像

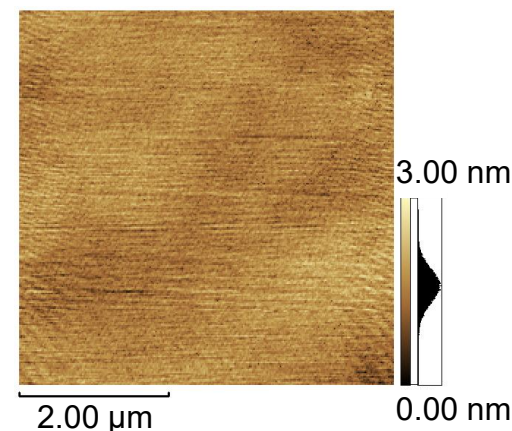
MgOホモエピタキシャル薄膜



厚さ
800 nm

二乗平均平方根粗さ
0.51 nm

RS-Mg_{0.95}Zn_{0.05}Oヘテロエピタキシャル薄膜



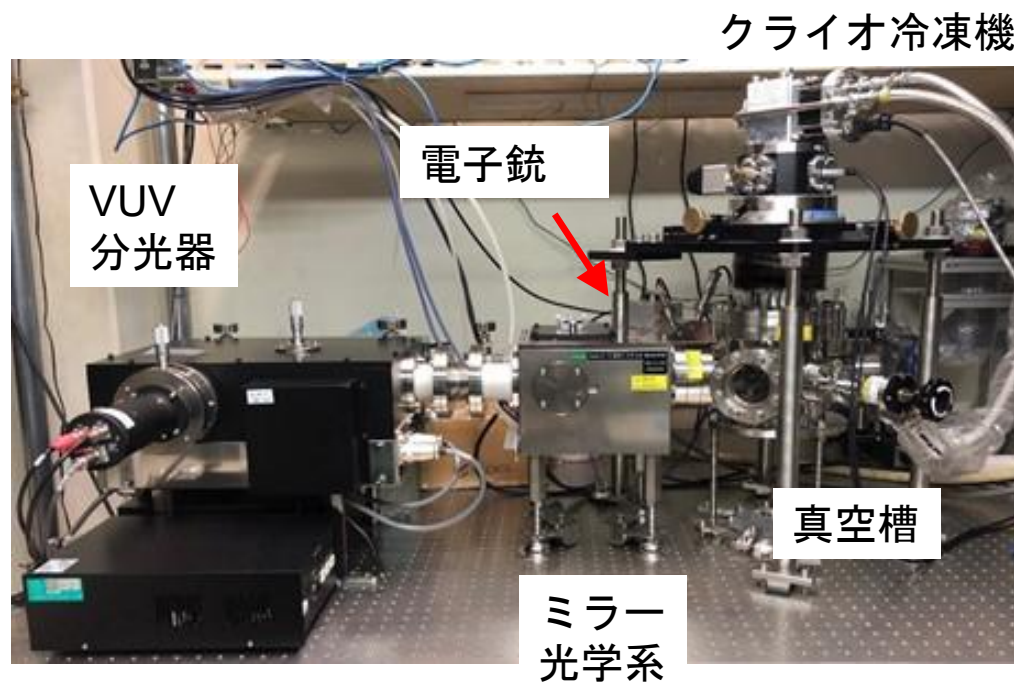
厚さ
380 nm

二乗平均平方根粗さ
0.28 nm

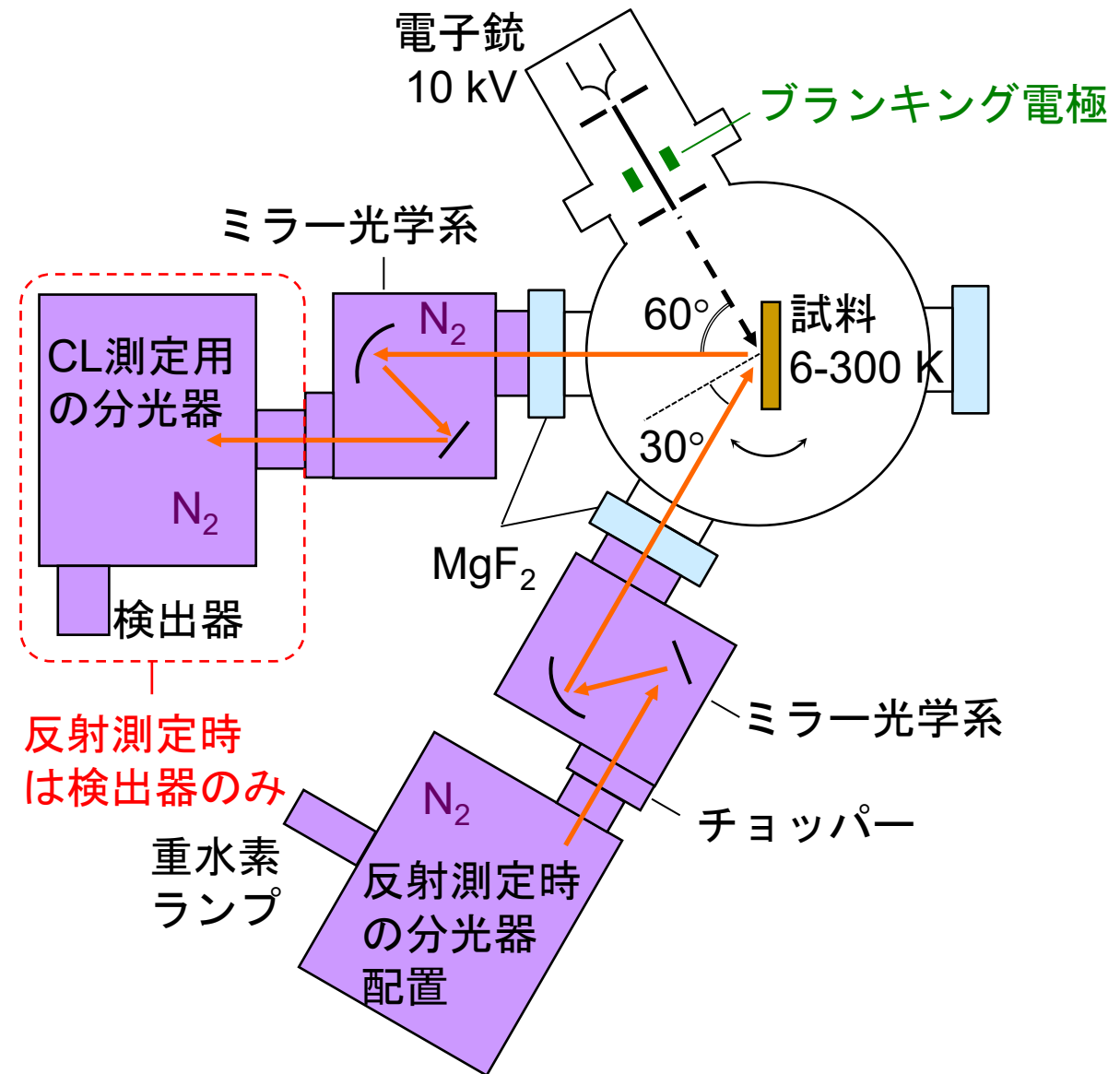
小川, 尾沼他, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 02SP30 (2024).

真空紫外分光システム

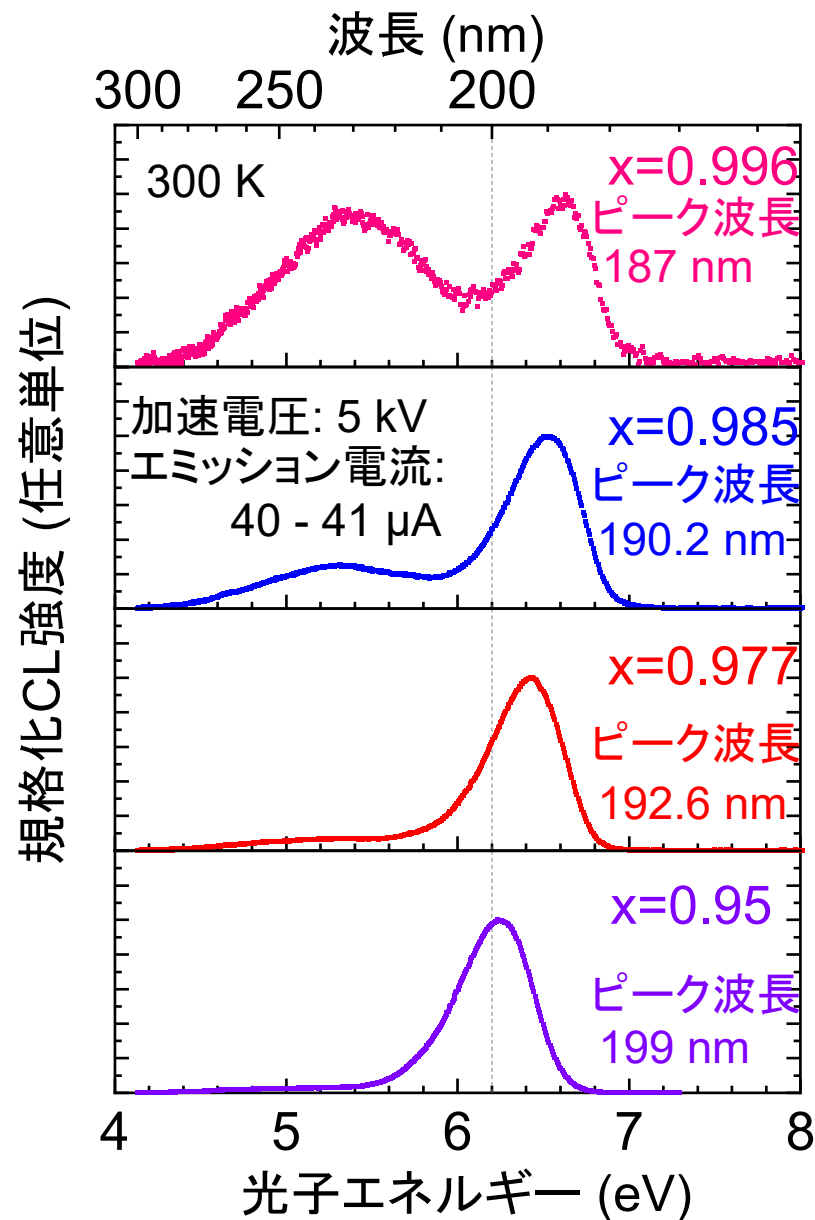
真空・深紫外域での光物性評価技術



尾沼他, Appl. Phys. Lett. **119**, 132105 (2021).



岩塩構造 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 薄膜の室温発光スペクトル



室温で187 nmの発光を実現

室温で185 nm帯の発光を実現

小川, 尾沼他, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 02SP30 (2024).

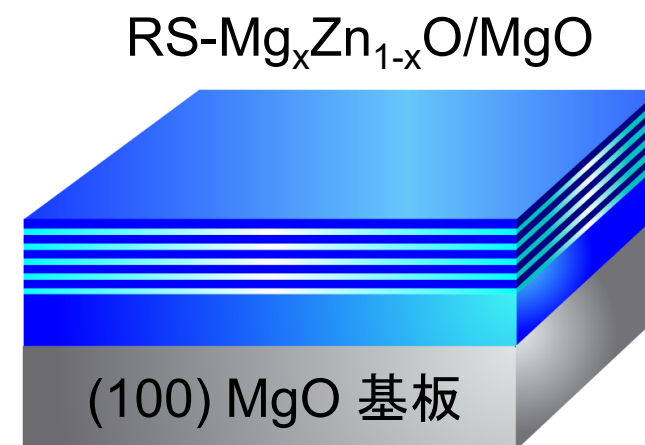
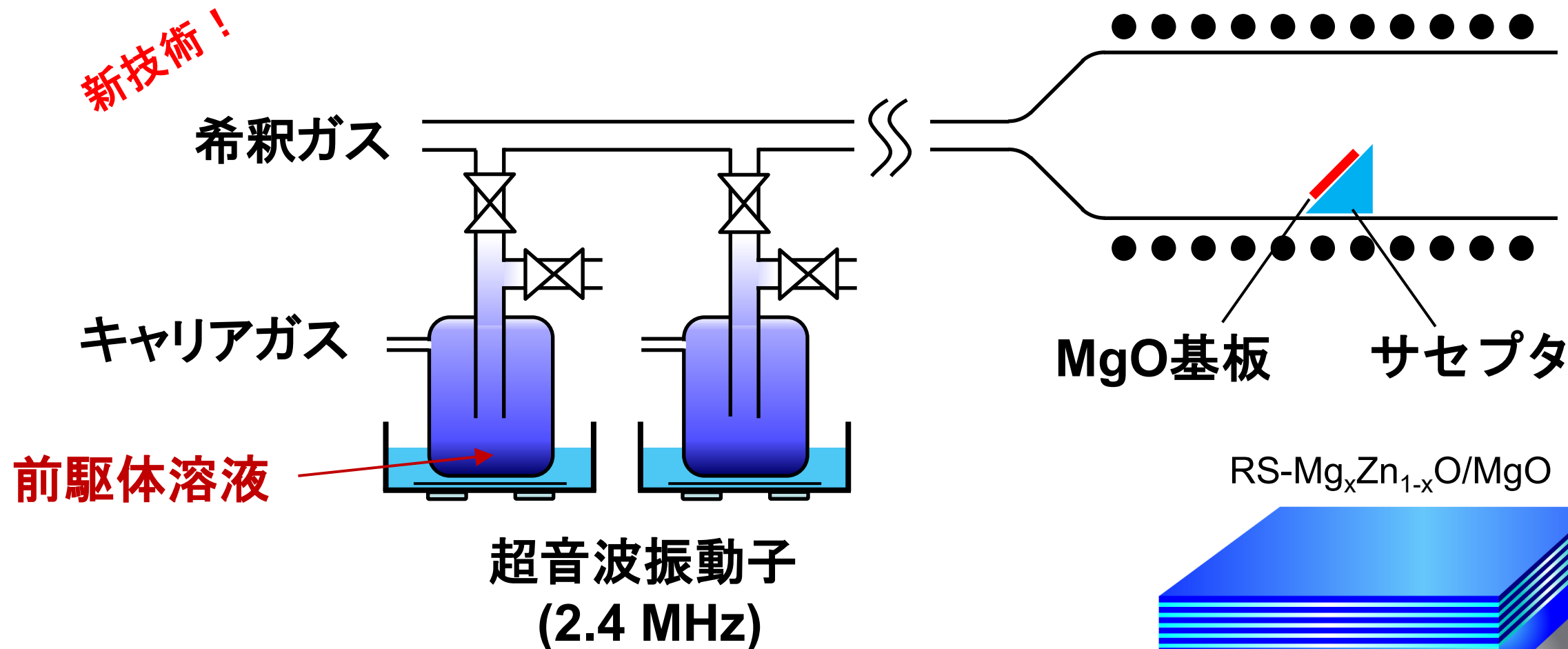
x: MgOモル分率, CL: カソードルミネセンス

RS-MgZnO/MgO多重量子井戸構造の成長

原料交互供給システムを備えるミストCVD成長技術

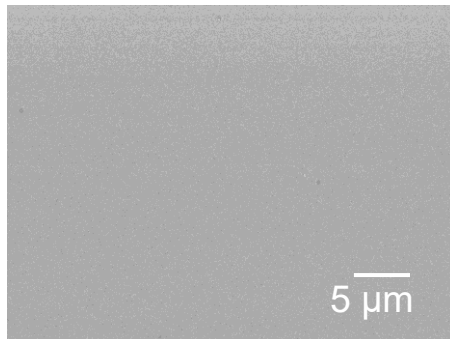
特願2025-119206

新技術！

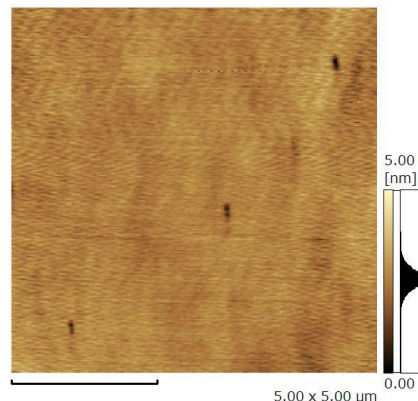


10周期RS-Mg_{0.85}Zn_{0.15}O/MgO多重量子井戸

■ 表面電子顕微鏡像

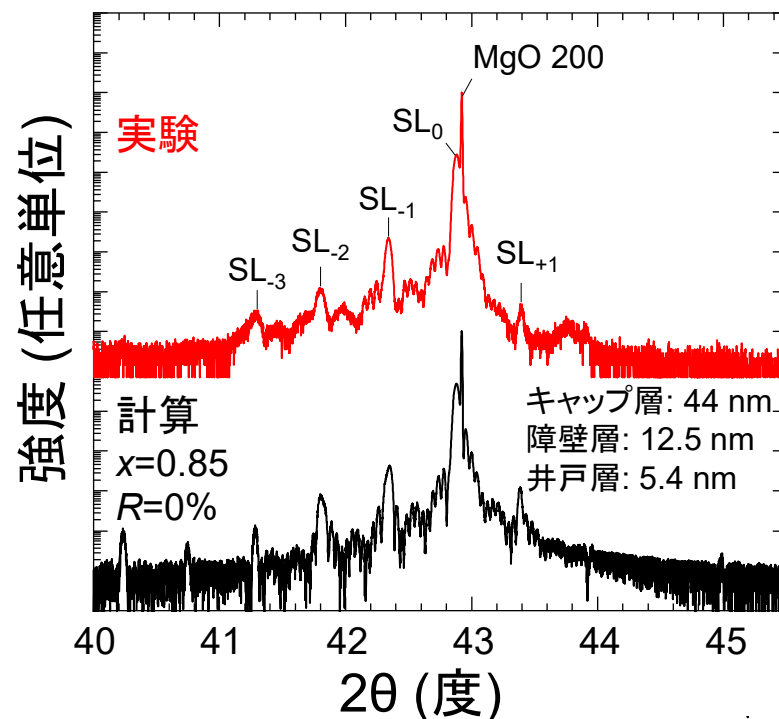


■ 表面原子間力顕微鏡像

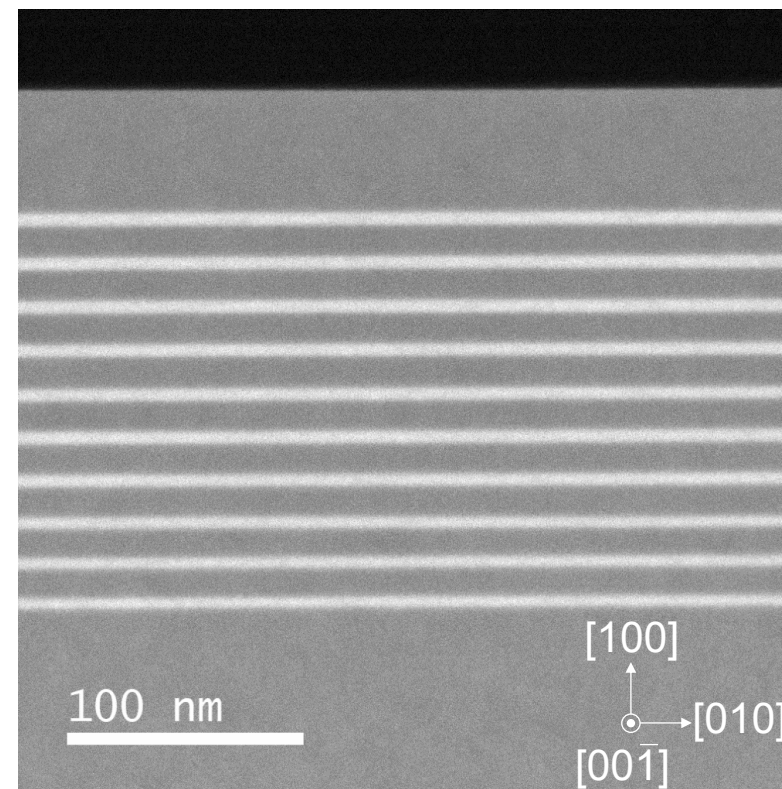


2.0 μm 二乗平均平方根粗さ
0.30 nm

■ X線回折 θ-2θパターン



■ 断面走査透過電子顕微鏡像

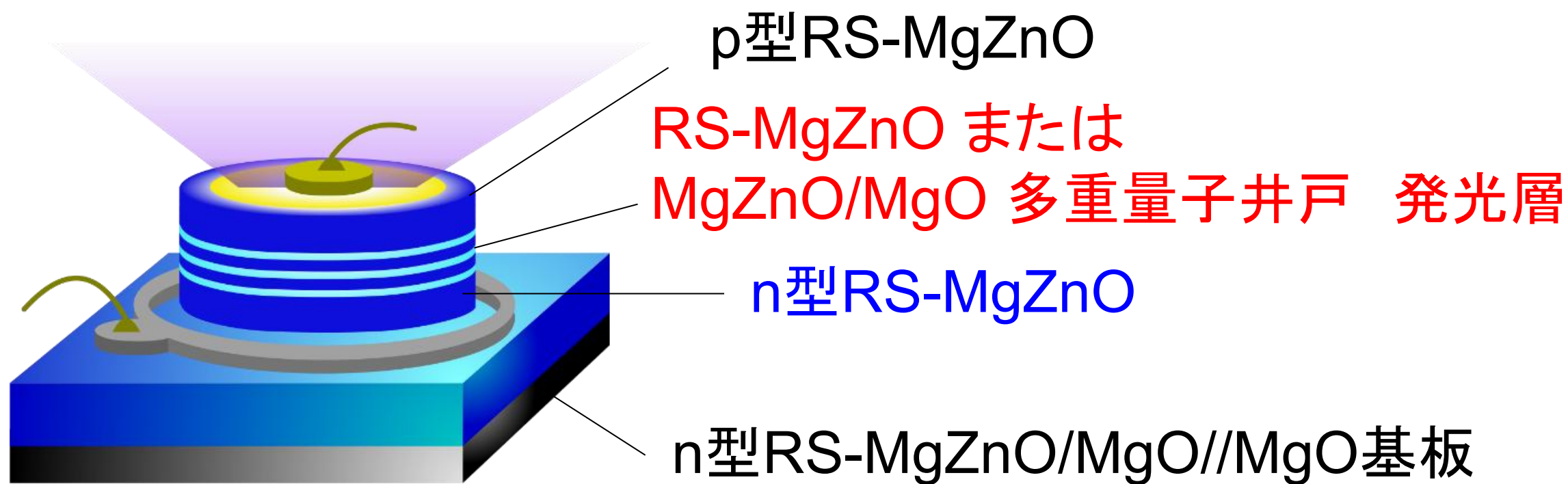


- ✓ 単層膜と同等の表面形態を観測
- ✓ X線回折 θ-2θ測定によってサテライトピークを観測
- ✓ 断面走査透過電子顕微鏡観察により、急峻な界面を有する積層構造を観測

小川, 愛智, 尾沼他, Jpn. J. Appl. Phys. **65**, 080904 (2026).

水銀フリーな半導体ベースの 真空紫外光源の構造の一例

発光ダイオードの模式図



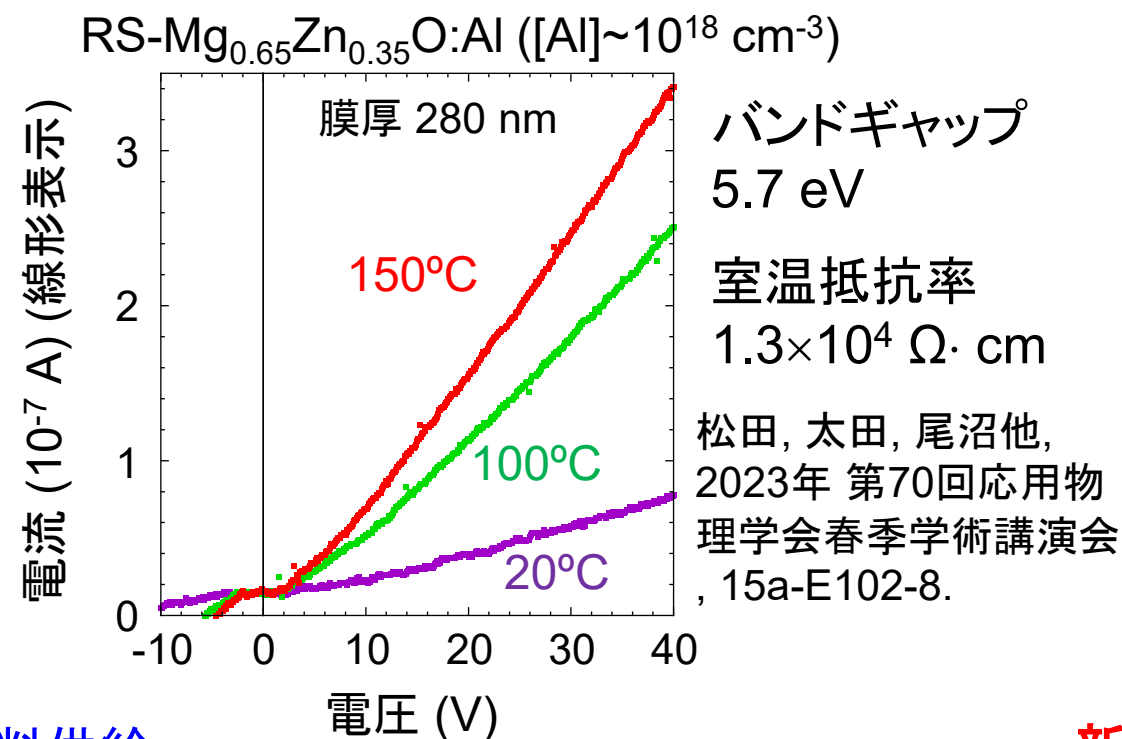
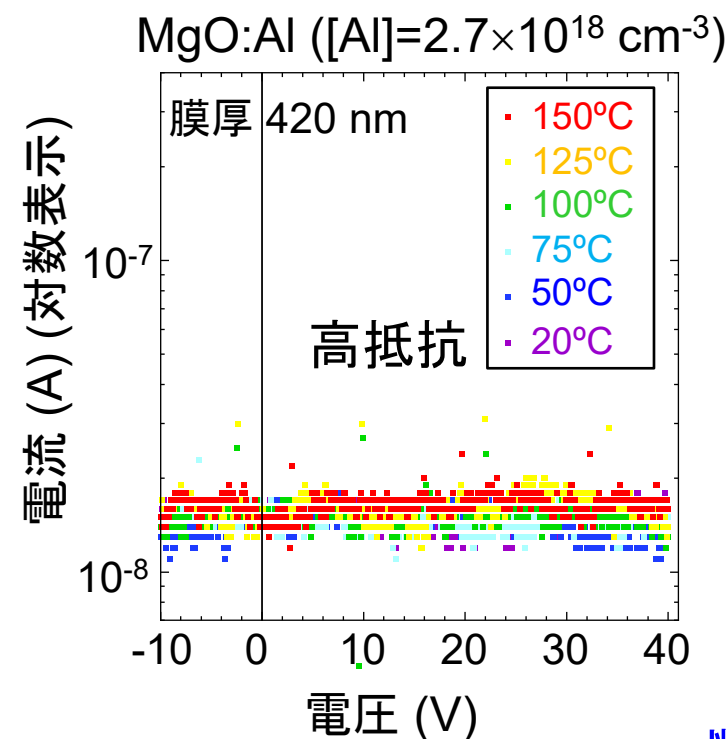
超ワイドギャップ半導体のn型伝導に関する報告

材料	バンドギャップ (eV)	室温抵抗率 ($\Omega\cdot\text{cm}$)	室温電子密度 (cm^{-3})	文献
無添加 RS-MgO (電気溶融法)	7.7	$>>10^8$	--	--
RS-ZnO	2.45 (Dir. 4.5)	--	--	--
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Si}$ or Sn (プラズマ援用MBE)	8.6	1.66×10^2	3.0×10^{14} $\sim 1.4\times 10^{16}$ [Si]= 8×10^{18}	奥村他, JJAP 61 , 125505 (2022).
$\alpha\text{-(AlGa)}_2\text{O}_3\text{:Si}$	6.22	1.2×10^3	$N_d^+-N_a^-$ $=2.1\times 10^{19}$ [Si] $\sim 9\times 10^{19}$	G. Dang <i>et al.</i> , AIP Adv. 10 , 115019 (2020).
AlN:Si (MOCVD)	6.0	2.0×10^1	7.3×10^{14} [Si]= 3.5×10^{17}	谷保他, Nature 441 , 325 (2006).
立方晶BN:Si (イオンビームアシスト MBE)	6.3	2.6×10^2	$\sim 10^{16}$ [Si]= 1.5×10^{19}	平間他, APL 116 , 162104 (2020).

目標

室温抵抗率: $10^2 \Omega\cdot\text{cm}$ 以下
電子密度: $10^{14}\text{-}10^{17} \text{ cm}^{-3}$

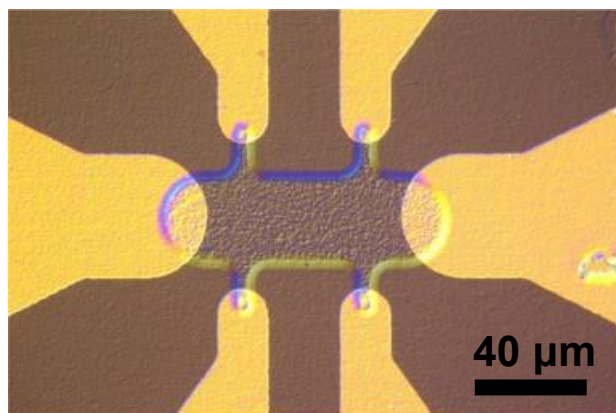
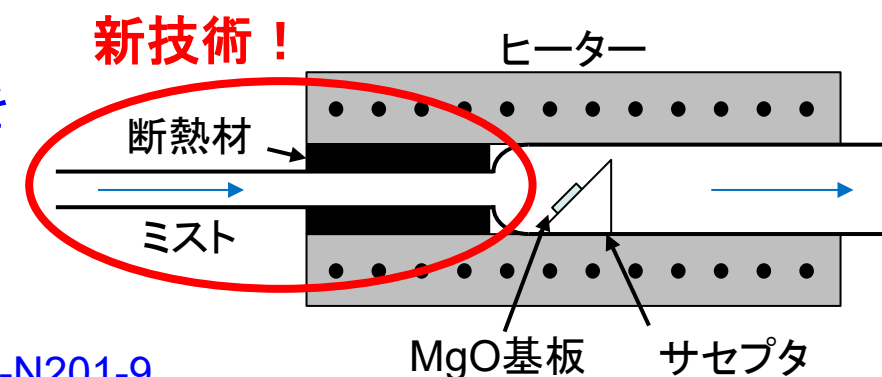
Al添加RS-MgZnO薄膜の成長



断熱原料供給

260°C帯で熱分解するAlアセチルアセトナト錯体を原料に用いたAlドーピングにおいて、成長温度675°Cで 10^{20} cm^{-3} オーダー(これまでの約40倍)の不純物ドーピングに成功

中島, 尾沼他, 2025年 第86回応用物理学会秋季学術講演会, 7a-N201-9.



ホールバー素子

目標

室温抵抗率: $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下
電子密度: $10^{14} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

特願2025-119207

新技術のまとめ

半導体ベースの真空紫外光源で 水銀フリーな社会に貢献

○これまでの主な成果

- ・室温で185 nm帯の発光を実現
- ・ミストCVD法によりRS-MgZnO/MgO多重量子井戸の製作に成功

√ 185 nm帯の発光を実現する新技術

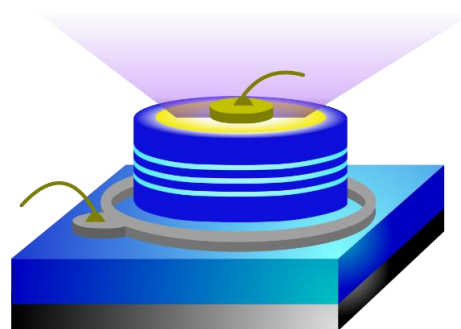
1. 原料交互供給システムを備えるミストCVD成長技術
(特願2025-119206)

2. 真空・深紫外域での光物性評価技術

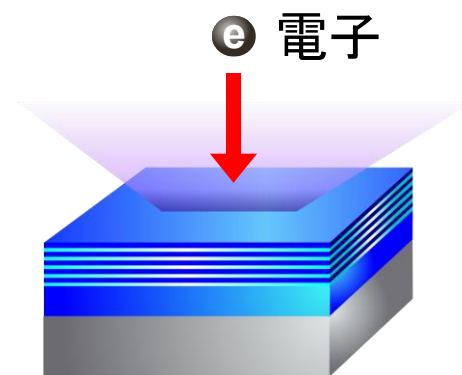
√ 不純物添加による導電性制御を実現する新技術

3. 断熱原料供給 (特願2025-119207)

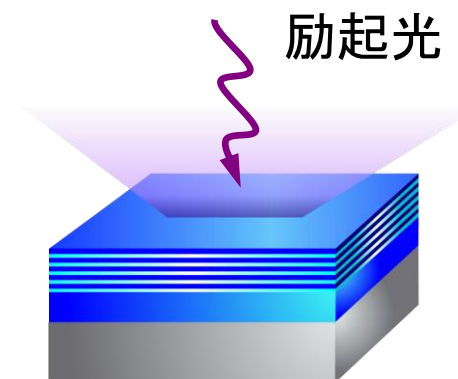
社会実装への道筋



電流注入 令和6年度キヤノン財団
研究助成による成果



電子線励起 A-STEP研究助成
による成果



光励起

- 2024-2026年度 令和6年度 キヤノン財団(研究代表者)
第15回研究助成プログラム「新産業を生む科学技術」

「170～200 nm 帯のUV-C 発光ダイオードの開発」

- 2025-2027年度 令和7年度 JST A-STEP (研究代表者)
産学共同 ステージ I (育成フェーズ)

「水銀撤廃のための真空紫外面発光素子の開発」



ステージ II (本格フェーズ) への展開を検討中

企業への期待

- 真空紫外光源開発のため、デバイス実装、真空封止、励起用光源、電源開発などの技術をもっている企業との共同研究を希望します。
- 開発する光源の応用展開を希望する企業との共同研究を希望します。
- JST A-STEPステージⅡ（本格フェーズ）に参画してくださる企業を探しています。

企業への貢献、PRポイント

- 185 nm帯で発光する材料は、岩塩構造MgZnOの他にありません。当研究室は、ミストCVD法による成膜から発光観測、デバイス製作まで一貫して行うことができる、世界で唯一無二の技術をもちます。
- これらの技術を実装することで、企業には他に類をみない真空紫外光源開発を行うことができるメリットがあります。
- 連携をご希望の場合は、必要な手続きを経たのち、試料を提供することができます。
- 本格導入にあたっての技術指導など行うことができます。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 原料供給装置、成膜装置、原料供給方法
および成膜方法
- 出願番号 : 特願2025-119206
- 出願人 : 学校法人工学院大学
- 発明者 : 尾沼 猛儀、山口 智広、小川 広太郎
愛智 宏行

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 原料供給装置、成膜装置、原料供給方法
および成膜方法
- 出願番号 : 特願2025-119207
- 出願人 : 学校法人工学院大学
- 発明者 : 尾沼 猛儀、山口 智広、小川 広太郎
杉谷 諒、田中 恭輔、中島 三四郎

産学連携の経歴

- 2020年-2022年 O社と共同研究実施
- 2024年- 令和6年度 キヤノン財団（研究代表者）
第15回研究助成プログラム「新産業を生む科学技術」
- 2024年- N社と共同研究実施
- 2025年- 令和7年度 JST A-STEP（研究代表者）
産学共同 ステージ I（育成フェーズ）

お問い合わせ先

工学院大学
研究推進部 研究企画課

T E L : 03－3340－3440

e-mail : sangaku@sc.kogakuin.ac.jp