

# ScN との合金化がもたらす窒化物の圧電・強誘電特性への効果と最近の研究動向

Effect on Piezoelectric and Ferroelectric Properties of Nitrides Arising from ScN Alloying: Recent Trends  
**Key-words** : Nitride, Scandium, Piezoelectricity, Ferroelectricity, Thin film

上原 雅人・舟窪 浩

Masato UEHARA<sup>\*1</sup> and Hiroshi FUNAKUBO<sup>\*2</sup>  
 (\*<sup>1</sup>AIST, \*<sup>2</sup>Science Tokyo)

## 1. はじめに

ワイドバンドギャップ半導体であるウルツ鉱型結晶の窒化アルミニウム (AlN) や窒化ガリウム (GaN) は、*c* 軸方向の自発分極に起因する圧電性を示す。これらに窒化スカンジウム (ScN) を固溶させた (Al, Sc)N や (Ga, Sc)N において、圧電性が大きく増大すること<sup>1)~3)</sup>、強誘電性を示すことが報告されている<sup>4)~6)</sup>。ScN との合金化によって結晶格子の柔軟性が増し、新機能が引き出される点は非常に興味深い。本稿では、ScN との合金化によって生じる特性変化やユニークな格子定数変化を概説し、高周波フィルタ、強誘電体メモリ、高速トランジスタ、電気光学デバイスといった最近の研究開発の展開を紹介する。

## 2. AlN や GaN における ScN との合金化の効果

AlN の圧電ひずみ定数  $d_{33}$  は、ScN との合金化により図1のように増大する<sup>1), 2), 7)</sup>。すなわち、ScN 濃度を調整することで  $d_{33}$  を制御できる。但し、高濃度域では無極性の NaCl 型 (岩塩) 相の析出により低下することに留意する必要がある。図1の2009年の秋山らの論文では約 43 at.% 付近で  $d_{33}$  は急減しており、この組成付近に相境界が存在するように見える。しかし、平衡状態図 (図2) には AlN-ScN 間の明瞭な相境界はない<sup>7), 8)</sup>。この系では混合エンタルピー曲線が上に凸 (不混和) であり、熱力学的な平衡状態では相分離することが予測される。すなわち、(Al, Sc)N 固

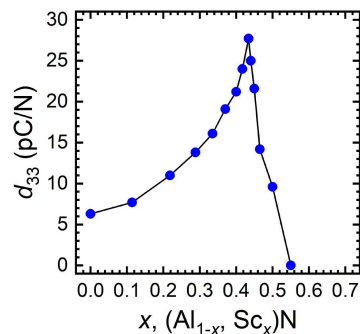


図1 (Al, Sc)N の圧電ひずみ定数  $d_{33}$  の ScN 濃度依存性<sup>2)</sup>. Akiyama et al., *Appl. Phys. Lett.*, 95, 162107 (2009) からの転載 (AIP Publishing の許可による)

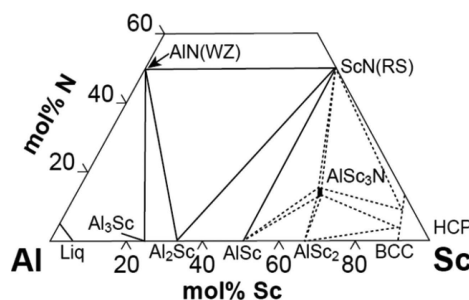


図2 Al-Sc-N の平衡状態図 (1227 K)<sup>8)</sup>. Schuster and Bauer, *J. Less Common Metals*, 109, 345 (1985) からの転載 (Elsevier の許可による)

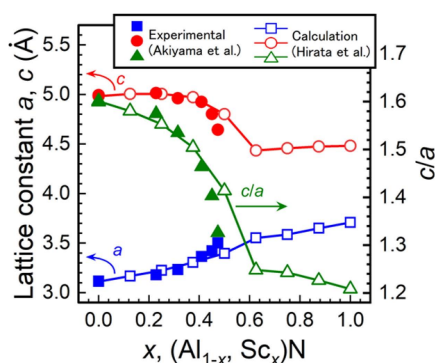


図3 (Al, Sc)N の格子定数の ScN 濃度依存性<sup>7)</sup>. Hirata et al., *J. Eur. Ceram. Soc.*, 40, 5410 (2020) からの転載 (Elsevier の許可による)

溶体は、薄膜作製のような非平衡プロセスによって実現される材料と言える。我々はプロセス次第では ScN の更なる高濃度化が可能と考え、最近、(Al, Sc)N と (Ga, Sc)N の両方の系で ScN 濃度が 50 at.% を超える薄膜の作製にスパッタリング法で成功し、圧電性や強誘電性の向上を確認している<sup>9), 10)</sup>。

これらの格子定数は、ScN 濃度に対して特徴的な変化を示す<sup>1), 3), 7), 9)~11)</sup>。図3に示した (Al, Sc)N では、*a* 軸は単調に増加する一方、*c* 軸は 20 at.% 付近までわずかに増加し、それ以上では大きく減少に転じ、

$c/a$  比は顕著に低下する。(Ga, Sc)N も同様である<sup>3), 9), 11)</sup>。ScN の安定相は岩塩型だが、準安定相として  $h$ -BN 型が示されている<sup>12)</sup>。 $h$ -BN 型はウルツ鉱型の四面体配位を  $c$  軸方向に“扁平化”し平面内へ開いた配置と見なせる構造である(図4)。(Al, Sc)N や (Ga, Sc)N では ScN 濃度の増加に伴いウルツ鉱型と  $h$ -BN 型の構造競合が強まり、この競合が  $c$  軸方向の自由エネルギー曲面を平坦化(格子ソフト化)させると理解されている<sup>13), 14)</sup>。その結果として  $c$  軸が縮みやすくなり、 $c/a$  比の低下が現れる。実際に図5に示すように、 $d_{33}$  と  $c/a$  比の間には明瞭な逆相関がある<sup>9)</sup>。また、我々は X 線吸収分光法による (Ga, Sc)N の構造解析において、ScN 濃度の増加とともに、実際に Sc の配位構造がウルツ鉱型から  $h$ -BN 型へ近づくことを明らかにした<sup>15)</sup>。一方、Ga 近傍はウルツ鉱型配位を相対的に保持する傾向が見られ、Sc の方が構造競合に敏感という構造的コントラストも確認した。これらの結果は、構造競合と格子ソフト化、そして、それらが ScN 添加によってもたらされる現象であることの傍証と考えている。詳しくは、別の解説もご参照いただきたい<sup>16)</sup>。第一原理計算などによる理論的考察、熱力学的描像、実験結果を整理し、これらが相互に整合することを示している。

強誘電性については、2021年7月号の舟窪らの記事も参照していただきたい<sup>17)</sup>。これらの分極-電界

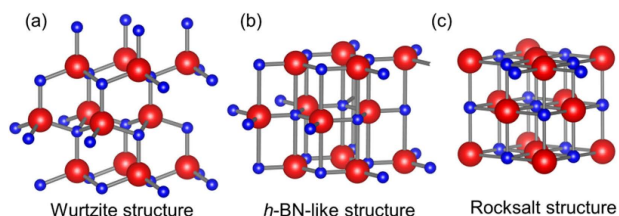


図4 (Al, Sc)N および (Ga, Sc)N の結晶構造モデル

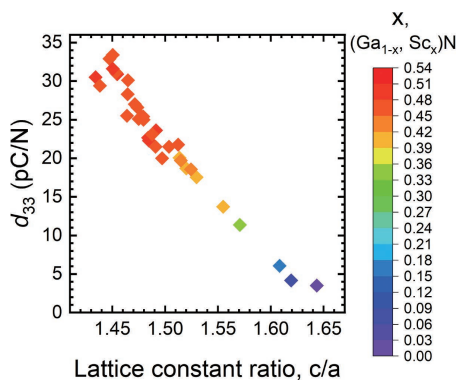


図5 (Ga, Sc)N の圧電定数と格子定数比  $c/a$  の関係<sup>9)</sup>。Uehara et al., *APL Mater.*, 12, 121102 (2024) からの転載 (Creative Commons Attribution (CC BY) ライセンスに基づく)

( $P$ - $E$ ) ループは角形を示す(図6)。明瞭なスイッチング閾値と大きな残留分極を保つので、二値・多値動作や低誤読出しに有利な特性である。また、(Al, Sc)N では膜厚 5 nm 程度でも明瞭な強誘電性が確認されており<sup>18), 19)</sup>、デバイス利用への期待も高い。さらに最近、1000 °C でも強誘電性が維持されるとの報告もある<sup>20)</sup>。デバイス応用の主要課題の一つは、消費電力に直結する大きすぎる抗電界 ( $E_c$ ) である。分極反転障壁を下げるには、前述した ScN 合金化による構造競合がポイントになる。すなわち、ScN の高濃度化あるいは格子定数比  $c/a$  の低減である。図7に示すように、我々は (Ga, Sc)N において、50 at.% 程度までの ScN 高濃度化により、1.5 MV/cm 程度にまでの  $E_c$  の低減に成功している<sup>9)</sup>。この値はメモリ応用で先行する HfO<sub>2</sub> 系に匹敵しており(図8)、材料本来の特性として消費電力課題に解決の目途が立ったことを意味する。

もう一つ、バンドギャップ ( $E_g$ , AlN: 6.2 eV 程度, GaN: 3.4 eV 程度) への影響にも触れておきたい。一般に ScN (岩塩型) の  $E_g$  は 2 eV 程度と狭いが、ウ

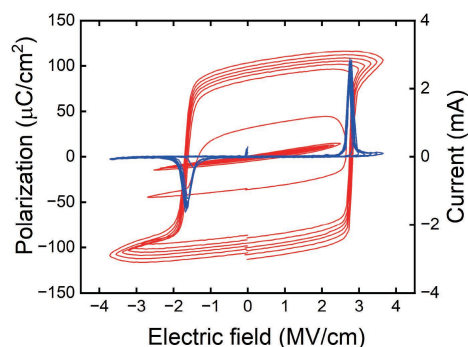


図6 (Ga, Sc)N の分極-電界 ( $P$ - $E$ , 赤) および電流-電界 ( $I$ - $E$ , 赤) 曲線 (ScN: 50 at.%)<sup>9)</sup>。Uehara et al., *APL Mater.*, 12, 121102 (2024) からの転載 (Creative Commons Attribution (CC BY) ライセンスに基づく)

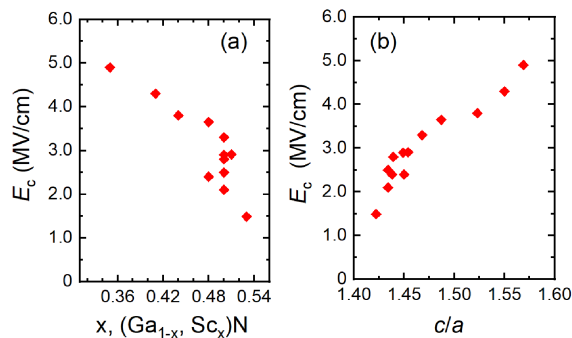


図7 (Ga, Sc)N の抗電界の ScN および  $c/a$  比依存性<sup>9)</sup>。Uehara et al., *APL Mater.*, 12, 121102 (2024) からの転載 (Creative Commons Attribution (CC BY) ライセンスに基づく)

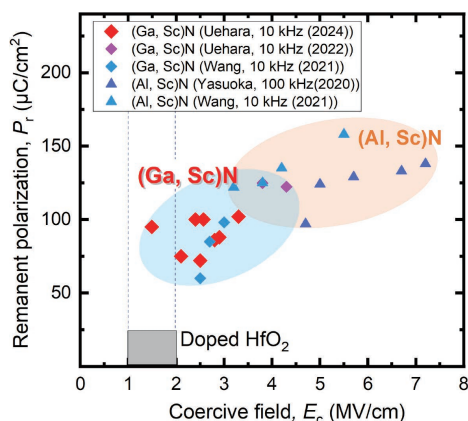


図8 (Al, Sc)N と (Ga, Sc)N の残留分極と抗電界の関係<sup>9)</sup>. Uehara et al., *APL Mater.*, 12, 121102 (2024) からの転載 (Creative Commons Attribution (CC BY) ライセンスに基づく)

ルツ鋳型の固溶系, 特に (Ga, Sc)N では Sc の  $d$  軌道が伝導帯底 (CBM) に寄与しにくいため, むしろ  $E_g$  が広がると Zhang らは示している<sup>21)</sup>. 特に ScN $\approx$ 50 at.% 付近では, (Ga, Sc)N の方が (Al, Sc)N より広い  $E_g$  を示すと述べられており,  $E_g$  - 絶縁破壊電界 ( $E_{bd}$ ) の経験的相関を踏まえると<sup>22)</sup>, 誘電体設計上として重要な知見である. 前述の (Al, Sc)N や (Ga, Sc)N の  $E_c$  低減を目的とした高 ScN 化には  $E_{bd}$  の低下を懸念する向きがある<sup>23)</sup>. しかし, 先の (Ga, Sc)N の高 ScN 化では  $E_{bd}$  低下は観測されず<sup>9)</sup>, Zhang らの主張を支持する結果であった. すなわち, ScN は GaN のバンド/格子のチューニング相手としても興味深くなる. GaN にとって AlN と ScN の合金化はいずれも  $E_g$  を広げる効果があるが, AlN は  $a$  軸を縮めるのに対し, ScN は  $a$  軸を広げるので, バンド設計と格子整合のトレードオフに新たな自由度を与えることになる.

### 3. 応用展開

(Al, Sc)N や (Ga, Sc)N は, 上記に示したような魅力的な特性に加え, 半導体プロセスとの適合性などもあり, 現在, さまざまな分野での研究が進められている. 高周波フィルタをはじめとする圧電 MEMS はもちろん, 強誘電性を利用する不揮発性メモリの他, 高速トランジスタや電気光学デバイスなどは明確に応用を見据えた研究が行われている印象がある.

#### ・圧電 MEMS

(Al, Sc)N は $\sim$ 7 GHz の BAW (バルク音響波) 型フィルタとしてすでに社会実装されているが, 今後の通信網の発展 (通信速度, 大容量化, 多接続化や低遅延化

など) には, 広帯域化と高周波化が求められている. 前者には Figure of Merit (FOM, 電気機械結合係数 $\times$ 品質係数) が直接寄与するので, その改善が求められている. 高周波化も活発で, 近年では 21.4 GHz での性能評価も報告されている<sup>24)</sup>. BAW 型の高周波化には圧電層の薄化が必要だが<sup>25)</sup>, 部材としての限界がある. その対策として正負の分極を積層した構造, HBAR (High-Overtone Bulk Acoustic Wave Resonator) の開発が進められており, 強誘電現象をプロセスとして活用する例も報告されている<sup>26)</sup>. しかし, これに対しても FOM の改善が求められており, 材料やその内部組織制御などのプロセスの開発が鍵である.

一方, 高周波フィルタ以外の圧電 MEMS については, ScN の高濃度化によって圧電性能を高めることで, 高周波フィルタに限らず, マイクや PMUT (Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer), アクチュエータ, エネルギーハーベスタなどに適用領域を広げる潮流がある. また, ScN の高濃度化はスパッタリングだけでなく<sup>27)</sup>, PLD 量産機による作製報告もあり<sup>28)</sup>, プロセスを含め圧電 MEMS 分野も活性化している.

#### ・不揮発性メモリ

最近, Jariwala らはスパッタリング法で作製した (Al, Sc)N の強誘電ダイオード (Ferroelectric Diode Memory, FeDiM) で 100 Mbit/mm<sup>2</sup> 以上の実装密度を示している. いよいよ高密度デバイスへの期待が高まる. 40 nm レベルの微細化でも, 60 より大きな on・off 比と多値動作を示し, 85 °C の高温下で数時間以上状態を保持することが報告されている<sup>29)</sup>. また, 舟窪らは Forming gas 相当の H<sub>2</sub> を含む雰囲気下での高温後処理 ( $\sim$ 600 °C) においても特性の劣化が小さいことを示しており, 微細化プロセスの点でも優位性がある<sup>30)</sup>. 前述したが, 1000 °C でも強誘電性を示すことから<sup>20)</sup>, 航空宇宙, 原子炉, 地熱発電, 深井戸掘削など, 従来材料では対応困難な過酷環境下での利用も期待できる. 今後は一層の低消費電力化のため, 極薄膜技術や  $E_c$  の低減, 電極を含めたデバイス構造の開発が鍵となる. 数 nm の膜厚で大きな残留分極が実現できれば, 強誘電体によるトンネルジャンクション (Ferroelectric Tunnel Junction, FTJ) による低消費電力メモリも期待できる<sup>17)</sup>.

#### ・高速トランジスタ

GaN 基の高速トランジスタ (GaN-HEMT) は, GaN の上にバリア層 (従来は AlGaN) を載せ, 分極

の不連続で界面に二次元電子ガス (2DEG) をつくって高周波で大電流を得るデバイス構造である。近年, AlGa<sub>N</sub> ではなく (Al, Sc)N をバリア層に用いる研究が進んでいる。Ga<sub>N</sub> との分極差が大きいため 2DEG を高密度化しやすく, チャネルの実効伝導を高められる点が注目されている。実際に (Al, Sc)N/AlN/GaN 構成でオン電流 4 A/mm,  $f_{MAX}$  (電力利得が 1 になる周波数) 134 GHz 級というデータが報告され<sup>31)</sup>, 材料置換の効果が確認されている。また, バリア/チャネルを多層化して総シート密度を底上げする設計も実証例もある<sup>32)</sup>。

#### ・電気光学デバイス

材料の電気光学効果を利用したデバイスで, 外部電界により材料の屈折率を直接変化させ, 光の位相や強度を制御するものである。LiNbO<sub>3</sub>(LN) や BaTiO<sub>3</sub>(BTO) の利用が先行している。LN は LN-on-insulator による薄膜化・高 Q 導波路化が進み, プロセスと設計の枠組みが成熟しているとのことである<sup>33)</sup>。BTO は大きな Pockels 係数を活かし, Si/SiN との異種集積により低駆動・高速動作の実装例がある<sup>34)</sup>。一方, (Al, Sc)N もその優れた圧電性や強誘電性から注目されている<sup>35)</sup>。(Al, Sc)N や (Ga, Sc)N には, ScN 濃度で特性調整ができることやスパッタリング成膜が成熟していること, 半導体プロセスとの適合性など優位性がある。今後のデバイスでの実証に期待したい。

## 4. 終わりに

(Al, Sc)N や (Ga, Sc)N についての構造と特性の関係や現在の応用展開について概説した。これらは, 組成に応じて構造および物性が大きく変化する点に特徴がある。2019 年に強誘電性が報告されて以降, 世界の多様な分野で急速に注目を集めてきた。しかし, 日本国内での関心はまだ高まり始めた段階である。国内には窒化物半導体や誘電体の優れた技術を有する企業や大学等が多数存在する。産学官が一体となり, 各分野が密接に連携することで国際競争力のある新たな産業を創出できないかと期待している。筆者らもその実現に向けて一助となるべく尽力したい。

謝辞 執筆にあたり, 原著論文で記載した共同研究者の皆様から有益なご意見等を頂きましたことに感謝いたします。本稿の一部は, 日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金 (課題番号: 21H01617, 22H01784, 24K01592), および科学技術振興機構 (JST) 「研究成果最速展開支援プログラム (A-STEP)」(課題番号: JPMJTR24T) の支援を受けて実施されました。また, 著者の一人 (H.F.) は, 以下の支援を受けたことをここに記します: 文部科学省「次世代革新的集積回路拠点形成事業 (XNICS)」(課題番号: JPJ011438), 文部科学省「データ創出・活用型材料

研究開発プロジェクト」(課題番号: JPMXP1122683430), および JST 「ASPIRE」プログラム (課題番号: JPMJAP2312)。

## 文 献

- 1) M. Akiyama, T. Kamohara, K. Kano, A. Teshigahara, Y. Takeuchi and N. Kawahara, *Adv. Mater.*, **21**, 593 (2009).
- 2) M. Akiyama, K. Kano and A. Teshigahara, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 162107 (2009).
- 3) M. Uehara, T. Mizuno, Y. Aida, H. Yamada, K. Umeda and M. Akiyama, *Appl. Phys. Lett.*, **114**, 012902 (2019).
- 4) S. Fichtner, N. Wolff, F. Lofink, L. Kienle and B. Wagner, *J. Appl. Phys.*, **125**, 114103 (2019).
- 5) S. Yasuoka, T. Shimizu, A. Tateyama, M. Uehara, H. Yamada, M. Akiyama, Y. Hiranaga, Y. Cho and H. Funakubo, *J. Appl. Phys.*, **128**, 114103 (2020).
- 6) M. Uehara, R. Mizutani, S. Yasuoka, T. Shiraishi, T. Shimizu, H. Yamada, M. Akiyama and H. Funakubo, *Appl. Phys. Lett.*, **119**, 172901 (2021).
- 7) K. Hirata, K. Shobu, H. Yamada, M. Uehara, S. A. Anggraini and M. Akiyama, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **40**, 5410 (2020).
- 8) J. C. Schuster and J. Bauer, *J. Less Common Metals*, **109**, 345 (1985).
- 9) M. Uehara, K. Hirata, Y. Nakamura, S. A. Anggraini, K. Okamoto, H. Yamada, H. Funakubo and M. Akiyama, *APL Mater.*, **12**, 121102 (2024).
- 10) K. Hirata, K. Niitsu, S. A. Anggraini, T. Kageura, M. Uehara, H. Yamada and M. Akiyama, *Materials Today*, **83**, 85 (2025).
- 11) K. Hirata, Y. Ikemoto, M. Uehara, H. Yamada, S. A. Anggraini and M. Akiyama, *J. Appl. Phys.*, **135**, 164101 (2024).
- 12) N. Farrer and L. Bellaiche, *Phys. Rev. B*, **66**, 201203 (2002).
- 13) F. Tasnadi, B. Alling, C. Hoglund, G. Wingqvist, J. Birch, L. Hultman and I. A. Abrikosov, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 137601 (2010).
- 14) C. Tholander, I. A. Abrikosov, L. Hultman and F. Tasnadi, *Phys. Rev. B*, **87**, 094107 (2013).
- 15) 池本 勇, 平田研二, 瀬戸山寛之, 大曲新矢, S. A. Anggraini, 山田浩志, 秋山守人, 上原雅人, 日本セラミックス協会 2024 年年会予稿, 1D20 (2024).
- 16) 上原雅人, 舟窪 浩, 日本結晶成長学会誌, **52**, 52 (2025).
- 17) H. Funakubo, S. Yasuoka, R. Mizutani and T. Shimizu, *Ceramics Japan*, **56**, 443 (2021).
- 18) D. Wang, P. Wang, S. Mondal, M. Hu, D. Wang, Y. Wu, T. Ma and Z. Mi, *Appl. Phys. Lett.*, **122**, 052101 (2023).
- 19) K. H. Kim, Z. Han, Y. Zhang, P. Musavigharavi, J. Zheng, D. K. Pradhan, E. A. Stach, R. H. Olsson, 3rd and D. Jariwala, *ACS Nano*, **18**, 15925 (2024).
- 20) V. Gaddam, S. S. Dabas, J. Gao, D. J. Spry, G. Baucom, N. G. Rudawski, T. Yin, E. Angerhofer, P. G. Neudeck, H. Kim, P. X. L. Feng, M. Sheplak and R. Tabrizian, *Advanced Electronic Materials*, **11**, (2025).
- 21) S. Zhang, D. Holec, W. Y. Fu, C. J. Humphreys and M. A. Moram, *J. Appl. Phys.*, **114**, 133510 (2013).
- 22) O. Slobodyan, J. Flicker, J. Dickerson, J. Shoemaker, A. Binder, T. Smith, S. Goodnick, R. Kaplar and M. Hollis, *J. Mater. Res.*, **37**, 849 (2022).
- 23) S. Fichtner, M. Uehara, I. Streicher, S. Yang, J.-P. Maria, Z. Mi, S. Leone and H. Funakubo, *MRS Bulletin*, **50**, 1079 (2025).
- 24) S. Cho, O. Barrera, P. Simeoni, E. N. Marshall, J. Kramer, K. Motoki, T.-H. Hsu, V. Chulukhadze, M. Rinaldi, W. A. Doolittle and R. Lu, *J. MEMS*, **32**, 529 (2023).
- 25) M. Ueda, M. Hara, S. Taniguchi, T. Yokoyama, T. Nishihara, K.-y. Hashimoto and Y. Satoh, *Japanese Journal of Applied Physics*, **47**, 4007 (2008).
- 26) S. Nam, W. Peng, P. Wang, D. Wang, Z. Mi and A.

- Mortazawi, *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, **33**, 803 (2023).
- 27) S. Fichtner, T.-N. Kreutzer, S. Gu-Stoppel, F. Stoppel and F. Lofink, *Abst. 11th Piezoelectric MEMS*, 4 (2025).
- 28) M. D. Nguyen, M. Dekkers, G. Koster and G. Rijnder, *Abst. 11th Piezoelectric MEMS*, 4 (2025).
- 29) Z. Hu, H. Cho, R. K. Rai, K. Bao, Y. Zhang, Z. Qu, Y. He, Y. Ji, C. Leblanc, K. H. Kim, Z. Han, Z. Qiu, X. Du, E. A. Stach, R. Olsson and D. Jariwala, *Nano Lett*, **25**, 13748 (2025).
- 30) N. Sun, K. Okamoto, S. Yasuoka, S. Doko, N. Matsui, T. Irisawa, K. Tsunekawa, T. Katase, T. Koganezawa, T. Nakatani, R. Kumara, O. Sakata and H. Funakubo, *Appl. Phys. Lett.*, **125**, 032904 (2024).
- 31) K. Nomoto, J. Casamento, T.-S. Nguyen, L. Li, H. Lee, C. Savant, A. L. Hickman, T. Maeda, J. Encomendero, V. Gund, T. Vasen, S. Afroz, D. Hannan, J. C. M. Hwang, D. Jena and H. G. Xing, *Applied Physics Express*, **18**, (2025).
- 32) T.-S. Nguyen, N. Pieczulewski, C. Savant, J. J. P. Cooper, J. Casamento, R. S. Goldman, D. A. Muller, H. G. Xing and D. Jena, *APL Materials*, **12**, (2024).
- 33) Y. Jia, L. Wang and F. Chen, *Applied Physics Reviews*, **8**, (2021).
- 34) M. Kohli, D. Chelladurai, L. Kulmer, T. Blatter, Y. Horst, K. Keller, M. Doderer, J. Winiger, D. Moor, A. Messner, T. Buriakova, C. Convertino, F. Eltes, Y. Fedoryshyn, U.

- Koch and J. Leuthold, *Light Sci Appl*, **14**, 399 (2025).
- 35) G. Yang, H. Wang, S. Mu, H. Xie, T. Wang, C. He, M. Shen, M. Liu, C. G. Van de Walle and H. X. Tang, *Nat Commun*, **15**, 9538 (2024).

---

#### 筆者紹介

上原 雅人 (うえはら まさと)



1998年九州大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。博士(工学)。2025年より産業技術総合研究所上級主任研究員。2024年より九州大学客員教授。

[連絡先] 〒841-0052 佐賀県鳥栖市宿町 807-1  
産業技術総合研究所センシング技術研究部門

E-mail: m.uehara@aist.go.jp

舟窪 浩 (ふなくぼ ひろし)



1988年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。博士(工学)。2025年より東京科学大物質理工学院教授。

[連絡先] 〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-J2-43 東京科学大学 物質理工学院 材料系

E-mail: funakubo.h.31df@m.isct.ac.jp