

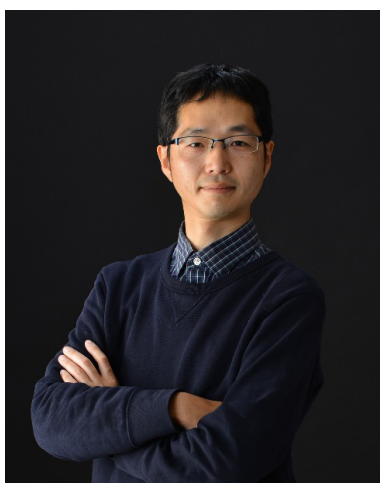
文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ 令和6年度秀でた利用成果

高温デバイスの幕開け

(利用課題名：窒化アルミニウム (AlN) を用いた高温デバイスの作製)

筑波大学 奥村 宏典

筑波大学 岡野 彩子, 谷川 俊太郎, 俵 妙, 手塚 陽子, 野木 広光



奥村 宏典



左から、岡野 彩子, 谷川 俊太郎, 野木 広光, 俵 妙, 手塚 陽子

1. はじめに

私が最初に共用設備を利用したのは、カリフォルニア大学サンタバーバラ校 (UCSB) です。研究室で保有していたのは、材料を作る結晶成長装置と光学・電氣的評価装置に絞られていました。実験の流れは、研究室で結晶成長した試料を用いて、共用設備でトランジスタを作製し、再び研究室でデバイス特性を評価する形です。透過型電子顕微鏡 (TEM) や2次イオン質量分析法 (SIMS) といった専門性の高い物性評価装置も共用設備にあり、技術職員からトレーニングを受けた後に機器利用できました。この実験環境は、スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) やマサチューセッツ工科大学 (MIT) も似ていました。特に、敷地面積の小さい MIT では、研究室が保有している実験室が～30m²の部屋一つの場合もあり、実験の多くを共用設備で行う環境でした。共用設備中心の実験のデメリットは、深夜や土日に使えないこと、自分の研究に特化した装置改造が困難であることです。一方で、最先端の設備を誰もが利用できる、技術職員によって常に最高の状態に装置が整備されている、若手でも外国人でも低コストで研究室を立ち上げられる、

異動がしやすいといったメリットがあります。実際、複雑なデバイス工程であっても、JSPS 若手研究予算で十分にフルプロセスが可能です。

筑波大学の数理物質系では、助教でも独立した研究主宰者 (PI) として活動できます。半導体デバイスの研究を行うにあたり、全てのプロセス装置を自分だけで管理すると、装置だけでなく実験室も多く必要となり、PI は装置や部屋の維持管理に忙殺されてしまいます。私は、7年前に筑波大学に着任してから、共用設備を中心とした研究体制で進めてきました。帰国して実験室がない状態でも、初年度から論文出版できたのは共用設備のお陰であり、この環境に強く貢献しているのが、ARIM となります。材料さえあれば最先端のデバイスを作れる環境により、着任して2年目には JSPS 基盤研究 (B) や NEDO 未踏チャレンジの予算獲得に繋がり、6年目には研究室を形作ることができました。半導体研究の若手 PI にとって、ARIM はなくてはならない存在と言えます。

実体験として、UCSB や MIT, EPFL の共用設備と比較しても、つくばエリア (筑波大・産業総合技術研究所 (AIST)・物質材料研究機構 (NIMS)) の共用設備は、引けを取らないか、むしろ優れていると感じます。水準が高いのは実験機器だけでなく、技術職員の技術力も該当

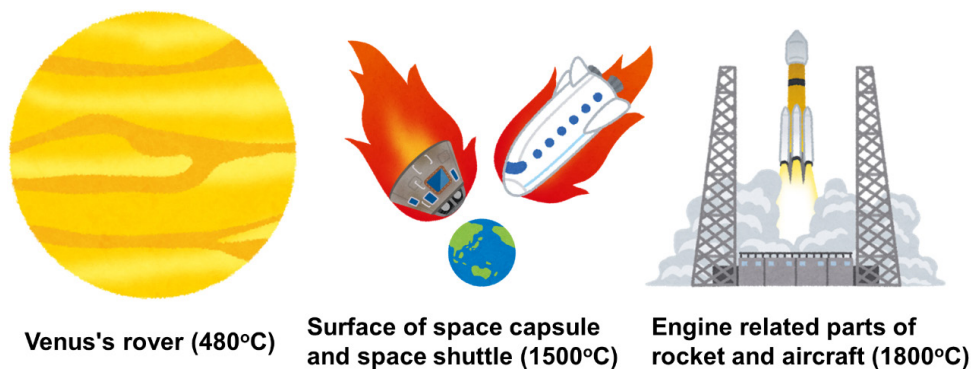


図1 高温デバイスの利用先

し、半導体の研究でできないことはないと思わせてくれます。このように、若手であっても材料とアイデアさえあれば世界をリードする研究ができる環境の中で、私が着想したのが、高温環境でも安定動作可能な半導体デバイスになります。高温デバイスは、まだ実用には至っておらず、新産業の創出に繋がると期待しています。

2. 高温環境での半導体デバイスに適した材料

現在、半導体デバイスの多くが使われている場所は、温度が $10 \pm 30^\circ\text{C}$ であり、雰囲気は主に窒素と酸素の大気圧からなる地上になります。この安定した環境で動作できる半導体デバイスは、昨今、微細化、高効率化、小型化、高性能化が進んでおり、演算処理を中心に様々な用途で活躍しています。しかし、低温・高放射線環境の宇宙や、高温・高圧の地中で動作する半導体デバイスは、開発が未熟です（図1）。航空産業であれば、ジェットエンジン周辺部において、燃料混合比のその場制御やタービン翼の故障センサといった利用が考えられます。宇宙産業であれば、 480°C に達する金星や水星の惑星探査機に高温耐性電子機器が必要になります。地中では、1km 掘る毎に $\sim 100^\circ\text{C}$ 温度が上昇します。例えば地熱発電では、数 km まで深く掘削することで、熱効率の高い発電が可能になりますが、掘削および検層機器全体が高温環境に曝されます。深層の物理検層、掘削時の温度・圧力および掘削位置を高精度に測定するには、 300°C 以上の高温耐性のある電子機器が求められます。高温環境でも安定動

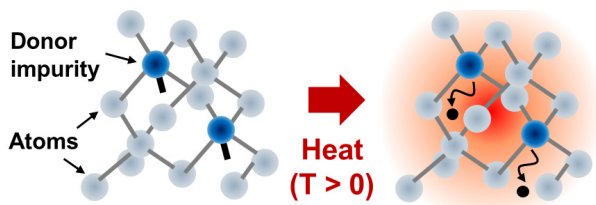


図2 半導体中に電子が生成される様子

作可能な半導体デバイスが実現できれば、機器の小型軽量化や作業の高効率化だけでなく、検層や掘削の機器故障リスクや頻度が低減され、地下資源の開発コストの低減が期待できます。

現在、主に使われている半導体材料は Si です。Si デバイスは、 $250 \sim 300^\circ\text{C}$ で特性が劣化してしまいます。 300°C 以上で半導体デバイスを長期安定動作させるには、Si に代わる新たな半導体材料が求められます。では、高温デバイスには、どのような材料が適しているのでしょうか。

半導体は温度が上がると電気が流れやすくなります。これは、構成原子や不純物に捕獲されているキャリア（電子や正孔）が、熱によって励起されて自由に動けるようになり、キャリア密度が大きくなるためです（図2）。例えばダイオードは、スイッチングや一方向にのみ電流を流す機器（整流器）として使われます。ダイオードの特性として、ON 状態で大きく電気が流れ、OFF 状態で電気が全く流れないことが好まれます（図3）。Si ダイオードを高温に曝した場合、増えたキャリア密度により OFF 状態でも電気が流れてしまい、スイッチング動作ができなくなります。原子間の結合が強い材料は、キャリアの熱

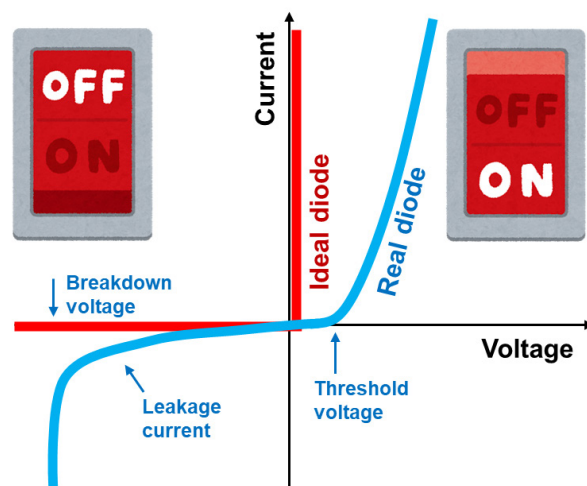


図3 ダイオード特性の説明図

表 1 さまざまな半導体の物性

	Si	SiC	GaN	β -Ga ₂ O ₃	Diamond	AlN
Bandgap energy (eV)	1.1	3.3	3.4	4.7	5.5	6.1
Critical electric field (MV/cm)	0.3	2.8	3.0	(8)	(10)	(12)
Carrier mobility (cm ² /Vs)	1350	1000	1480	(300)	(2000)	426
Balliga FOM	1	340	1450	3444	24661	10067
Thermal conductivity (W/mK)	156	490	200	27	2000	290
P- & N- semiconductors	P⊙ N⊙	P⊙ N⊙	P⊙ N⊙	P⊙ N⊙	P⊙ N⊙	P⊙ N⊙
n_i (cm ⁻³) at 1000°C	>10 ¹⁶	~10 ¹⁴	~10 ¹⁴	~10 ¹⁰	~10 ⁹	~10 ⁸
Thermal conductivity (W/mK)	156	490	200	27	2000	290

(Expected value)

励起が生じにくく、高温でも OFF 状態で電気が流れないため、高温耐性に優れます。一般的に、結合の強い半導体材料は、バンドギャップエネルギー (E_g) が大きくなるため、ワイドギャップ半導体は高温耐性に優れていることが多いです。現在、実用性に優れるワイドギャップ半導体として、炭化ケイ素 (SiC)、窒化ガリウム (GaN)、酸化ガリウム (β -Ga₂O₃)、ダイヤモンド (C)、窒化アルミニウム (AlN) が挙げられます (表 1)。 β -Ga₂O₃ は、電極の変質により、550°C 以上での利用が困難です。ダイヤモンドは、酸素を含む大気との反応性が高く、地上の高温環境では利用が制限されます。AlN は、現在、最も E_g が大きい半導体 (6.1eV) の一つであり、高温デバイス材料として優れています。

3. AlN 電子デバイス

AlN は、かつては絶縁体として扱われていました。谷保氏ら (NTT 物性科学基礎研究所) は、高品質 AlN 単結晶成長および不純物添加による導電性制御を行い [1]、深紫外域の発光デバイスを世界に先駆けて動作させました [2]。その後、加地氏ら (豊田中央研究所) は Si イオン注入法を用いた導電性 AlN 層の実現に成功しました [3]。AlN 電子デバイスに関しては、ショットキー障壁ダイオード (SBD) の動作報告が多数出るようになりました [4][5]。しかし、トランジスタ動作はありませんでした。そこで、2017 年に AlN トランジスタの研究に着手しました。

当時、DOWA エレクトロニクス社は、有機金属気相成長 (MOCVD) 法による 2 インチサイズのサファイア基板上高品質 AlN 層を市販していました。私は、Palacios 研 (MIT) に所属時、DOWA エレクトロニクス社の AlN 試料を用いて、Si イオン注入による導電性制御を行い、トランジスタ作製に挑戦しました。注入した Si 原子は、Al サイトに入らないとドナーとして機能しません。また、イオン注入を行うと注入損傷により点欠陥が多く入り、キャリアが補償されることで電気が流れ難くなることがあります。Si イオン注入した AlN 層を電氣的に活性化するには、1250°C 以上の高温で熱処理することが効果的です

[6]。しかし、MIT や Harvard にある共用設備は、主に Si や GaAs 用であり、1100°C 以上に加熱できる装置がありませんでした。グラファイトとアルミナを使って高温炉の自作を試みましたが、高純度ガス雰囲気での熱処理が困難でした。そこで、太陽日酸社にご協力頂き、1400 ~ 1700°C での熱処理を行うことで、自分たちで導電性 AlN 層の実現および金属-半導体電界効果トランジスタ (MESFET) 動作に成功しました [7]。この時、AlN トランジスタの特性は測定温度を上げるほど良くなる傾向にあったため、更なる高温特性に興味を沸きました。しかし、研究室にあったプローバは 250°C が測定限界でした。更なる高温特性を調べるには、専用の高温プローバが必要でした。

帰国後、筑波大で PI として活動を始め、DOWA エレクトロニクス社と共同研究を始めました。DOWA エレクトロニクス社の AlN 試料を用いて、Si イオン注入を外部委託し、筑波大の共用設備 (1800°C まで加熱可能な高温炉) の利用や太陽日酸社の協力を経て、電氣的活性化を行うことにしました。トランジスタの作製と電氣的特性評価は、全て筑波大および AIST の共用設備を用いることにしました。また、高温プローバを探したところ、国内で 900°C まで加熱できる装置が販売されていました。4 ~ 5 年かけて予算を集め、少しずつ高温プローバを組み立てました (図 4)。

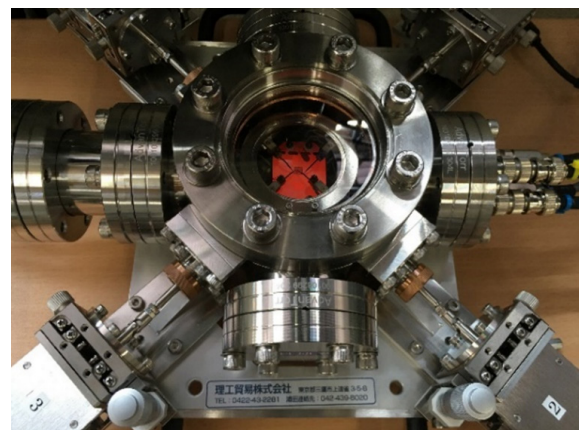


図 4 高温プローバ

4. 今回の成果

Si イオン注入した AlN 層を用いて、主に筑波大の共用設備（図 5）で SBD や MESFET を作製しました [8]。SBD の素子構造を図 6 に示します。高温熱処理（窒素雰囲気、1600℃、30 分）することで電気的活性化を行いました。筑波大の共用設備のレーザー描画装置と電子線蒸着装置を用いて、パターン形成と Ni 金属マスク（70nm）を堆積しました。AIST の共用設備の塩素系反応性イオンエッチング（150W, 0.6Pa, 20℃）を用いてメサ構造を作製後、ソース／ドレイン電極およびカソード電極として、電子線蒸着装置により Ti（20nm）/Al（100nm）/Ni（20nm）/Au（50nm）構造を堆積しました。接触抵抗低減のため、筑波大の共用設備の高温炉で合金化処理（窒素雰囲気、850℃、1 分）を行いました。ゲート電極およびアノード電極として、電子線蒸着装置により Ni（50nm）/Au（50nm）を堆積しました。作製したデバイスは、研究室の高温プ

ローバを用いて電流密度 - 電圧（ J - V ）測定を行いました。

AlN SBD の J - V 特性を図 6 に示します。測定温度を室温から 827℃まで変えました。ON 状態（+20V）の電流密度は、室温では 0.1A/cm² でしたが、827℃では 25A/cm² まで増えました。これは、Si ドナーのイオン化エネルギー（0.3eV）が大きく、温度を上げることでより多くの電子が励起されて、電子密度が増えたためです。827℃でのダイオード動作は、全ての半導体材料の中で最も大きい動作温度です。AlN デバイスの特徴は、高温でも逆方向電流が小さいことです。877℃まで測定温度を上げると、ゲート電極は問題なかったのですが、Ti/Al/Ni/Au 電極材料が拡散および変質し、デバイス測定ができなくなりました。Mo のような高融点材料を用いることで、更なる高温動作が可能になると思います。

AlN MESFET は、727℃まで安定動作できました。777℃まで測定温度を上げると、チャンネル層の下側からの漏れ電流が増大しました（図 7）。AlN は、ダイヤモンドや Ga₂O₃ と異なり、不純物ドーピングによって比較的容

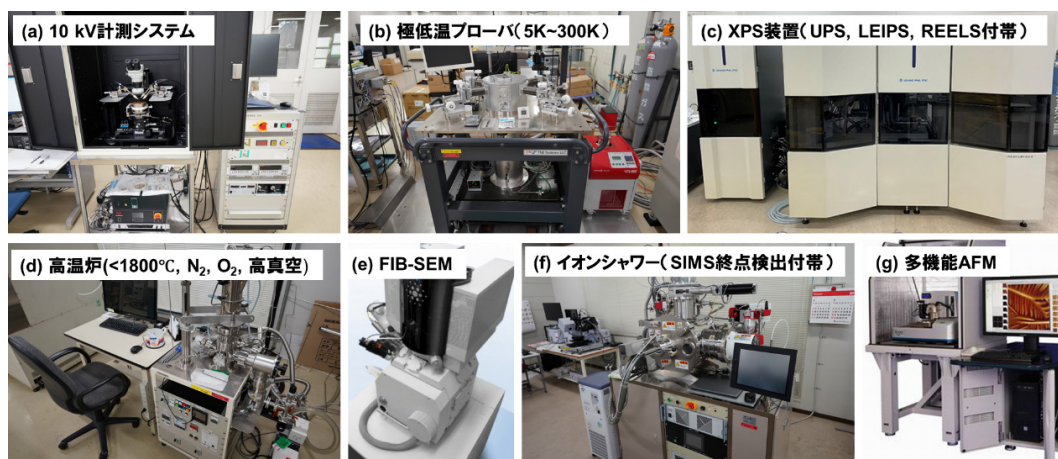


図 5 筑波大の共用設備の一部

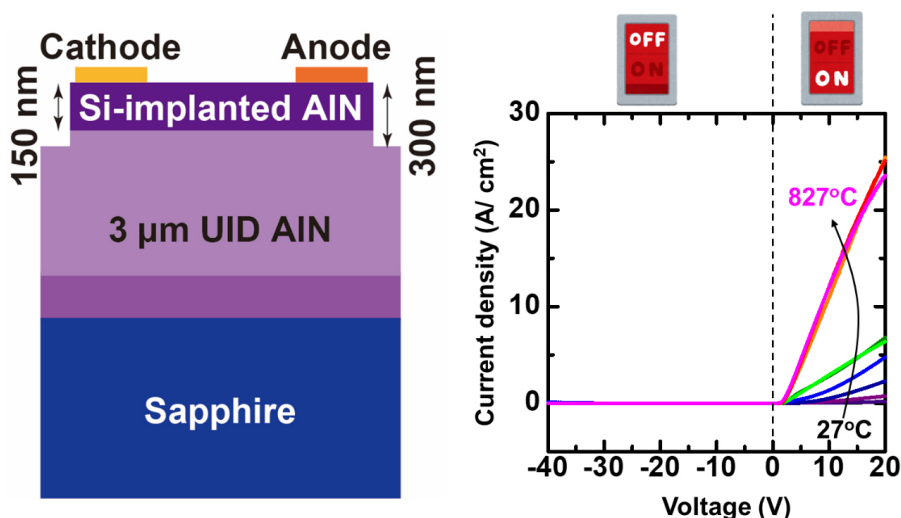


図 6 AlN ショットキー障壁ダイオードの素子構造と電気的特性

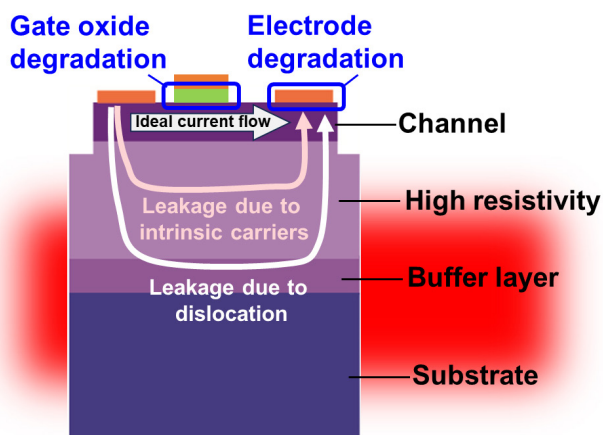


図7 高温環境における AlN 電界効果トランジスタの特性劣化要因

易に p 型と n 型の導電性制御が可能です。PN 接合を利用することで、更なる高温耐性の実現が期待できます。しかし、窒化物半導体の MOCVD 成長では、n 型層の下に p 型層を設けても、Mg アクセプタを不活性化している原子状水素が抜けにくく、PN 接合の作製が困難です。そこで、現在、縦型構造を検討しています。導電性 AlN 基板は実現できていないため、導電性 SiC 基板上 AlN 層を用いたデバイス作製に着手しています [9]。

今回作製した AlN デバイスのチャネル層およびコンタクト層には、イオン注入損傷がまだ多く残っています。接触抵抗とシート抵抗が大きいため、室温での電流密度が非常に小さくなっています。最近、廣木ら（NTT 物性科学基礎研究所）は、MOCVD 成長による Si 添加および Al 組成傾斜 AlGaIn コンタクト層の利用により、AlN チャネル MESFET の電流の増大を報告しました [10]。さらに、隈部ら（名古屋大学）が報告した AlGaIn 分極ドーピングを用いれば、更なる特性向上が期待できます [11]。また、高温耐性には、チャネル層が PN 接合に挟まれた接合型トランジスタ（JFET）が優れています。金子ら（京都大学）は、SiC JFET を用いた 350℃での回路動作を報告しています [12]。AlN JFET を用いることで、800℃以上での回路動作が期待できます。今後、実用化を進めるにあたり、デバイスだけでなく、高温用パッケージ技術も求められます。企業と連携しつつ、高温センサや高温回路の実用化を進めていきたいと思っています。

5. おわりに

本成果を通じて、DOWA エレクトロニクス社と特許出願および論文出版 [6] に至っています。オープンアクセスですので、どなたでも無料で論文を読むことができます。また、今回の AlN デバイスは、自前の実験設備がなくても、どなたでもできる研究内容です。AlN 試料は DOWA エレクトロニクス社から購入できます。イオンテクノセンタ

社にイオン注入して頂き、筑波大と AIST の共用設備でデバイス作製と評価を行うことができます。詳細な AlN デバイスのプロセスレシピは奥村の researchmap で公開していますので、ご興味のある人は、是非作製してみてください。

本成果の報告後、日本の企業や海外の大学（MIT, Aalto, Cardiff, ミラノ工科大など）から多数の共同研究のご提案を頂いております。若手研究者が産学連携や国際共同研究、最先端の半導体研究を進めるには、ARIM なしには不可能の時代になったと言っても過言ではありません。

6. 謝辞

本研究は、DOWA エレクトロニクス社の柴田 智彦様、渡邊 康弘様、吉澤 康平様と共に実施されました。深くお礼申し上げます。MIT の Tomas Palacios 教授、Yuhao Zhan 氏、Aalto 大の Sami Suihkonen 博士、Jori Lemettinen 氏、筑波大の上殿 明良教授、大陽日酸社の徳永 裕樹様、小関 修一様、有村 忠信様のご助言とご協力がありましたこと、深く感謝いたします。また、各所と関係を取り持って頂いた、大陽日酸社の黒田 篤様には深く感謝いたします。本成果の一部は、ARIM 事業（No. JPMXP1223BA0011）の支援を受けて、筑波大と AIST の共用設備を用いて実施されました。DOWA テクノファンドを中心とした研究プロジェクトの一環として、DOWA エレクトロニクス社との共同研究契約に基づいて実施されました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Taniyasu, M. Kasu, and N. Kobayashi, Appl. Phys. Lett. **81**, 1255 (2002).
- [2] Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto, Nature **441**, 325 (2006).
- [3] M. Kanechika and T. Kachi, Appl. Phys. Lett. **88**, 202106 (2006).
- [4] Y. Irokawa, E. Gracia Villora, and K. Shimamura, Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 040206 (2012).
- [5] T. Kinoshita, T. Nagashima, T. Obata, S. Takashima, R. Yamamoto, R. Togashi, Y. Kumagai, R. Schlessler, R. Collazo, A. Kokitu, and Z. Sitar, Appl. Phys. Exp. **8**, 061003 (2015).
- [6] H. Okumura, Y. Watanabe, T. Shibata, K. Yoshizawa, A. Uedono, H. Tokunaga, S. Koseki, T. Arimura, S. Suihkonen, and T. Palacios, Jpn. J. Appl. Phys. **61**, 026501 (2022).
- [7] H. Okumura, S. Suihkonen, J. Lemettinen, A. Uedono, Y.

- Zhang, D. Piedra, and T. Palacios, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 04FR11 (2018).
- [8] H. Okumura, Y. Watanabe, and T. Shibata, Appl. Phys. Exp. **16**, 064005 (2023).
- [9] H. Okumura, M. Imura, F. Miyazawa, and L. Mainini, Jpn. J. Appl. **63**, 100903 (2024).
- [10] M. Hiroki, Y. Taniyasu, and K. Kumakura, IEEE Elect. Dev. Lett. **43**, 350 (2022).
- [11] T. Kumabe, A. Yoshikawa, S. Kawasaki, M. Kushimoto, Y. Honda, M. Arai, J. Suda, and H. Amano, IEEE Trans. Elect. Dev. **71**, 3396 (2024).
- [12] M. Kaneko, M. Nakajima, Q. Jin, and T. Kimoto, IEEE Elect. Dev. Lett. **43**, 997 (2022).
- (筑波大学 数理物質系 奥村 宏典)



【お問い合わせ】

筑波大学マテリアル先端リサーチインフラ事業

☎ 029-853-5804

E-mail staff@u-tsukuba-arim.jp

ホームページ

<https://u-tsukuba-arim.jp/>