

世界初！ 注目の新規半導体「コランダム構造酸化ガリウム (Ga₂O₃)」を用いて ノーマリーオフ型 MOSFET の動作実証に成功！

～EV 普及の「三種の神器」パワー半導体で課題を解決、酸化ガリウムをパワー半導体のスタンダードへ！～

【研究背景】

省エネ社会実現に向けて、パワーデバイス^{*1}の低損失化が期待されています。パワーデバイスは電力（パワー）の変換に用いられる半導体デバイスのことで、AC アダプタや、電気自動車・ロボット・白物家電に搭載されるインバーターなど、あらゆる電力変換器に搭載されています。これまでは他の半導体デバイス同様、シリコン（Si）が用いられてきましたが、これ以上の特性改善が期待しにくいことから、電力変換器の小型化、低コスト化の限界^{*2}を迎えていると考えられ、新規材料によるイノベーションが期待されてきました。身近な例では、ノートパソコンの AC アダプタを小型化することが期待され、また、電気自動車においては、普及に欠かせない「三種の神器」ともいわれ、燃費向上や走行距離アップへの貢献が期待されています。

酸化ガリウム^{*3}（以下、Ga₂O₃）はその最有力候補の一つで、結晶構造の異なる 5 つの結晶多形が知られています。最も物性値が良いと考えられているのがコランダム構造（α 構造）です。長きにわたり、単結晶薄膜の作製自体が不可能でその存在が注目されることもありませんでしたが、京都大学が 2008 年に世界で初めてサファイア基板上に単結晶薄膜を作製したことを契機とし、その後、FLOSFIA が 2015 年に世界最小（FLOSFIA 調べ）の特性オン抵抗である 0.1mΩcm²のショットキーバリアダイオード（以下、SBD）を試作、さらに汎用パッケージ（TO220）でのサンプル出荷が開始するなど、急速に事業化が進みつつあります。

次の展開に向けて、当グループでは、コランダム構造 Ga₂O₃を用いたパワートランジスタ^{*4}として、絶縁効果型トランジスタ（以下、MOSFET）の開発に取り組んできました。2016 年には、コランダム構造を有する P 型半導体「酸化イリジウム」を発見し、材料面から、普及に不可欠とされるノーマリーオフ動作への道筋をつけることに成功、これを機に MOSFET の動作実証が期待されていました。

【研究成果】

今回、待望されてきた MOSFET を試作し、ノーマリーオフ動作の実証に成功しました（図 1）。デバイス構造としては、サファイア基板上に酸化ガリウムを用いた N+型ソース・ドレイン層や新規 P 型半導体層を用いた P 型ウェル層、ゲート絶縁膜、電極などを形成しました（図 2、図 3）。測定した電流-電圧特性から外挿したゲート閾値電圧は 7.9V でした。本デバイスでは、コランダム構造を有する新規 P 型半導体層をチャンネル層として用いており、反転層チャンネルの動作実証に成功したと解釈されます。

2016 年の当グループによる発表までは、Ga₂O₃デバイスにおいては P 型層の形成が理論上不可能と考えられ、ノーマリーオフ動作は実現不可能と認識されてきたことから、今回の新規 P 型半導体を用いた反転層チャンネルは革新的な成果といえます。

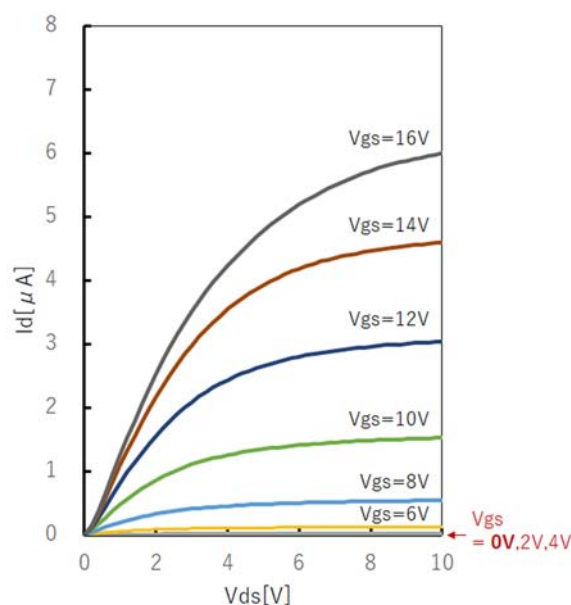


図 1 電流-電圧特性

ゲート電圧 Vgs が 0V のときに電流が流れず、電圧を上げていくと電流が流れるノーマリーオフ動作することを確認しました。

これにより、電気自動車を始めとする安全・安心が求められる幅広い電源領域での適用が期待され、電気自動車や小型 AC アダプタの普及を後押しすることが期待できます。

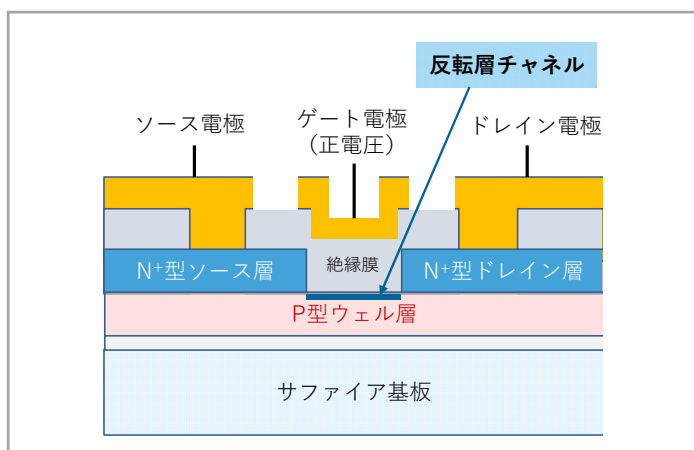


図2 デバイス断面図 (イメージ)

サファイア基板上に P 型ウェル層としてコランダム構造新規 P 型半導体、N 型ソース層として $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を積層し、横型の電流パスを有する構造で試作しました。

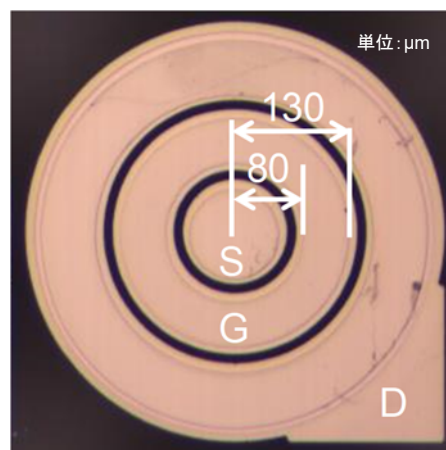


図3 デバイス写真

ノーマリーオフ動作の実証に成功した MOSFET の顕微鏡写真

【産業応用への道筋】

今回の研究成果は、FLOSFIA のコランダム構造 Ga_2O_3 パワーデバイス「 GaO^{TM} 」シリーズとして量産予定で、さまざまな電力変換器への搭載を目指します。電力変換器の例としては、AC アダプタなどの商用電源、ロボットの駆動回路、電気自動車やハイブリッド車などの自動車、エアコンや冷蔵庫などの白物家電、太陽電池のパワーコンディショナなどが挙げられ、 GaO^{TM} パワーデバイスの採用により、電力変換器全体の小型化やコスト低減に貢献することを目指します。機器の種類にもよりますが、例えば、電力変換器の小型化の程度は、数十分の一に及ぶことがあり、コスト低減効果は電力変換器全体の 50% に及ぶことが期待されます (FLOSFIA 試算)。

【株式会社 FLOSFIA】

京都大学発のベンチャー企業です。様々な智慧・叡智 (sophia) が流れ (flow) 込み集まる会社、そしてこの智慧・叡智 (sophia) を更に磨きあげて、社会に流し戻して (flow) 人類の進歩に貢献する会社でありたいと考え、我々が目指すこのような姿を「FLOSFIA」と名付けています。作り出された電気を効率よく使用するために必要不可欠な低損失・低コストなパワーデバイスを実現するため、 Ga_2O_3 パワーデバイスの事業化に取り組んでいます。



- ・会社名：株式会社 FLOSFIA (フロスフィア)
- ・所在地：京都市西京区御陵大原 1 番 36 号 京大桂ベンチャープラザ北館
- ・代表者：人羅 俊実
- ・資本金：22 億 6,000 万円 (資本準備金含む)
- ・ホームページ：http://flosfia.com

【用語説明】

※1 パワーデバイス

電力変換に用いられる半導体デバイスのことで、トランジスタやダイオード、サイリスタなどが知られています。

※2 電力変換器の小型化、低コスト化の限界

電力変換器の小型化、低コスト化には、動作周波数の高周波化が必要と考えられています。シリコン (Si) を用いた場合には、高周波動作させると変換損失が大きくなってしまい追加の放熱対策が必要となることなどから、電力変換器の小型化が困難であると考えられています。また、新しい半導体材料としてシリコンカーバイド (SiC) を用いた場合には、高周波動作は可能で電力変換器の小型化は可能ですが、その合成方法やプロセス技術の特殊性から、低コスト化には限界があると考えられています。

※3 酸化ガリウム (Ga_2O_3)

パワー半導体材料として注目を集めている新材料です。様々な結晶構造を有し、コランダム構造 (α 構造) 以外にも β ガリア構造などの結晶構造をとることが知られています。 β ガリア構造は酸化ガリウムしか取らない特殊な結晶構造であるのに対し、コランダム構造は酸化ガリウム以外にもサファイアや酸化インジウムなどさまざまなファミリー群が存在することから、バンドギャップエンジニアリングや結晶性緩衝層としての活用など、ファミリー群を活用したデバイス開発が行われています。

※4 パワートランジスタ

パワーデバイス向けのトランジスタのことで、ロジック回路で用いられる一般的なトランジスタと比較して、大電流を流すことが特徴です。

※5 ミスト CVD 法 (ミストドライ[®]法)

霧 (ミスト) 状にした原材料溶液と加熱部を用いて、簡便、安価、安全に酸化物半導体薄膜が作製できる手法で、当グループの藤田静雄教授らの研究グループが独自に開発しました。一般的な化学気相成長法 (CVD : Chemical Vapor Deposition) 法が原材料にガスを用いるのに対し、原材料に液体 (溶液) を用います。原材料溶液は、有機金属やハロゲン化物など、反応の源になる「溶質」と、溶質を溶解させて液体状にするために用いられる水や有機溶媒 (メタノール、エタノールなど) などの「溶媒」とで構成されます。従来の成膜法と違い、真空装置が不要なので装置コストが大幅に低くなり、また真空引きが不要で段取り時間を短縮できるため 1 回の成膜プロセス時間が短縮され、生産性を大きく向上させることが可能です。

【特記事項】

「ミストドライ[®]」は FLOSFIA の登録商標です。

以上

研究成果のバックグラウンドに関する説明

パワーデバイス

電気は現代社会を支えるエネルギーです。図 1 に示すように、電気は発電所から送電線、変電所を経て最後に消費されますが、この間、電圧の変換、直流／交流の変換、機器運転の制御などが行われます。そしてその都度エネルギーを損失します。このような電力制御に用いられる半導体デバイスをパワーデバイスと呼びます。電力の損失をできる限り減少させ、電力の有効利用を図るためには、パワーデバイスによる電力制御の効率をできる限り高める必要があります。ここで、パワーデバイスに用いる半導体材料のバンドギャップが大きいほど、この効率が高いという傾向があります。半導体の代表はシリコンですが、シリコンのバンドギャップは 1.1 eV と小さいことから、バンドギャップが 3.3-3.4 eV と大きい炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) が次世代のパワーデバイス材料として注目されています。

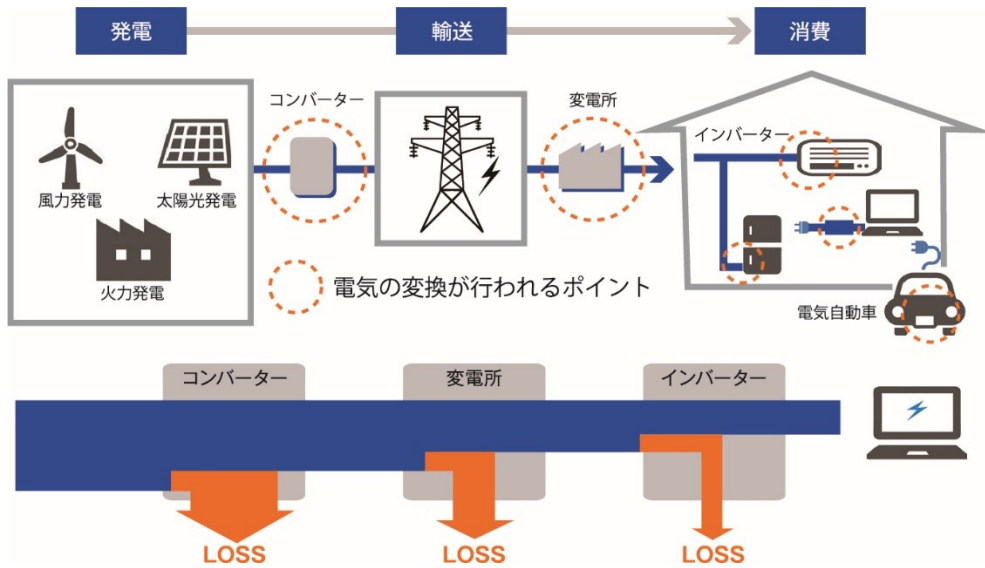


図 1 電気の発生から消費までに生じる変換損失 (株式会社 FLOSFIA 提供)

パワーデバイスとしての代表は、ショットキーバリアダイオード (SBD) と電界効果型トランジスタ (MOSFET) です。いずれも電流を通過・遮断するスイッチング動作が利用されます。電流が通過するオン状態では、その抵抗 (オン抵抗) が低いことが必須です。なぜなら抵抗が高いと電力の損失になるためです。一方電流を遮断するオフ状態では、高い電圧にも耐える必要があります。また、MOSFET では、そのゲートに電圧を印加した時にオン状態、電圧を取り除いた時にオフ状態になる必要があります。なぜなら、何らかの故障でゲートに印加する電圧が切れた場合に、デバイスをオフ状態にして電力の暴走を防ぐ必要があるためです。この動作が可能な MOSFET を、ノーマリオフ型 MOSFET と呼びます。逆にゲートに印加する電圧が切れた後もオン状態になるデバイスをノーマリオン型と呼びます。

酸化ガリウム

酸化ガリウム (Ga_2O_3) は、バンドギャップが約 5 eV と大きい値を持ちます。しかし、バンドギャップが大きすぎてほぼ絶縁膜であるともいえます。これに対し、2008 年に京都大学において、 Ga_2O_3 のショットキー接合の形成、深紫外光

検出といった半導体としての機能を実証されました[1,2]。その後、 Ga_2O_3 が次世代の高耐圧のパワーデバイス用半導体として望ましい特性を持つことが注目されるに至りました。

Ga_2O_3 は、図 2 に示すように、いくつかの異なる結晶構造を取ります。このうち、熱的に最も安定な構造は β 型と呼ばれる斜方晶構造です。パワーデバイス材料として Ga_2O_3 が注目されるに至った理由の一つは、 β 型の基板が開発されたという点にあります。新しい半導体材料を用いたデバイスの研究では、その半導体を成長する基板として何を利用できるかという点が重要です。よく知られた GaN では、研究開始の当初は GaN の基板がなかったためにサファイアを基板として用いることを余儀なくされました。しかし、サファイアの上に異質の物質である GaN を成長する訳ですから、これは非常に困難です。これに対して、成長の初期に低温で成長したバッファ層を入れるというアイデアが実を結びました。一方、 Ga_2O_3 の研究では、研究が開始された当時にすでに β 型の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板が存在しており、その上に $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を成長すればいいという、いわば「研究を進めやすい」材料でもありました。2013 年にはノーマリオン型ではありますが MOSFET の動作が NICT から報告されました。その後、次世代の超低損失パワーデバイス用半導体として大きな期待が寄せられ、世界中の研究者がこの材料の高い潜在能力に注目して活発な研究を進めています。

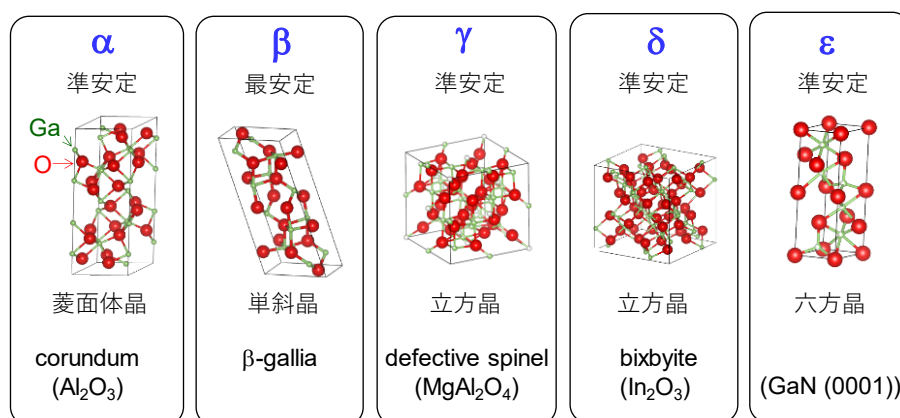


図 2 Ga_2O_3 の各種結晶構造 (佐賀大学大島准教授提供)

京都大学では、早い時期に $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板上への結晶成長、バンドギャップ制御、多層構造の育成などで先駆的な貢献をなしました[3,4]。一方で、「デバイスを作製するのに必要なエネルギーを少なくする」、「安全な原料をもとにデバイスを作製する」、「デバイスのコストを抑える」といったことが、次世代のパワーデバイスの広い普及と省エネルギー社会への貢献に必須だと考えました。当時、京都大学では、酸化物半導体を安全、低コスト、省エネルギーのもとで成長する「ミスト CVD 法」という技術の研究を行っていました。これを用いて、安価なサファイア基板上に Ga_2O_3 を成長すると、結晶性の優れたコランダム構造 α 型の結晶 ($\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$) が得られることを見出しました[5]。 β 型と比較すると α 型は熱的には準安定状態ですが、サファイア基板が α 型の結晶構造を持つために得られたものと考えられます。この $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ がその後京都大学オリジナルの半導体材料としての進化を続けました。

株式会社 FLOSFIA

株式会社 FLOSFIA の前身である ROCA 株式会社は、京都大学の学生から生まれたベンチャー起業です。2010 年 11 月に、産官学連携本部提供授業「起業と事業創造」受講者が、IBTEC (Intel+UC Berkeley Technology Entrepreneurship Challenge) に参加し、日本人で初めてファイナリストとなりました[6]。その後、2011 年にこのメンバーを中心に ROCA 株式会社を設立しました。この事業内容は無機物を用いた水の濾過膜で、

ミスト CVD 技術が基盤技術として用いられていました。その後、2012 年 6 月に人羅俊実氏（元 ALGAN 社代表取締役）が代表取締役社長に着任し、京都大学で研究されていた α - Ga_2O_3 のデバイス応用とミスト CVD 技術の成膜応用に事業の方向性を転換されました。2014 年 7 月 株式会社 FLOSFIA に社名変更し、2015 年 10 月には世界最小（同社調べ）のオン抵抗を持つ SBD の開発を報告し、事業化を進めておられます。

京都大学工学研究科 藤田静雄教授の研究室と株式会社 FLOSFIA とは共同研究を進め、外部資金によるプロジェクト研究も積極的に行っています。また、株式会社 FLOSFIA の社員が社会人博士後期課程学生として入学して京都大学において研究を行うなど、人材の交流・育成にも成果をあげています。株式会社 FLOSFIA は京大桂ベンチャープラザにあり、地理的にも京都大学と連携を図るうえで効果的であると言えます。

p 型半導体の研究開発

以上記しましたように優れた特徴を持つ Ga_2O_3 ですが、一つの大きな問題点として、Sn や Si をドーピングして n 型の電気伝導を得ることが一方で、p 型の電気伝導を得ることが難しいという課題があります。p 型の電気伝導を得るには、Zn や Mg をドーピングすることが考えられますが、明確な p 型の電気伝導を報告した論文はありません。一方、 α - Ga_2O_3 と同じコランダム構造を持ち、ゼーベック効果で小片において p 型伝導が観測されたという報告のあるコランダム構造酸化イリジウム (α - Ir_2O_3) という材料に着目しました。この材料は、図 3 に示すように α - Ga_2O_3 と非常に近い格子定数を持つことが期待されます。従来、高い結晶性を持つ α - Ir_2O_3 を実現した例はありませんでしたが、ミスト CVD の特徴を活かして結晶成長に成功し、2016 年にホール測定において p 型伝導を実証しました。その後、p 型半導体に関して、デバイス応用に向けた研究開発を進めています。

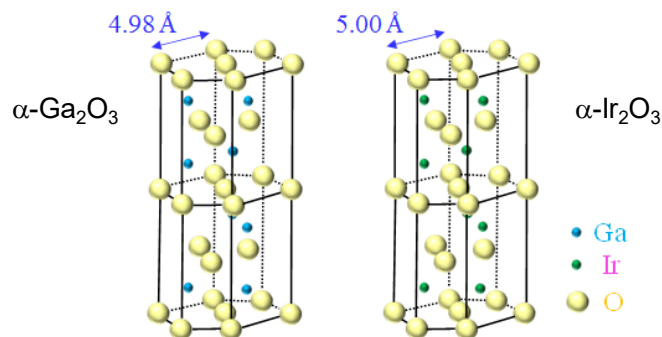


図 3 α - Ga_2O_3 と α - Ir_2O_3 の結晶構造

今回の成果（ノーマリオフ型 MOSFET）について

今回作製した MOSFET の断面構造を図 4 に示します。ノーマリオフ型 MOSFET は、この図にあるように、一般に p 型半導体を母材として形成されます。ゲートに電圧が印加されていない時には、 n^+ 型のソース、ドレイン層に対して 2 つの pn 接合が逆向き・直列に形成されることから、ソース・ドレイン間に電流が流れません（オフ状態）。一方、ゲートに正電圧を印加することによって、ゲートの下に電子が蓄積した反転層が生じ、ソース・ドレイン間が導通します（オン状態）。ゲートの制御回路が故障したり電源がオフとなった際に、ソース・ドレイン間がオフ状態になりますので、安全に電気を遮断することになり、これがパワーデバイスに必須の動作です。これまで、 β - Ga_2O_3 において構造を工夫することで、n 型層のみを用いて MOSFET のノーマリオフ動作を示した例はありましたが、今回の成果はノーマリオフ型

MOSFETの基本構造であるp型層を用いたデバイスで、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ において初めて得られたノーマリオフ動作です。

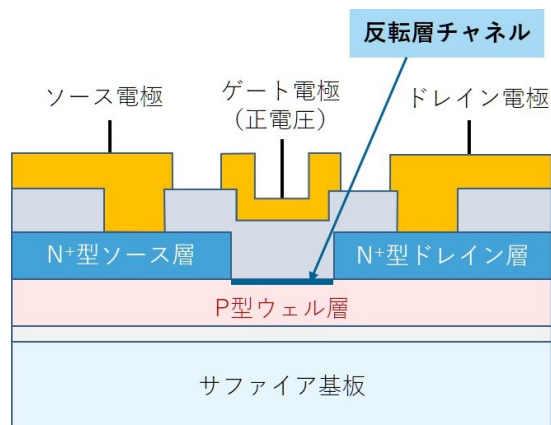


図4 今回作製した MOSFET の断面構造 (株式会社 FLOSFIA 提供)

追記

この成果は、2018年7月13日の京都新聞オンライン、7月16日のCompound Semiconductor誌オンライン(英国)などで報じられました。

文献

- [1] T. Oshima, T. Okuno, N. Arai, N. Suzuki, S. Ohira, and S. Fujita, *Applied Physics Express*, 1, 011202 (2008). DOI: 10.1143/APEX.1.011202
- [2] T. Oshima, T. Okuno, N. Arai, N. Suzuki, H. Hino, and S. Fujita, *Japanese Journal of Applied Physics*, 48, 011605 (2009). DOI: 10.1143/JJAP.48.011605
- [3] T. Oshima, N. Arai, N. Suzuki, S. Ohira, and S. Fujita, *Thin Solid Films*, 516, 5768 (2008). DOI: 10.1016/j.tsf.2007.10.045
- [4] D. Shinohara and S. Fujita, *Japanese Journal of Applied Physics*, 47, 7311 (2008). DOI: 10.1143/JJAP.47.7311
- [5] T. Oshima, T. Okuno, N. Arai, Y. Kobayashi, and S. Fujita, *Japanese Journal of Applied Physics*, 48, 070202 (2009). DOI: 10.1143/JJAP.48.070202
- [6] <https://www.saci.kyoto-u.ac.jp/topics/news/1007.html>