

シンポジウム(口頭講演) | シンポジウム：【一般公開】社会を変えるワイドギャップ半導体の現状と将来

■ 2025年9月7日(日) 13:30 ~ 18:00 | 会場 N101 (共通講義棟北)

[7p-N101-1~10] 【一般公開】社会を変えるワイドギャップ半導体の現状と将来

岩谷 素顕(名城大)、谷保 芳孝(NTT)、古川 彰彦(三菱電機)、渡辺 直樹(日立製作所)

13:30 ~ 13:35

[7p-N101-1] オープニング・開催趣旨説明

○山口 敦史¹ (1.金沢工大)

13:35 ~ 14:05

[7p-N101-2] サステナブルエレクトロニクス構築のための窒化物半導体社会実装

○天野 浩¹ (1.名大IMaSS)

14:05 ~ 14:35

[7p-N101-3] AlGa_N巨大分極電荷による新規電気伝導制御

○竹内 哲也¹、岩谷 素顕¹、上山 智¹ (1.名城大理工)

14:35 ~ 15:05

[7p-N101-4] ダイヤモンド量子センサの可能性

○波多野 睦子¹、酒井 忠司¹ (1.科学大工)

15:05 ~ 15:35

[7p-N101-5] 窒化物半導体系光デバイスの最新動向

○向井 孝志¹ (1.日亜化学)

15:50 ~ 16:20

[7p-N101-6] 脱炭素社会実現に貢献するSiC半導体の現在と将来

○木本 恒暢¹、金子 光顕¹ (1.京大工)

16:20 ~ 16:50

[7p-N101-7] SiC半導体信頼性確保のための欠陥エンジニアリング

○加藤 正史¹、原田 俊太²、坂根 仁³ (1.名工大、2.名大、3.住重アテックス)

16:50 ~ 17:20

[7p-N101-8] 酸化ガリウムデバイスの現状と可能性

○東脇 正高^{1,2} (1.大阪公立大院工、2.情通機構)

17:20 ~ 17:50

[7p-N101-9] 電動車用SiCパワー半導体の開発動向とカーボンニュートラル

○金村 高司¹ (1.ミライズ)

17:50 ~ 18:00

[7p-N101-10] クロージング

○大島 武¹ (1.量研)

サステイナブルエレクトロニクス構築のための窒化物半導体社会実装

Sustainable Electronics and the Acceleration of Social Implementation of Nitrides

名大 IMaSS ○天野 浩

IMaSS, Nagoya Univ.

E-mail: amano@nagoya-u.jp

窒化ガリウム(GaN)系青色 LED を用いた白色電球の社会実装は、持続可能な照明の普及につながった。GaN の応用は発光デバイスに留まらない。パワーデバイスや RF デバイスへの展開は、消費するエレクトロニクスから持続可能エレクトロニクスへの変革をもたらす。パワーデバイスとして、既に Si 基板上の高電子移動度トランジスタは実用化されており、PC やスマートフォン用小型・軽量 AC アダプタをよく目にするようになった。期待される用途は、このような小電力システムにとどまらない。高チャネル移動度を生かした縦型 GaN デバイスを用いることで、次世代データセンター用高压 DC 電源、EV 用高速充電器やモーター駆動用インバーター、バリアブル再生可能エネルギーと電力網を繋ぐインバーターなど、10KW を超える応用が広がる。現状最も大きな課題はデバイス製造コストである。例えば GaN 基板を用いる場合、その価格は現状では Si 基板に比べて 3 桁も高い。最近、我々は底面からのレーザースライスによる GaN 基板リサイクル技術を確認した。また、デバイス構造のエピタキシャル成長やデバイス作製のプロセスコストの低減も重要である。従来、デバイス構造の成長には有機金属化合物気相成長法が用いられてきた。有機金属化合物原料は金属からの製造過程でコストアップが避けられない。金属を炉内で塩化水素と反応させるハロゲン輸送気相エピタキシャル成長法を確認することで、デバイスエピウェハ製造時のランニングコストを 7 分の 1 以下に低減できる。高耐压パワーデバイスの作製には面内 pn 接合構造が必要になる。従来はエピタキシャル再成長が一般的であり、トータルコストアップの懸念がある。我々は、Si デバイス作製で一般的な Mg イオン注入技術の確立を目指している。GaN はイオン注入によるダメージが大きく、回復は容易でない。従来は 1300℃以上の高温で 1GPa までの超高压高温アニールが行われていた。最近では 1 気圧アニールと Mg メタルコンタクトプロセスの組み合わせで、Si デバイス製造と互換性のあるプロセスでの縦型デバイス製造が出来つつある。GaN ウエハサイズは Si に比べ 40~50 年遅れている。そのため、中古の Si デバイス製造装置を GaN on GaN パワーデバイス製造用に再利用することで、初期投資を抑えコストダウンが可能である。本講演では、GaN on GaN パワーデバイス製造の低コスト化に向けた我々の取り組みを紹介する。

AlGaN 巨大分極電荷による新規電気伝導制御

Novel electrical conductivity control with large polarization charges in AlGaN

名城大理工 ○竹内 哲也、岩谷 素顕、上山 智

Meijo Univ., Dep. Mat. Sci. & Eng., °T. Takeuchi, M. Iwaya, and S. Kamiyama

E-mail: take@meijo-u.ac.jp

1989 年の青色 LED 実現には、低温堆積緩衝層による高品質 GaN 薄膜[1]に、Mg 添加および低速電子線照射処理を行った p-GaN[2]が大きな役割を果たした。30 年以上経過した現在、深紫外発光素子実用化に向けて、再び p 型化という課題が存在する。5 eV 以上のワイドギャップ p-AlGaN が必要であるが、GaN における Mg のイオン化エネルギー (~ 100 meV) に対し、AlN では少なくとも 300 meV 以上とされており[3]、このままでは室温における正孔生成が困難な状況である。

このような状況下、AlGaN で顕著な自発分極を利用した、分極ドーピングという新規手法が 2010 年に提案、実証された[4]。層厚方向組成傾斜による 3 次元分布分極電荷に正孔を蓄積させる手法である。現在では、深紫外 LED やレーザーダイオードに欠かせない技術となっている。分極は室温で電荷を有するため、上述した、不純物ドーピングにおけるイオン化エネルギーの限界を原理的に回避できるはずである。ここで、これまでに分極ドーピングの原理の解釈として、以下の二つが存在すると我々は理解している。

(1) Mg 添加必須：添加された Mg のイオン化を分極「電場」が促進、正孔が生成 [4,5]

(2) Mg 添加不必要：電荷中性条件を満たすために、分極「電荷」に正孔が蓄積 [6]

例えば、AlN 上ワイドギャップ組成傾斜 AlGaN 層を眺めると、Mg 添加を併用した分極ドーピングの場合のみに、ホール測定による正孔実証が報告されるに留まっている。結果として、上記(1)の Mg 添加が必須で、分極「電場」が重要であることをサポートする状況であった。

我々のグループでは、2013 年より、(2)の電荷中性条件、すなわち分極「電荷」が本質であるという立場で検証を継続してきた。その結果、ごく最近、コンタクト層などの最適化もあり、AlN 上ワイドギャップ組成傾斜 AlGaN 層であっても、Mg 添加しない分極ドーピングのみで、 1×10^{18} cm⁻³ を超える正孔濃度がホール測定で得られ始めている。本発表では、ワイドギャップ AlGaN における分極ドーピングの概要を述べた後、我々のグループで得られた結果を紹介する。

謝辞：本研究の一部は、科研費基盤研究 S (23H05460)、環境省「革新的な省 CO2 型環境衛生技術等の実用化加速のための実証事業」の成果です。

参考文献：[1] H. Amano et al., *Appl. Phys. Lett.* 48, 353 (1986). [2] H. Amano et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 28, L2112 (1989). [3] R. Ishii et al., *Phys. Rev. B* 108, 035205 (2023). [4] J. Simon et al., *Science* 327, 30 (2010). [5] S. Rathkanthiwar et al., *Appl. Phys. Lett.* 122, 152105 (2023). [6] T. Yasuda et al., *Appl. Phys. Express* 10, 025502 (2017).

ダイヤモンド量子センサの可能性

Diamond Semiconductors for Quantum Sensing

科学大工¹ ○波多野 睦子¹, 酒井 忠司¹

Science Tokyo¹ ○Mutsuko Hatano¹, Tadashi Sakai¹

E-mail: hatano.m.ea28@m.isct.ac.jp

ダイヤモンド、SiC、hBN などのワイドバンドギャップ半導体中の複合欠陥に起因する電子スピンを量子ビットとして活用する量子センサは、エネルギーエレクトロニクス的高度計測、生体信号の高感度計測、さらには宇宙・深海といった極限環境での応用が期待できる。中でもダイヤモンド中の窒素－空孔(NV)センタは、広い温度領域で安定に量子状態を保持、優れたダイナミックレンジ、温度と磁場などエネルギーと情報のマルチモーダル計測能力、などの特長を有する。このため応用範囲は幅広く、ナノスケールの局所測定からマクロスケールの産業応用に至るまで、磁場・温度・電場・圧力の高精度センシングにおいて、急速に研究開発が進展している。

本講演では、ダイヤモンド量子センサの物理的特徴、性能と安定性の鍵となる材料と量子計測のコア技術について説明する。さらに、ダイヤモンド量子センサの特性を活かした応用として、細胞や生体の計測、電池・パワーエレクトロニクスなどの高精度モニタリング技術を中心に、プロトタイプと共に紹介する (Figure 1) [1-6]。 [1] Y. Hatano *et al.*, Sci. Rep. 12, 13991(2022). [2] A. Arai *et al.*, Commun. Phys. 5, 200 (2022).

[3] T. Iwasaki *et al.*, ACS Nano (2017). [4] B. Yang *et al.*, Phys. Rev. Applied 14, 044049 (2020). [5] R. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. Applied 19 044089 (2023). [6] N. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. Applied 21, 064010 (2024).

[謝辞] 本研究は、(AIST)、(QST)、(NIMS)、京大、東大、日立製作所、信越化学、住友電工、矢崎総業との共同研究の成果です。本研究は文科省 Q-leap プログラム JPMXS0118067395 により行われました。

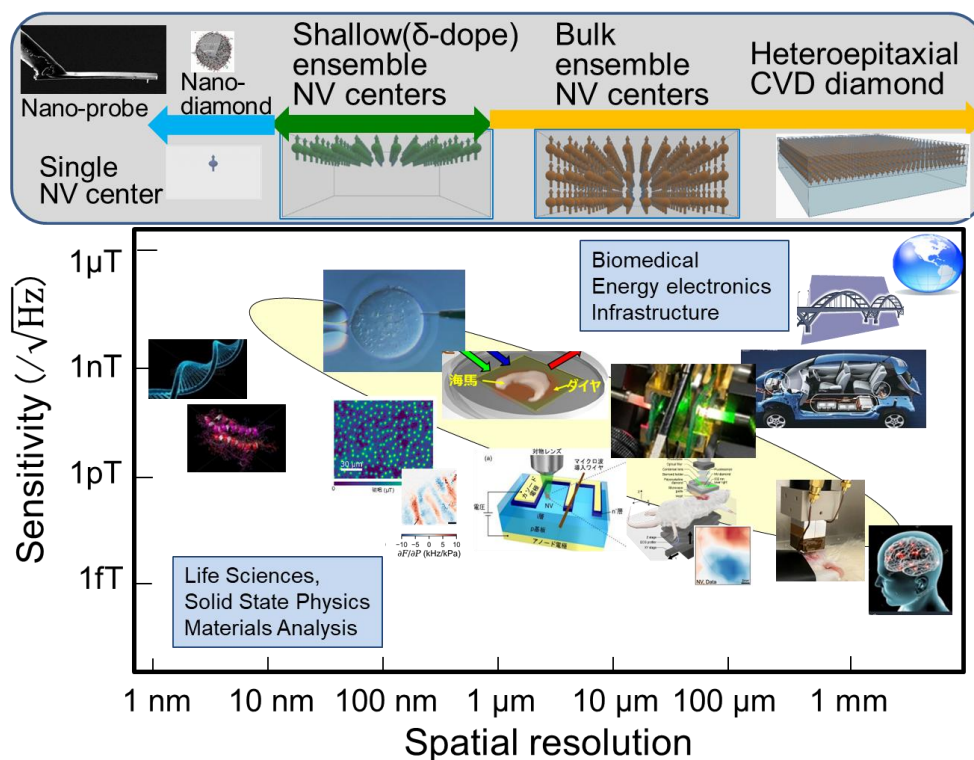


Fig.1 Scalable Applications on Diamond Quantum Sensors

窒化物半導体系光デバイスの最新動向

Recent Progress of Lasers in Nitride-Based Semiconductors

日亜化学工業株式会社 向井 孝志

Nichia Corporation, Takashi Mukai

E-mail: takashi.mukai@nichia.co.jp

1993年に青色LEDが実用化されて以来、Blu-ray用の青紫色レーザーの実現に向けてGaN系半導体レーザーの研究が盛んに行われていた。1995年にGaN系半導体のレーザーダイオードによる電流注入レーザー発振が報告された。当初は、寿命が数秒程度で、出力も数mW程度であった。GaN基板の実現やエピ構造およびデバイスプロセスの進展に伴い、出力と寿命がともに改善され、Blu-ray™の光源として実用化された。

その後、レーザーの研究開発は青紫色から青色、緑色といった可視光の領域へと移っていった。488nm LDを用いたフローサイトメーター用光源や、青および緑色W級LD光源を用いたプロジェクター、青色と蛍光体を組み合わせた高輝度白色光源を用いたレーザーヘッドライトなどが製品化され、これらは現在すでに大きな市場を形成している。可視光半導体レーザー光源と相性の良いHUD、ウェアラブルディスプレイ、加工用特殊照明などのアプリケーション開発が進んでおり、レーザー市場のさらなる拡大が期待されている。

近年では、上記の端面発光型だけでなく面発光型のレーザーダイオードの研究も盛んに行われている。面発光型のレーザーダイオードには主に2種類ある。一つは東京工業大学の伊賀教授によって発明されたVertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)であり、もう一つは京都大学の野田教授によって発明されたPhotonic Crystal Surface Emitting Laser (PCSEL)である。我々は、現在、GaN系半導体によるVCSELおよびPCSELの研究開発に取り組んでいる。VCSELは主にVR/ARなどの小型で低出力の分野、PCSELは加工用途のような大出力レーザーの分野での応用が期待されている。いずれのレーザーも、縦横シングルの高品質なレーザー光の生成が可能であり、GaN系半導体レーザーダイオードの新たな分野への応用が広がるものと期待される。

当日の発表では、端面発光レーザーの開発の歴史について紹介した後、面発光レーザー(VCSEL、PCSEL)に関する我々の最近の研究成果について報告する予定である。

脱炭素社会実現に貢献する SiC 半導体の現在と将来

Progress and Future Perspective of SiC Semiconductor toward the Decarbonized Society

京大工, °木本 恒暢, 金子 光顕

Kyoto Univ., °Tsunenobu Kimoto and Mitsuaki Kaneko

E-mail: kimoto@kuee.kyoto-u.ac.jp

【はじめに】近年の SiC 半導体の結晶およびデバイス技術の進展により, SiC パワーデバイス (MOSFET, ショットキー障壁ダイオード) の実用化が急速に進展し, 各種機器で顕著な省エネ効果が示されている. SiC パワー半導体産業が急激に拡大する一方で, 依然として学術的に重要な課題が山積している. また, SiC 半導体をパワー半導体以外の応用に適用するための基礎研究も活況を呈している. 本講演では, SiC パワーデバイスの進展を概説した後, SiC 半導体の将来展望と課題について述べる.

【SiC 結晶の研究開発】土台となる SiC ウェハは大口径化と高品質化が進み, 200 mm 径の単結晶 SiC(0001)ウェハが広く市販されるようになった. この数年で転位欠陥が大幅に低減され, 200 mm 径ウェハにおいて貫通転位密度の合計が 800 cm^{-2} 以下, 基底面転位密度が 200 cm^{-2} 以下のウェハが標準品として入手できる. また, ガス法が著しい進展を遂げ, 高品質インゴットを高速で成長できることが報告された. ウェハ加工のスループット向上が課題として残っている. エピタキシャル成長についても長足の進歩があり, 成長プロセスの改善やウェハ加工品質の向上により, デバイスの初期不良を引き起こすキラ欠陥密度は標準品でも 1 cm^{-2} を十分下回っており, 100 A 級のデバイスを良好な歩留まりで製造できるようになった. 今後, 6.5~15 kV 級デバイスを 200 mm 径ウェハで製造する際, 低濃度ドーパ厚膜エピウェハの応力制御が課題になると予測される.

【SiC パワーデバイスの研究開発】600~3,300 V 級の SiC パワー MOSFET とショットキー障壁ダイオードの本格的実用化が進んだ. しかしながら SiC パワー MOSFET に関しては, 性能と信頼性の両面で課題が多い. 例えば, 市場の大きい 600~1,200 V 級 MOSFET では, 依然としてチャネル抵抗の影響が大きく, SiC 本来のポテンシャルを発揮できていない. ゲート酸化膜と SiC の界面近傍に存在する高密度の欠陥については, 実験および理論計算により精力的な研究が継続されているものの, ミクロな欠陥構造の同定には至っていない. 近年 SiC の熱酸化によって界面だけでなく SiC バルク側(界面の極近傍)にも高密度欠陥が生成することが示された. これを解決する一つの手法は酸化抑制プロセスであり, 界面欠陥密度の低減と移動度向上が達成されている. また, 反転層中の電子移動度を制限する最大の要因が界面の固定電荷であることが示唆され, この影響を低減するためにフィン FET が提案されて顕著な移動度の向上が達成された. また, ドリフト抵抗をさらに低減するために, SiC においても超接合構造の形成が試みられ, 超高性能パワー MOSFET が報告されている. 一方, 信頼性に関しては, バイポーラ劣化, 負バイアス印加時のしきい値電圧変動, および短絡耐量が課題となり, 様々な改善策が検討されている. バイポーラ劣化に関しては, 積層欠陥拡大の臨界条件が示され, 基底面転位の大幅な低減とドリフト層直下に再結合促進層を導入することにより大幅な改善が達成された. 最近はプロトン照射によるバイポーラ劣化抑制も報告されている. 負バイアス印加時のしきい値電圧変動と短絡耐量に関しては徐々に改善されているが, 抜本的な解決策は提示されていない. また, 超高耐压デバイスで魅力的な SiC IGBT に関しては, 20~27 kV 級の素子が実証されたものの, 厚膜エピタキシャル成長層の欠陥制御やキャリア寿命, デバイス構造の設計など取り組むべき課題が多い.

【SiC の新規応用】SiC パワーデバイス技術が大きく進展したので, 近年は電力用途以外の分野に適用する動きが活発化している. その代表例が Si では原理的に安定動作や素子寿命に大きな制限がある高温動作集積回路や耐放射線集積回路である. SiC JFET, CMOS を用いた基本回路が 500°C を越える温度での動作が実証されているものの, 電極を含めた信頼性に関する研究はまだ限定的である. 一方, 耐放射線特性については Si 素子に対する明確な優位性が示され, 原子力発電所や宇宙での利用が期待されている. さらに, SiC 結晶中の特定の点欠陥(Si 空孔など)が特異な量子的発光(単一光子源)を示すことが明らかになり, これを活用した高感度磁気センサや量子通信への応用が期待されている.

本研究に貢献いただいた歴代の研究室メンバーの方々, および共同研究者の皆様に感謝いたします.

SiC 半導体信頼性確保のための欠陥エンジニアリング

Defect Engineering for Ensuring Reliability of SiC Semiconductors

名工大¹, 名大², 住重アテックス³ °加藤 正史¹, 原田 俊太², 坂根 仁³

NITech¹, Nagoya Univ.², SHI-ATEX Co., Ltd.³, °Masashi Kato¹, Shunta Harada², Hitoshi Sakane³

E-mail: kato.masashi@nitech.ac.jp

シリコンカーバイド(SiC)の結晶は、新幹線車両の省エネルギー化や電気自動車の航続距離向上などを導く半導体素子となる、比較的新しい材料である。ただし結晶とはいっても、SiC の場合は完全な結晶を得ることは難しく、部分的に原子の整列がずれた転位や積層欠陥という欠陥を含むものが使われている。一方でこの転位や積層欠陥が、半導体としての動作に悪影響を及ぼす。特に積層欠陥は SiC 半導体動作中に徐々に拡張して、累積的な性能劣化を引き起こす。そのため SiC 半導体は、例えば自動車によく言われるような 10 年 10 万キロというような、長期間動作を保証する信頼性確立が困難であった。ゆえにこれまでの SiC 半導体の技術開発において、この積層欠陥の拡張を防ぐための取り組みが長い間なされてきた。

我々は高エネルギーイオン注入という技術により、SiC 結晶に水素などのイオンをぶつけ、点欠陥という転位や積層欠陥よりも小さい原子サイズの欠陥を導入してきた。そして近年、この点欠陥の存在が積層欠陥の拡張を抑制することを見出した。Fig. 1 に一例としてイオン注入されていないものと、ヘリウムイオンが注入された SiC ダイオードの信頼性試験後のエレクトロルミネッセンス像を示す¹⁾。この像で暗い領域が拡張した積層欠陥 (Expanded 1SSFs) に該当するが、Fig. 1(a)のイオン注入されていないものからは積層欠陥が複数観測される一方、Fig. 1(b)のイオン注入されたものからは観測されない。またイオン注入後の熱処理などにより、導入される点欠陥の密度を制御することで、イオン注入は SiC 半導体の動作にも悪影響を与えないことも見出した。これらの結果は、高エネルギーイオン注入は SiC 半導体の性能を保ちながら、積層欠陥の拡張を抑え、長期間の信頼性を確保できることを示している。この技術は、小さな点欠陥の導入がより大きな欠陥である積層欠陥を抑制するという、新たな欠陥エンジニアリング技術とも言え、今後の SiC 半導体の低コスト化とそれに伴う普及、社会の省エネルギー化につながるものだと考えている。

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (事業番号 JPNP20004) の補助を受けた。

1) T. Li et al., Appl. Phys. Express **17**, 086503 (2024).

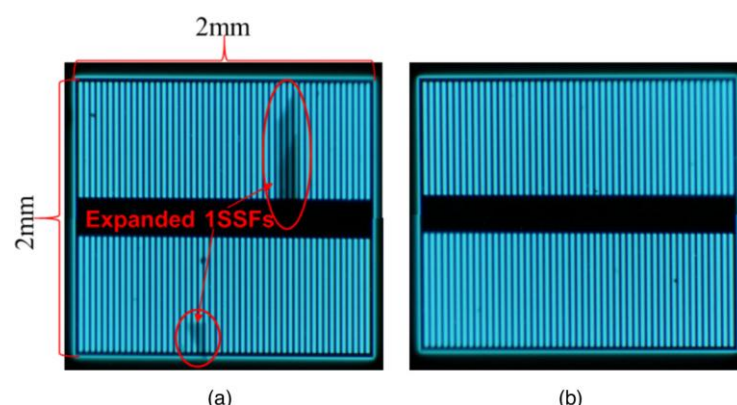


Fig. 1. Electroluminescence images for from SiC diodes (a) without He ion implantation, and (b) with He ion implantation after a reliability test. The dark regions in (a) indicate stacking faults (1SSFs) expanded by the reliability test.¹⁾

酸化ガリウムデバイスの現状と可能性

Current Status and Potential of Gallium Oxide Devices

大阪公立大院工¹, 情通機構² ○東脇 正高^{1,2}

Osaka Metropolitan Univ.¹, NICT² ○Masataka Higashiwaki^{1,2}

E-mail: higashiwaki@omu.ac.jp

酸化ガリウム (Ga_2O_3) デバイスは、その 4.5 eV 以上と非常に大きなバンドギャップに基づく物性から、Si デバイスは元より、代表的なワイドバンドギャップ半導体である SiC, GaN デバイスをも上回るデバイス性能（高耐圧、低損失、高い環境耐性など）を達成しうるポテンシャルを有する。また、融液成長バルクから大型高品質ウェハを製造可能であることもコスト面での強みである。ただ、半導体材料としての Ga_2O_3 研究は 70 年を超える長い歴史があるにも関わらず、その存在自体が半導体デバイス研究者や技術者から長く注目されてこなかったため、 Ga_2O_3 デバイスは SiC, GaN デバイスに遅れをとっている。しかしながら、世界的な研究開発の盛り上がりにより、この 10 年で Ga_2O_3 デバイス開発は急速に進展してきた。

現状 Ga_2O_3 トランジスタ、ダイオード開発は、主にパワースイッチング用途での実用を目指して実施されている。 Ga_2O_3 基盤要素技術のいくつかは既に確立され、企業への技術移転、そして移転した技術を元にした製品化・実用化に向けたデバイス本格開発に移っていく段階にある。しかしながら、現状は依然として大学や国立研究機関といった学術機関による研究開発が世界的にも主流であり、学術界の活発な状況とは裏腹に、企業における実用化・産業化に向けた本格的な開発はまだ始まっていない。

本シンポジウム講演では、 Ga_2O_3 基礎物性、結晶成長技術、デバイス研究開発に関する過去および最新の成果を紹介する [1]。合わせて、 Ga_2O_3 デバイスに関する国内外の動向についても言及する。

本講演で紹介する研究成果の一部は、総務省 ICT 重点技術の研究開発プロジェクト (JPMI00316) 「次世代省エネ型デバイス関連技術の開発・実証事業（第一期、第二期）（環境省連携事業）」の委託を受け実施したものである。

[1] M. Higashiwaki, IEEE Electron Devices Magazine **2**, 42 (2024).

電動車用 SiC パワー半導体の開発動向とカーボンニュートラル Trends of SiC Power Semiconductor for Electric Vehicles and Carbon Neutrality

(株) ミライズテクノロジーズ °金村 高司

MIRISE Technologies Corporation, °Takashi Kanemura

E-mail: takashi.kanemura.j4y@mirise-techs.com

【要旨】

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、自動車の電動化に対する要望は強く、BEV（電気自動車）、PHEV（プラグインハイブリッド電気自動車）、FCEV（燃料電池自動車）などの電動車の普及が急速に進んでいる。これら電動車の駆動システムは、主にモータ、インバータ、電池から構成されており、その高効率化は、電費、燃費向上に直結する重要な開発項目である。例えば、インバータにおいては、これまで Si パワー半導体がいわれてきたが、より低損失な動作が可能な SiC パワー半導体の適用が期待され、既に一部の電動車で使われ始めている^{[1] [2]}。今後、SiC パワー半導体は、車載分野を中心に年平均 20%を超える成長率で市場拡大すると予測されている^[3]、残された最大の課題は低コスト化である。SiC 素子コストの半分程度をウエハコストが占めており、歩留まりも低い^[4]ことから、低コスト化には、低コストかつ高品質なウエハ製造技術が不可欠であり、また素子性能向上によるチップサイズ低減も有効である。

講演では、自社における SiC パワー半導体の開発事例、特に、低コスト・高品質なウエハ製造技術である SiC ガス成長法^[5]を中心に、素子性能向上の取り組みなどをカーボンニュートラルの観点も絡めて紹介する。

参考文献

- [1] <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/5725437>
- [2] <https://www.denso.com/jp/ja/news/newsroom/2020/20201210-01/>
- [3] Power SiC 2025-Markets and Applications, Yole Group, May 2025
- [4] Report by SystemPlus Consulting, The Applied Power Electronics Conference(APEC2021)
- [5] T. Okamoto et al., “Development of 150-mm 4H-SiC Substrates Using a High-Temperature Chemical Vapor Deposition Method”, ICSCRM2019, Vol.1004, p.14-19, to be published in Mater. Sci. Forum in 2020.