

開発項目 「SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)／次世代パワーエレクトロニクス／将来のパワーエレクトロニクスを支える基盤研究開発／酸化ガリウムパワーデバイス基盤技術の研究開発」平成26年度～平成28年度のうち平成26年度分中間年報

委託先名 独立行政法人情報通信研究機構、株式会社タムラ製作所、国立大学法人東京農工大学、新日本無線株式会社、株式会社シルバコ・ジャパン

## 1. 研究開発の内容及び成果等

### 実施項目① 単結晶 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ バルク・基板製造および供給(担当:タムラ製作所)

単結晶  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板を高品質化するための技術開発として、変質層が入らない加工技術、もしくは変質層除去技術の開発が求められる。その最初のステップとして、加工変質層を X 線反射トポグラフィーにより調査した。用いた基板は 2 インチ  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  (201)基板である。基板全面に CMP を施した後、半分に劈開し、片方の基板には更に深さ 10  $\mu\text{m}$  程度ドライエッチングを施した。図 1(a)に示すように、CMP 面では、ランダムもしくはオリフラに平行に走る線状のコントラストが見られた。一方、図 1(b)に示すドライエッチングを施した基板表面にはそのような模様が見られなかった。これらの結果から、X 線反射トポグラフィーは加工変質層の評価手法として有効であることを確認すると同時に、ドライエッチング処理が加工変質層除去に効果があることが分かった。今後、加工変質層の定量化の評価手法の確立と、変質層が入らない加工技術および変質層除去技術の開発を進める。

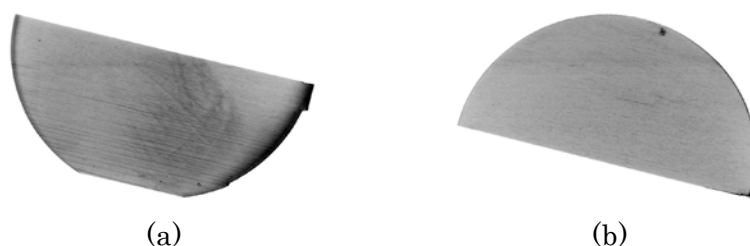


図 1  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板の X 線反射トポグラフィー像：(a) CMP 面、(b) CMP+ドライエッチング面

### 実施項目② $\text{Ga}_2\text{O}_3$ エピタキシャル薄膜成長の研究開発

#### 実施項目②-1 ハライド気相成長(HVPE)法薄膜成長の研究開発(担当:東京農工大、タムラ製作所)

HVPE 法による  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  成長の熱力学解析により、最適な気相分子種が一塩化ガリウム( $\text{GaCl}$ )分子と酸素( $\text{O}_2$ )分子であるとの知見が得られたことを受け[1: SIP 採択前に実施]、 $\text{GaCl}$  および  $\text{O}_2$  を原料ガス、高純度窒素( $\text{N}_2$ : 露点-110°C)をキャリアガスとする HVPE 成長炉を構築・稼働させた(図2)。高純度  $\text{GaCl}$  は、成長炉の上流域(原料部)で高純度ガリウム( $\text{Ga}$ )金属と塩素( $\text{Cl}_2$ )ガスとの反応で生成した。 $\text{Ga}$  金属と反応させる含ハロゲン分子として、塩化水素( $\text{HCl}$ )ではなく、 $\text{Cl}_2$  を用いることで非水素( $\text{H}_2$ )系成長を可能とした。これは、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が  $\text{H}_2$  と 350°C 程度の低温から反応し、分解することを回避するためである[2:SIP 採択前に実施]。以上の事前研究成果を元に、本年度バルク  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$  基板上で、成長パラメータと成長層の膜質の相関を調査し、厚さ 10  $\mu\text{m}$ 、残留電子濃度  $n=1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  未満の  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  膜の HVPE 高速成長技術の開発に取り組んだ。

最初に、 $\text{GaCl}$  供給分圧に対し  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  膜の成長速度がリニアに増加し、成長速度 5  $\mu\text{m/h}$  以上の高速成長が可能であることを確認した(図3参照:VI/III は気相中に供給した O 原子と Ga 原子の比)。次に成長温度 900°C 以上では、用いたバルク基板と同等の結晶構造品質が保たれることを確認し、さらに不純物 SIMS プロファイル測定(図4:成長温度 1000°C)より、ホモエピタキシャル層中では炭素(C)、水素(H)、スズ(Sn)、ケイ素(Si)等の不純物濃度が、測定装置のバックグラウンド濃度未満となっており、高純度層が得られることを確認した[3]

。続いて、電気的特性評価のためにアンドープホモエピタキシャル  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  層 (成長温度  $1000^\circ\text{C}$ , 膜厚  $12\ \mu\text{m}$ ) 表面に白金/チタン/金 (Pt/Ti/Au) ショットキー電極、バルク基板裏面に Ti/Au オーミック電極を形成することでショットキーバリアダイオードを作製した。そして、その電流-電圧 ( $I$ - $V$ )、容量-電圧 ( $C$ - $V$ ) 特性解析より、HVPE 成長層の残留電子濃度は  $n < 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$  となっていることが確認され [3]、H26 年度のマイルストーンを達成した。

H26 年度の残り期間、H27 年度のマイルストーン (キャリア濃度  $n < 1 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$  の精密制御  $n$  形  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  ホモエピタキシャル成長層の実現) に向け、研究計画を前倒しにして、成長炉に Si ドナー不純物ガスの供給ラインを付加し、意図的な Si ドーピングを可能とした。鉄 (Fe) ドープの半絶縁性バルク  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  (001) 基板上に、 $1000^\circ\text{C}$  にて  $\text{GaCl}$  供給分圧 ( $P_{\text{GaCl}}^0$ ) を  $1 \times 10^{-3}\ \text{atm}$  に固定し、四塩化珪素 ( $\text{SiCl}_4$ ) ガスの供給分圧 ( $P_{\text{SiCl}_4}^0$ ) を変化させて膜厚  $10\ \mu\text{m}$  の Si ドープホモエピタキシャル成長層を得た。成長膜の SIMS プロファイル測定より膜中の Si 濃度 [Si]、ホール測定によりキャリア濃度  $n$  の解析を行った。図5は、横軸に Si 供給比  $R_{\text{Si}} = P_{\text{SiCl}_4}^0 / (P_{\text{GaCl}}^0 + P_{\text{SiCl}_4}^0)$  を取り、縦軸に [Si] および  $n$  をプロットしている。Si 濃度とほぼ同じキャリア濃度が得られること、また Si 濃度およびキャリア濃度が  $R_{\text{Si}}$  に対してリニアに変化することが分かる。以上の結果から、Si 濃度およびキャリア濃度の精密制御に成功し、キャリア濃度  $n = 1 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$  未満の  $n$  形  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  ホモエピタキシャル成長が可能であることが確認された。

[1] K. Nomura *et al.*, *J. Cryst. Growth* **405**, 19 (2014), [2] R. Togashi *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 041102 (2015), [3] H. Murakami *et al.*, *Appl. Phys. Express* **8**, 015503 (2015).

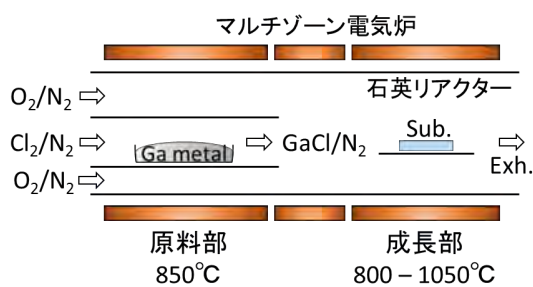


図2 HVPE 成長炉構造概略

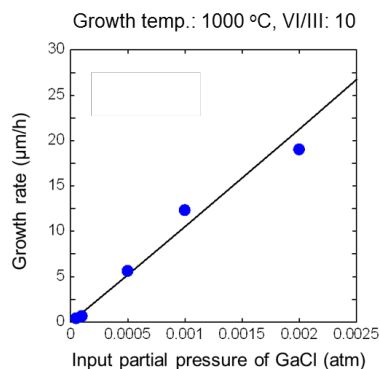


図3  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  成長速度の  $\text{GaCl}$  供給分圧依存性

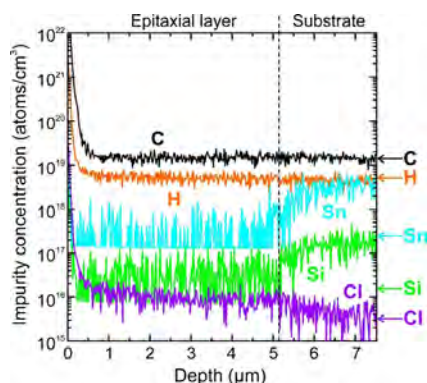


図4 SIMS 不純物プロファイル (矢印はバックグラウンドによる測定下限濃度を示す。)

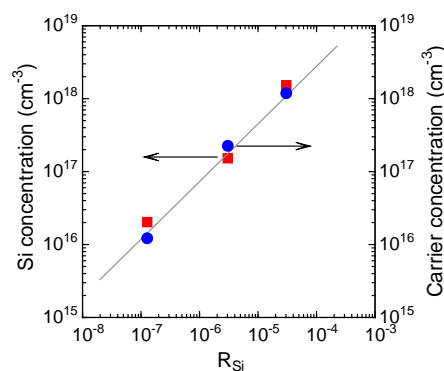


図5 Si ドープ  $n$  形  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  層の Si 不純物濃度およびキャリア濃度の  $R_{\text{Si}}$  依存性

## 実施項目②-2 分子線エピタキシー (MBE) 薄膜成長の研究開発 (担当:タムラ製作所、NICT)

タムラ製作所保有の MBE 装置により成長したエピ基板を、以下項目③-1 のノーマリーオン  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  トランジスタプロセス開発に供給している。また、予定通り NICT に H26 年度プラズマ/オゾン両用 MBE 装置が新規導入された。H27 年度前半に装置立ち上げ後、プラズマ/オゾン両酸素源を用いた場合の成膜条件最適化を行う。

### 実施項目②-3 *p*-アモルファス酸化物半導体/*n*-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 接合構造の研究開発(担当:タムラ製作所、情報通信研究機構)

材料選定および開発目標明確化のため、*p*型酸化物半導体の電気的特性に関する過去の報告を調査した。酸化物半導体で*p*型導電性を示すものとして、CuO, Cu<sub>2</sub>O, SnO, NiOなどが知られている。CuO, Cu<sub>2</sub>Oについては低抵抗の膜は得られておらず、RFスパッタ膜の抵抗率は数kΩcm程度である[4,5]。一方、NiO, SnOは、電子線蒸着やスパッタ膜において1 Ωcm未満の値が報告されている[6,7]。よって、NiOおよびSnOを選択し、H27年度より*n*-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基板上の成膜実験、特性評価を行っていく。

[4] S.-Y. Sung *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97**, 222109 (2010), [5] E. Fortunato *et al.*, Appl. Phys. Lett. **96**, 192102 (2010), [6] W. Guo *et al.*, Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 042113, [7] H. L. Chen *et al.*, Thin Solid Films **516**, 5590 (2008).

### 実施項目③ Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> デバイスプロセスの研究開発

#### 実施項目③-1 ノーマリーオン Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> トランジスタの研究開発(担当:情報通信研究機構、新日本無線、シルバコ・ジャパン)

H26年度課題であるフィールドプレート付き横型 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFET を作製するにあたり、Fe ドープ半絶縁 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板からの Fe 原子のチャンネル層への拡散が問題となることが判明した。また、この Fe 拡散は、Si イオン注入プロセスの一つである活性化アニールにおいて、イオン注入時に膜中に生じるダメージが一要因となっていることも分かっている。この問題は、Fe ドープ基板上に直接チャンネル層を形成するのではなく、図 6(c)に示すように、0.7 μm 程度以上の膜厚を有するアンドープ Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層を Si イオン注入領域と基板との間に挿入することで、注入プロセス時に生じる結晶ダメージが基板まで到達することを防ぐことができ、結果 Fe 拡散問題も解決できることが分かった[8]。

上述の Fe 拡散の問題の他に、当初の予想より Si イオン注入および活性化アニール条件の最適化に時間が必要であった。その結果、フィールドプレート付き横型 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFET の試作に関して、計画より進捗が少し遅れており、H26 年度中のマイルストーンとしたデバイス試作および特性評価は達成できなかった。しかし、遅れは1~2ヶ月程度であり、H27 年 4~5 月中に一次試作、特性評価を行う予定である。

また、H27 年度に作製予定の縦型ノーマリーオン Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFET の最適なデバイス構造を、T-CAD シミュレーションから検討した。実際の作業としては、ドリフト層の *n* 型不純物濃度と厚みに関する 4 つの組合せ条件と、ゲート下の開口径を 2 μm から 10 μm まで 1 μm 刻みの 9 条件、計 36 条件に対して  $I_d$ - $V_g$ ,  $I_d$ - $V_d$  計算を行い、 $V_{th}$ ,  $R_{on}$ 、温度分布、電界分布の開口径依存性を導出した。

[8] M. H. Wong. *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 032105 (2015).

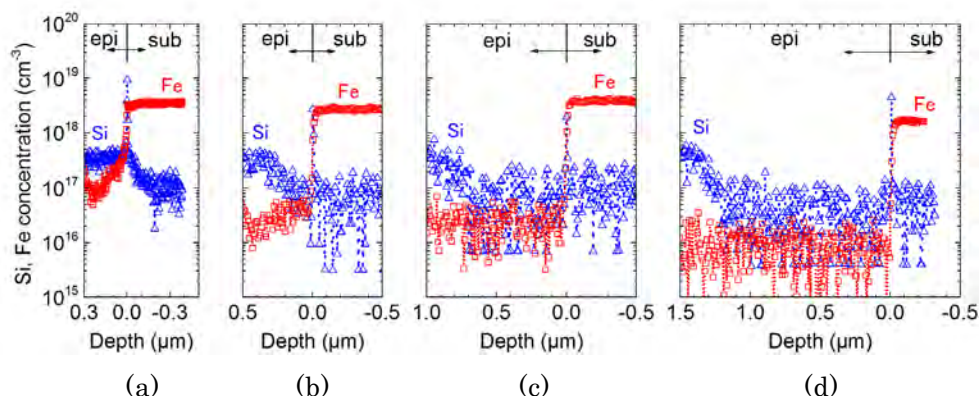


図 6 MBE 成長した Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜中の Fe および Si 原子の SIMS プロファイル:  
(a) Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.3 μm 厚、(b) 0.5 μm 厚、(c) 1.0 μm 厚、(d) 1.5 μm 厚

**実施項目③-2 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ショットキーバリアダイオード (SBD) の研究開発(担当:情報通信研究機構、新日本無線、シルバコ・ジャパン)**

上述②-1にて開発した、*m*<sup>+</sup>-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (001)基板上に厚さ 10 μm 程度の Siドープ Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜を HVPE 成長したエピ基板を用いて SBD を試作し、その特性を評価した。HVPE 成長後、エピ薄膜の表面平坦化のため、CMPプロセスにより 3 μm 程度削っている。結果、トータル約 7 μm の Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ドリフト層となる。デバイスプロセスとしては、基板裏面全面に Ti/Au オーミックカソード電極を、HVPE エピ膜表面には直径 200 および 400 μm の Pt/Ti/Au ショットキーアノード電極をそれぞれ作製した。表面保護絶縁膜のデポは施していない。

図 7(a)-(c)に、有効ドナー濃度 ( $N_d - N_a$ ) がそれぞれ  $1.4 \times 10^{16}$  および  $2.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  の SBD の順方向、逆方向電流密度—電圧 ( $J$ - $V$ ) 特性を示す。図 7(a)に示すように、 $J=100 \sim 200 \text{ A/cm}^2$ における  $J$ - $V$ プロットの傾きから、オン抵抗はそれぞれ  $3.0 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ ,  $2.4 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ と見積もられる。また、図 7(b)の  $J$ - $V$ ログプロットの傾きから、理想係数  $n$  は  $1.02 \pm 0.01$  と、ダイオード理想値 1 に非常に近い優れた値を示した。H27 年度マイルストーンに設定した Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBD 逆方向耐圧は、目標値 500 V を上回る値が得られている[図 7(c)]。

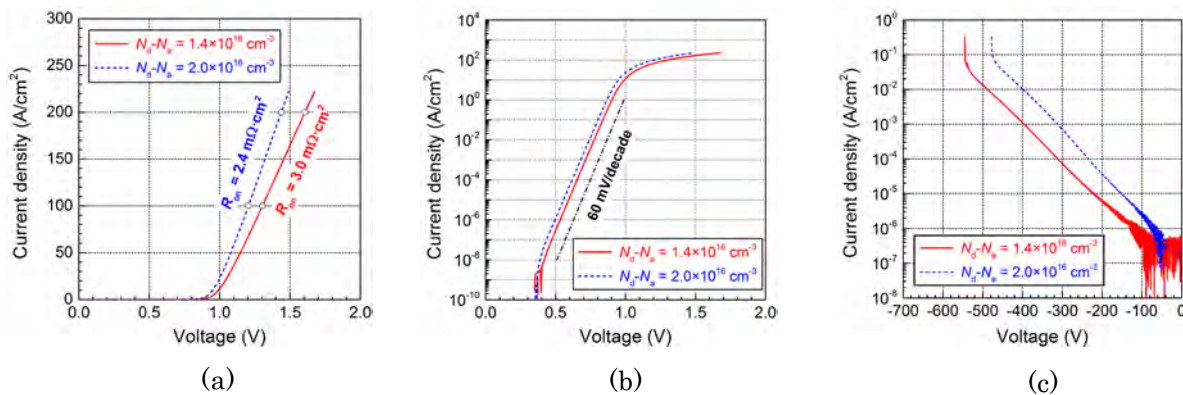


図 7 HVPE 成長した *n*-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ドリフト層を有する Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBD の  $J$ - $V$ 特性: (a) 順方向特性(リニアスケール)、(b) 順方向特性(ログスケール)、(c) 逆方向特性(ログスケール)

**実施項目③-3 ノーマリーオフ Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> トランジスタの研究開発(担当: 情報通信研究機構、新日本無線、シルバコ・ジャパン)**

ノーマリーオフ Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> トランジスタを開発するために必要となる、絶縁膜堆積技術の開発を行った。これまで用いてきた Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜では、伝導帯バンドオフセットが約 1.5 eV と、高温動作を考えた場合若干物足りない値であった。そのため、新しい絶縁膜として Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> よりも更に大きなバンドギャップを有する SiO<sub>2</sub> を Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板上に堆積し、X 線光電子分光によりそのバンドアライメントを評価した。図 8 に示すように、SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 界面では 3 eV 以上の伝導帯オフセットが形成されることが分かった。このオフセット値は、高温動作においても問題の無い大きさである。そのため、SiO<sub>2</sub> をゲート絶縁膜の最有力候補と定め、引き続き成膜手法の最適化を行っていく。

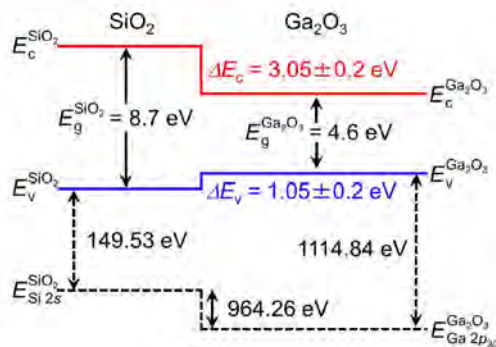


図 8 SiO<sub>2</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ヘテロ構造のエネルギーバンドアライメント

## 2. 成果(当該年度分についてのみ記載)

### (1) 研究発表・講演(口頭発表も含む)

#### 学術論文

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
H26.12.11	Applied Physics Express vol. 8, pp. 015503 (2015)	Homoeptaxial growth of $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> layers by halide vapor phase epitaxy	H. Murakami, K. Nomura, K. Goto, K. Sasaki, K. Kawara, Q. T. Thieu, R. Togashi, Y. Kumagai, M. Higashiwaki, A. Kuramata, S. Yamakoshi, B. Monemar, and A. Koukitu
H27.01.23	Applied Physics Letters vol. 106, pp. 032105 (2015)	Anomalous Fe diffusion in Si-ion-implanted $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and its suppression in Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> transistor structures through highly resistive buffer layers	M. H. Wong, K. Sasaki, A. Kuramata, S. Yamakoshi, and M. Higashiwaki

#### 国際学会発表

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
H26.11.04	The 2014 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2014)	Gallium oxide (Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) devices for next generation applications (招待講演)	M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Kamimura, M. H. Wong, D. Krishnamurthy, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi
H26.12.01	2014 MRS Fall Meeting & Exhibit	Homo-Epitaxial Growth of High-Purity Films of $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and ZnO by Halide Vapor Phase Epitaxy (招待講演)	Y. Kumagai, R. Togashi, H. Murakami, and A. Koukitu
H26.12.01	2014 MRS Fall Meeting & Exhibit	Halide Vapor Phase Epitaxy of $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Films on (001) $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Substrate	H. Murakami, K. Nomura, K. Goto, K. Kawara, R. Togashi, Y. Kumagai, A. Kuramata, S. Yamakoshi, and A. Koukitu
H26.12.01	2014 MRS Fall Meeting & Exhibit	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> homoeptaxial growth on single-crystal $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> substrates by molecular beam epitaxy (招待講演)	K. Sasaki, M. Higashiwaki, A. Kuramata, and S. Yamakoshi
H27.01.18	The 42nd Conference on the Physics and Chemistry of Surfaces and Interfaces (PCSI-42)	Band alignment of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> heterostructures and their application to field-effect transistors (招待講演)	M. Higashiwaki, T. Kamimura, K. Sasaki, M. H. Wong, A. Kuramata, and S. Yamakoshi
H27.01.27	The 39th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites (ICACC 2015)	Homoeptaxial growth on single-crystal $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> substrates by molecular beam epitaxy (招待講演)	K. Sasaki, M. Higashiwaki, A. Kuramata, and S. Yamakoshi
H27.02.16	The 51st Workshop	Current status and	M. Higashiwaki, K. Sasaki, K.

	on Compound Semiconductor Materials & Devices (WOCSEMMAD 2015)	prospects on R&D of gallium oxide power devices (招待講演)	Goto, A. Kuramata, S. Yamakoshi, K. Nomura, Q. T. Thieu, R. Togashi, H. Murakami, Y. Kumagai, B. Monemar, A. Koukitu
--	--	--	--

## 国内学会発表

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
H27.01.14	平成26年度第3回大阪大学ナノ理工学情報交流会「シリコンを越えるナノエレクトロニクス関連材料とデバイス」	酸化ガリウムパワーデバイス研究開発の現状と今後の展開 (招待講演)	東脇 正高
H27.01.15	オートモーティブワールド2015 専門技術セミナー「高効率を追求するSiC/GaN インバータ最前線 (Auto-3)」	世代ワイドバンドギャップ半導体酸化ガリウムパワーデバイス:現状と挑戦 (依頼講演)	東脇 正高
H27.03.04	電気学会電子デバイス研究会「次世代化合物電子デバイスとその応用」	酸化ガリウムパワーデバイス研究開発の現状と課題 (招待講演)	東脇 正高、佐々木 公平、Man Hoi Wong、上村 崇史、倉又 朗人、山腰 茂伸
H27.03.11	第62回応用物理学会春季学術講演会	( $\bar{2}01$ ), (010) $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 上における結晶化 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 層の面方位依存性	上村 崇史、ダイワシガマニ キルシナムルティ、倉又 朗人、山腰 茂伸、東脇 正高
H27.03.11	第62回応用物理学会春季学術講演会	(010) $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 上 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 結晶化層厚と界面準位密度の相関	上村 崇史、ダイワシガマニ キルシナムルティ、倉又 朗人、山腰 茂伸、東脇 正高
H27.03.11	第62回応用物理学会春季学術講演会	Planar device isolation for $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ field effect transistors	Man Hoi Wong、佐々木 公平、倉又 朗人、山腰 茂伸、東脇 正高
H27.03.13	第62回応用物理学会春季学術講演会	ハライド気相成長法による $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板上ホモエピタキシャル成長	野村 一城、後藤 健、佐々木 公平、河原 克明、ティユ クエン トウ、富樫 理恵、村上 尚、熊谷 義直、東脇 正高、倉又 朗人、山腰 茂伸

## (2) 特許等

### 出願済特許等リスト

出願日	受付番号	出願に係る特許等の標題	出願人
H27.02.25	特願2015-035893	半導体積層構造体及びその製造方法、並びに半導体素子及びその製造方法	情報通信研究機構、タムラ製作所
H27.02.25	特願2015-035894	半導体積層構造体及びその製造方法、並びに半導体素子及びその製造方法	情報通信研究機構、タムラ製作所
H27.03.20	特願2015-058518	結晶積層構造体	タムラ製作所、東京農工大学
H27.03.20	特願2015-058519	高耐圧ショットキーバリアダイオード	タムラ製作所、情報通信研究機構、東京農工大学

**(3) 受賞実績**

東協 正高

第 11 回日本学術振興会賞

研究業績「ワイドバンドギャップ半導体トランジスタに関する先駆的研究開発」

**3. その他特記事項(当該年度分についてのみ記載)**

**(1) 成果普及の努力(プレス発表等)**

特になし

**(2) その他**

特になし

契約管理番号	14101706-0
--------	------------

備考:様式の寸法は、日本工業規格 A 列4とし、左とじとすること。

開発項目 「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）／次世代パワーエレクトロニクス  
将来のパワーエレクトロニクスを支える基盤研究開発 パワーデバイス実用化を可能とする革新  
ダイヤモンド結晶成長技術開発」平成26年度～平成27年度  
のうち平成26年度分中間年報

委託先名：（独）物質・材料研究機構、東京工業大学、（独）産業技術総合研究所、コーンズ  
テクノロジー株式会社

## [記載項目]

### 1. 研究開発の内容及び成果等

#### ① ダイヤモンド超高純度化と不純物ドーピング制御技術の研究開発（担当：物質・材料研究機構）

H26年度は、現時点での結晶純度の評価を、高純度化の指針を得る事を目的に、研究を実施した。純度の評価は、SIMSと低温CL測定により実施した。その結果、CVD成長をする際の試料ホルダ周辺にホウ素やシリコン、窒素といった不純物源が存在する場合に、それが微量であっても、ダイヤモンド結晶内にバックグラウンドとして $10^{16}\text{cm}^{-3}$ 程度で混入する事が分かった。また、反応系内の部材見直しにより、ホウ素濃度ではバックグラウンドを $10^{15}\text{cm}^{-3}$ 以下に低減する指針を得た。

また、本年度に実施した、高性能マスフローコントローラへの置き換えにより、ホウ素ドーピングの制御下限が、これまでの $10^{16}\text{cm}^{-3}$ から $10^{15}\text{cm}^{-3}$ 以下にできることを示唆する結果が得られた。また液体窒素温度から $600^{\circ}\text{C}$ まで温度可変な高感度Hall測定環境を整えた。得られるキャリア濃度のデータフィッティングから、補償不純物が極微量であっても検出可能である。

#### ② ダイヤモンド低転位結晶の研究開発（担当：物質・材料研究機構）

H26年度は、Ib基板上に合成したホモエピタキシャル薄膜のCL測定による欠陥評価を実施した。通常の研磨基板では、研磨傷に対応する欠陥発光パターンが観測された。一方で、下地基板の研磨傷を実効的に除去する合成法を適用した場合に、上記の発光パターンを消失させることができることを見出した。転位に対応する発光波長ではなくて、自由励起子発光の発光波長で欠陥イメージング（非発光領域を検出）する事により、高い空間分解能が得られることが分かった。現時点では下地基板中の欠陥像がホモエピタキシャル薄膜の欠陥像に重畳されており、判別が困難である。高品質な下地基板と高精度な下地基板研磨を用いる事で、下地基板起因の欠陥発光が抑制されるものと考えられる。

#### ③ 高純度高品質CVDダイヤモンド成長装置開発（担当：コーンズテクノロジー株式会社）

NIMSとの情報交換・協議の結果、ダイヤモンドパワーデバイス実現に必要なダイヤモンドエピ膜の純度の目標値は、エピ膜中の窒素濃度にして $10^{14}\text{cm}^{-3}$ （1ppb）以下が必要であるとの結論となった。多めに見てNの取り込み効率が0.1%程度であるとすれば、これより反応容器内の窒素/炭素比（N/C）が $10^{-5}$ 以下とする必要があり、当社製CVD装置では全ガス流



量 500 - 1000 sccm 程度で動作し、原料のメタンガス濃度を 1 %程度とすれば少なくともリークレートが  $10^{-12}$  Pa m<sup>3</sup> /sec 以下である必要があることが分かった。また、典型的なプロセス圧力が  $10^3 - 10^4$  Pa であることから、到達圧としては  $10^{-8}$  Pa 以下が必要であることが分かった。さらに、実機での現状確認、平成 27 年度での実機試験に向けて当社保有反応容器を用いて実機の製作に入っている。

④ **ダイヤモンドパワーデバイスプロセス技術の開発（担当：産業技術総合研究所）**

ダイヤモンド基板上に電子線リソグラフィと反応性イオンエッチングプロセスを高度化してメタルと酸化物の微細な積層マスクを形成することで、プレーナ構造での接合 F E T のノーマリーオフ特性に必要なサブミクロン微細加工プロセス技術（チャンネル幅 0.5μm 以下、チャンネル幅と高さのアスペクト比 8 以上）を構築した。

⑤-1 **pin 接合による材料評価（担当：産業技術総合研究所）**

(111)配向ダイヤモンド基板上に現状の合成条件で pin 接合構造（i 層の膜厚：約 3um）を形成した。その結果、+-20V の電圧印加で整流比が 6 桁から 10 桁の間で分布を持っていることを確認した。

⑤-2 **接合 FET の開発（担当：東京工業大学）**

平成 26 年度は、プレーナ構造での接合 F E T のノーマリーオフ特性の実現を目指し、産総研と共同で 0.5μm 以下の微細加工プロセスを開発した。チャンネル幅 0.26μm のデバイスを試作することができ、特性を評価中である。ゲートとなる p n 接合や界面の評価技術を構築し、リーク電流の要因を解明している。

2. 成果（当該年度分についてのみ記載）

(1) 研究発表・講演（口頭発表も含む）

（例）

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2015/3/12	62回応用物理学会 春季学術講演会	ダイヤモンドJFETのノーマリーオフ動作	諏訪泰介
2015/3/9	ダイヤモンドイノベーションクラブ 第8回研究会	半導体ダイヤモンドのパワエレ応用に関する研究（招待講演）	小泉 聡
2015/2/26	第20回ハッセルト ダイヤモンド研究会（ベルギー）	Normally-off operation of diamond junction FETs	諏訪泰介
2015/2/25	第20回ハッセルト ダイヤモンド研究会（ベルギー）	Homoepitaxial phosphorus-doped diamond films on {111} substrates with different cut-off angles	小泉 聡
2015/2/25	第20回ハッセルト	High purity homoepitaxial	寺地 徳之

	ダイヤモンド研究会 (ベルギー)	diamond growth by chemical vapor deposition for high-performance electronic devices (招待講演)	
2014/12/1	MRS Fall Meeting	High Voltage Characteristics and Interface Analysis of Diamond Lateral p-n Junction Devices	岩崎孝之
2014/12/1	MRS Fall Meeting	Isotopically-Engineered High Purity Diamond Film Growth	寺地徳之
2014/11/19	第28回ダイヤモンドシンポジウム	ホモエピタキシャルダイヤモンド薄膜成長における欠陥抑制	寺地徳之

(2) 特許等

出願日	受付番号	出願に係る特許等の標題	出願人

(3) 受賞実績

3. その他特記事項 (当該年度分についてのみ記載)

(1) 成果普及の努力 (プレス発表等)

(2) その他

契約管理番号	1 4 1 0 1 7 1 1 - 0
	1 4 1 0 1 7 1 2 - 0
	1 4 1 0 1 7 1 3 - 0
	1 4 1 0 1 7 1 4 - 0