

【配 布 先】文部科学記者会、科学記者会、府中市政記者クラブ、重工業記者クラブ、
奈良県文化教育記者クラブ、大阪・科学大学記者クラブ、総務省記者クラブ、
テレコム記者会



NEWS RELEASE

報道関係者 各位

2025 年 5 月 20 日

国立大学法人 東京農工大学

大陽日酸株式会社

国立大学法人 奈良国立大学機構 奈良女子大学

学校法人 工学院大学

公立大学法人大阪 大阪公立大学

国立研究開発法人情報通信研究機構

大陽日酸 ATI 株式会社

β 型酸化ガリウム結晶の高精度 n 型ドーピング技術を 独自の有機金属気相成長法で実現 ～ 次世代パワーデバイス量産に向けた基盤技術を確立 ～

東京農工大学 大学院工学研究院応用化学部門の熊谷義直教授らのグループは、大陽日酸株式会社の吉永純也氏ら、奈良女子大学の佐々木捷悟助教、工学院大学の尾沼猛儀教授、大阪公立大学／情報通信研究機構（^{エヌアイシーティー}NICT）の東脇正高教授／室長、および大陽日酸 ATI 株式会社の伴雄三郎博士らと共同で、独自の減圧ホットウォール有機金属気相成長（MOVPE）法^{注1}を用い、高精度に n 型キャリア密度^{注2}を制御した β 型酸化ガリウム（β-Ga₂O₃）結晶^{注3}の高速成長技術を開発しました。β-Ga₂O₃ は電力制御・変換の高効率化を実現する次世代パワーデバイス^{注4}用の半導体材料として注目されています。今回、安全な Si 源としてテトラメチルシラン（TMSi）を採用し、MOVPE 法で Si をドーピングした β-Ga₂O₃ を成長し、キャリア密度の高精度制御を達成しました。本技術は、パワーデバイス量産に必須となるホモエピタキシャルウエハ^{注5}量産の基盤技術として期待されます。

本研究成果は、英文学術誌 Applied Physics Express（略称 APEX）誌に 5 月 20 日付でオンライン公開されました。

論文タイトル：Homoepitaxial growth of thick Si-doped β-Ga₂O₃ layers using tetramethylsilane as a dopant source by low-pressure hot-wall metalorganic vapor phase epitaxy

URL：<https://doi.org/10.35848/1882-0786/adcfce>

背景：電力変換時のロスを抑え、一層の省エネルギー化を促進するため、従来のシリコン（Si）結晶よりも大きな絶縁破壊電界強度^{注6}を有する次世代半導体結晶を用いた高耐圧・低損失なパワーデバイス（ダイオードやトランジスタ等）開発が注目されています。 β -Ga₂O₃結晶は、研究が先行している炭化ケイ素（SiC）や窒化ガリウム（GaN）結晶よりも絶縁破壊電界強度が大きく、電力損失の更なる抑制を可能にします。また、各種の融液法^{注7}で単結晶基板を製造できるという利点から、デバイス製造コストの削減が期待されています。そのため現在、産業応用に向け世界中で産官学が連携した研究開発が加速しています。

高性能な β -Ga₂O₃ パワーデバイス実現のためには、単結晶基板上に n 型キャリア密度が精密に制御された β -Ga₂O₃ 層を高速でホモエピタキシャル成長させた所謂ホモエピタキシャルウェハを製造する技術の開発が不可欠です。近年、砒化ガリウム（GaAs）や GaN 系デバイスの量産で多用されている有機金属気相成長（MOVPE）法が、 β -Ga₂O₃ の新たな成長手法として注目されています。

東京農工大学の熊谷研究室では、大陽日酸株式会社・大陽日酸 ATI 株式会社と共同開発した独自の減圧ホットウォール MOVPE 成長炉（FR2000-OX）を用いた β -Ga₂O₃ 成長の研究を進めています。既に、Ga の原料として蒸気圧が高く成長炉に高濃度で供給可能なトリメチルガリウム（TMGa）を採用し、炉内における酸素（O₂）ガスとの反応条件の検討によって、TMGa に由来する炭素（C）汚染が無い高純度 β -Ga₂O₃ ホモエピタキシャル層の成長を前例の無い高速度（毎時 15 μ m 以上）で実現しています。しかし、意図的な Si 不純物ドーピング^{注8}による n 型キャリア密度の制御については未検討でした。他研究機関の MOVPE 法による n 型 β -Ga₂O₃ の成長では、テトラエトキシシラン（TEOS）やシラン（SiH₄）を Si のドーピングガスとして用いた報告がありますが、TEOS には毒性、SiH₄ には爆発性があります。そこで今回、減圧ホットウォール MOVPE 法における β -Ga₂O₃ の新たな Si ドーピングガスとして無毒・非爆発性の TMSi を採用し、Si 不純物の濃度、キャリア密度の制御の可否を検討しました。

研究体制：本研究は、東京農工大学 大学院工学研究院応用化学部門の熊谷義直教授、大陽日酸株式会社の吉永純也氏ら、奈良女子大学の佐々木捷悟助教、工学院大学の尾沼猛儀教授、大阪公立大学／情報通信研究機構の東脇正高教授／室長、および大陽日酸 ATI 株式会社の伴雄三郎博士らによる共同研究グループで実施されました。減圧ホットウォール MOVPE 成長炉の開発・運用は、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）の委託によって実施されました。

研究成果：減圧ホットウォール MOVPE 成長炉（図 1）を用い、1000℃に保持した(010)面 β -Ga₂O₃ 基板上へのホモエピタキシャル成長中に TMGa と O₂ の供給量を固定した下で TMSi 供給量を変え供給しました。TMSi を供給することで均一な Si ドーピングが実現しました（図 2）。その他の不純物である C、水素（H）、窒素（N）は試料構造全体を通して検出されませんでした。

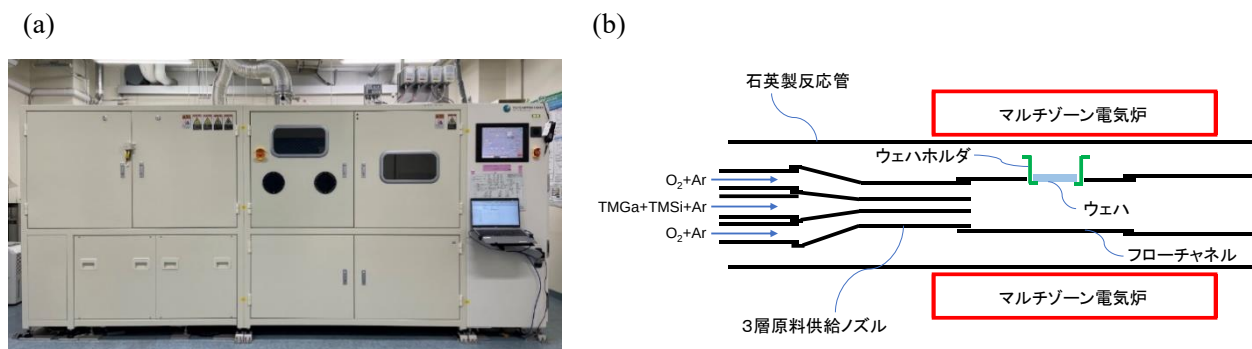
TMSi/TMGa 供給比を変化させて成長したホモエピタキシャル層中の Si 不純物濃度を調べたところ、 2.1×10^{15} から $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ までの広い範囲で制御できることが分かり、さらに電気的特性評価から Si 濃度に等しい室温キャリア密度が得られることも分かりました（図 3）。これは β -Ga₂O₃ 中で Si が浅い n 型不純物になるためであることを確認しています。

室温において $1.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア密度（Si 不純物濃度）を有するホモエピタキシャル層のキャリア輸送特性解析より、キャリア（電子）移動度^{注9}は極性光学フォノン散乱^{注10}のみによって支配されており、Si 不純物が影響していないことが明らかになりました。これらの結果から、TMSi を用いた減圧ホットウォール MOVPE 法による Si ドープ β -Ga₂O₃ ホモエピタキシャル層の成長は、パワーデバイス製造用ホモエピタキシャルウェハの量産技術となり得ることが分かりました。

今後の展開：本研究により、無毒で非爆発性の TMSi を用いた独自の減圧ホットウォール MOVPE 法で、キャリア密度を広い範囲で高精度に制御した Si ドープ β -Ga₂O₃ ホモエピタキシャル層の高速成長技術を確立しました。今後は β -Ga₂O₃ パワーデバイス実用化に向け、 β -Ga₂O₃ ホモエピタキシャルウェハを用いたパワーデバイスの開発および性能評価を進めていくと共に、大陽日酸イノベーションユニット（ユニット長：小林邦裕）CSE 事業部（事業部長：川元淳）では、FR2000-OX を原型にしたホモエピタキシャルウェハの少量生産用成長炉および大規模量産用成長炉の開発を進めていきます。

用語解説：

- 注 1) 有機金属気相成長 (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy: MOVPE) 法
金属元素の有機金属化合物ガスを原料として使用する結晶成長手法。高精度に成長を制御することが可能で、窒化物半導体発光素子や砒化物・窒化物半導体高速動作トランジスタの作製で広く用いられている。
- 注 2) n 型キャリア密度
半導体中を自由に動くことができる電子 (キャリア) の数を示す指標で、1 立方センチメートルあたりの電子数で表される。半導体デバイスでは、デバイスの耐圧や電気の流れやすさがキャリア密度に依存するため、広い範囲でキャリア密度を高精度に制御する技術が求められる。
- 注 3) β 型酸化ガリウム (β -Ga₂O₃) 結晶
ガリウム (Ga) 原子と酸素 (O) 原子が 2:3 の比率で結合した酸化物半導体結晶で、バンドギャップは約 4.5 eV (電子ボルト) である。この値は、Si (1.1 eV)、4H-SiC (3.3 eV)、GaN (3.4 eV) よりも大きく、高い絶縁破壊電界強度 (8 MV/cm) が推測されている。
- 注 4) パワーデバイス
電力変換を行う半導体素子で、高電圧・大電流を効率よく制御することができる。電源、産業用モータ等の幅広い分野で使用される。
- 注 5) ホモエピタキシャルウェハ
デバイス作製のため、単結晶基板上にキャリア密度の異なる同じ結晶を基板と軸を揃えて成長 (ホモエピタキシャル成長) させた基板のこと。デバイスの設計に応じ、ホモエピタキシャル層の厚さとキャリア密度を制御した成長が求められる。
- 注 6) 絶縁破壊電界強度
半導体材料が電気を絶縁できる電界強度の上限で、この値を超えると絶縁性が失われて電気が流れてしまう。数値が高い程、高耐圧のデバイス作製に適した材料となる。 β -Ga₂O₃ 結晶の絶縁破壊電界強度は約 8 MV/cm と推測されている。
- 注 7) 融液法
材料融液の冷却過程で種結晶から単結晶を成長させる手法。量産性に優れ、チョクラルスキー (Cz) 法、縁部限定薄膜供給成長 (EFG) 法、垂直ブリッジマン (VB) 法等が知られている。
- 注 8) 不純物ドーピング
半導体結晶の電気的特性を意図的に変化させるため、特定の不純物を微量添加すること。
- 注 9) キャリア (電子) 移動度
半導体結晶に 1 V/cm の電界が印加された時に電子が得る速度のこと。この値が大きいと、電流が流れやすくなり、高速・高性能な半導体デバイスが作製できる。結晶品質、格子振動、不純物濃度、測定温度等の影響を大きく受ける。
- 注 10) 極性光学フォノン散乱
半導体結晶中のキャリアが、格子振動 (フォノン) との相互作用によって受ける散乱のこと。散乱が強いとキャリア移動度が低下する。



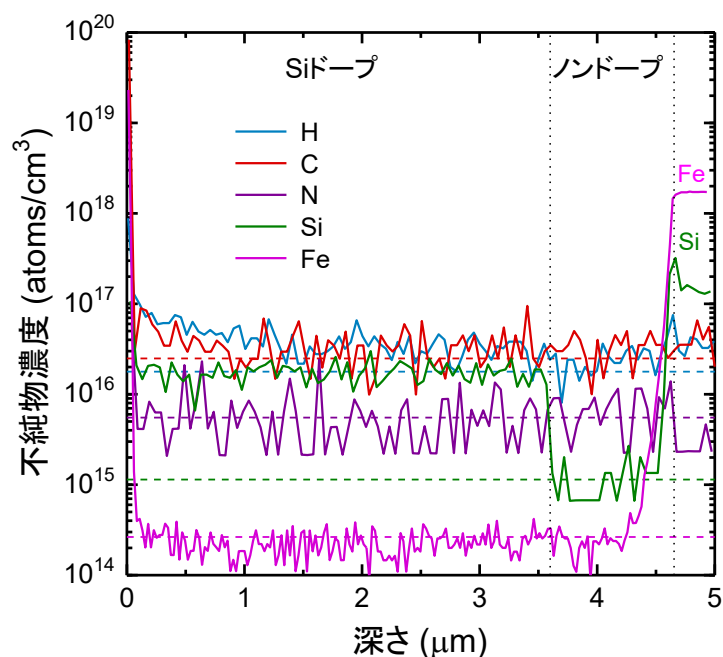


図 2 : ノンドープ β -Ga₂O₃ 層の成長に続き、TMSi/TMGa 供給比 8.0×10^{-7} で Si ドープ β -Ga₂O₃ 層を成長させた試料の不純物濃度の深さプロファイル。破線は、それぞれの元素の検出限界値。Si ドープ層中で Si が均一にドーピングされていることがわかる。試料全体で、C、H、および N 不純物が検出されていないこともわかる。

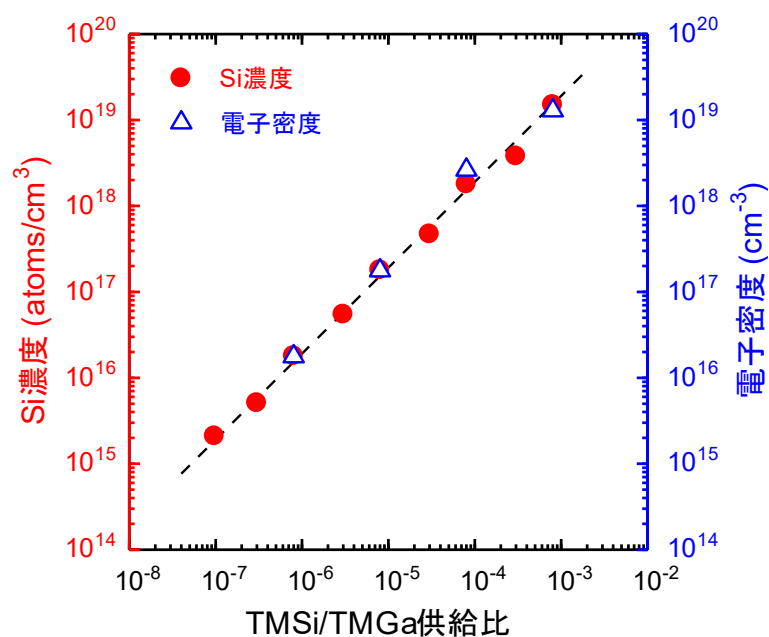


図 3 : Si ドープ β -Ga₂O₃ 層における Si 濃度および室温でのキャリア（電子）密度の TMSi/TMGa 供給比依存性。図中の破線は Si 濃度の近似直線である。広い範囲で Si 濃度と電子密度が高精度に制御されている。

◆研究に関する問い合わせ◆

東京農工大学 大学院工学研究院
応用化学部門 教授
熊谷 義直（くまがい よしなお）
TEL：042-388-7469
E-mail：4470kuma@cc.tuat.ac.jp

大陽日酸株式会社 イノベーションユニット CSE 事業部
吉永 純也（よしなが じゅんや）
TEL：045-872-1822
E-mail：yoshinagaj.qed@tn-sanso.co.jp

奈良女子大学 研究院自然科学系
佐々木 捷悟（ささき しょうご）
E-mail：ssasaki@cc.nara-wu.ac.jp

工学院大学 先進工学部応用物理学科
尾沼 猛儀（おぬま たけよし）
TEL：042-628-4704
E-mail：onuma@cc.kogakuin.ac.jp

大阪公立大学大学院工学研究科電子物理系専攻電子物理工学分野／
情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 小金井フロンティア研究センター
グリーン ICT デバイス研究室
東脇 正高（ひがしわき まさたか）
TEL：072-254-9268
E-mail：higashiwaki@omu.ac.jp / mhigashi@nict.go.jp

大陽日酸 ATI 株式会社
伴 雄三郎（ばん ゆうざぶろう）
TEL：044-288-5791
E-mail：bany.qtu@tnati.tn-sanso.co.jp

◆報道に関する問い合わせ◆

東京農工大学 総務課広報室
TEL：042-367-5930
E-mail：koho2@cc.tuat.ac.jp

大陽日酸株式会社 コーポレートユニット広報部広報課
TEL：03-5788-8015
E-mail：Tnsc.Info@tn-sanso.co.jp

奈良女子大学 総務課広報・基金係
TEL：0742-20-3220
E-mail：somu02@jimu.nara-wu.ac.jp

工学院大学 経営企画部広報課
TEL：03-3340-1498
E-mail：gakuen_koho@sc.kogakuin.ac.jp

大阪公立大学 広報課

TEL : 06-6967-1834

E-mail : koho-list@ml.omu.ac.jp

情報通信研究機構 広報部報道室

E-mail : publicity@nict.go.jp

大陽日酸 ATI 株式会社 管理統括部

TEL : 044-288-5791

E-mail : hosodam.qaz@tnati.tn-sanso.co.jp