

反転MOSチャネル型 酸化ガリウムトランジスタの研究開発

令和2年度-令和6年度 (タイプS)

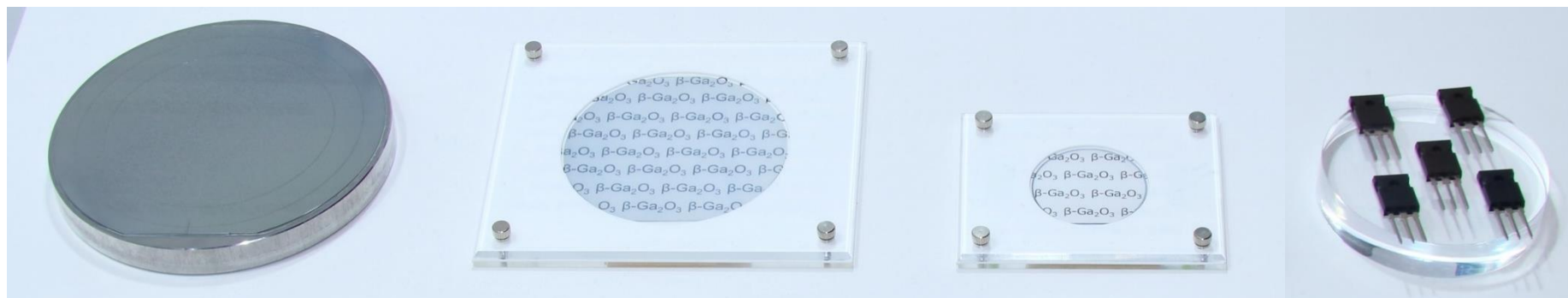
株式会社ノベルクリスタルテクノロジー
第二研究部
部長 宮本 広信

1. 研究概要と酸化ガリウムデバイスへの期待
2. 酸化ガリウムデバイスの技術課題
 - ウエハのキラー欠陥低減
 - 低い熱伝導率
 - p型導電層技術未確立
3. p型導電層技術未確立への対応
 - トランジスタの高耐圧化
 - トランジスタの大電流化
4. まとめ

- 設立日： 2015年6月30日
- 所在地： 埼玉県狭山市
- 資本金： 1.6億円(2022年5月12日現在)
- 出資者： タムラ製作所、個人投資家、事業会社※

※ 安藤・間、岩谷ベンチャーキャピタル、AGC、佐鳥電機、JX金属、
新電元工業、双日マシナリー、トレックス・セミコンダクター、
安川電機、ローム

- 従業員： 72人
- 製品： 酸化ガリウム基板・エピウエハ(販売中)
酸化ガリウムパワーデバイス(開発中)



150 mm 基板
(開発中)

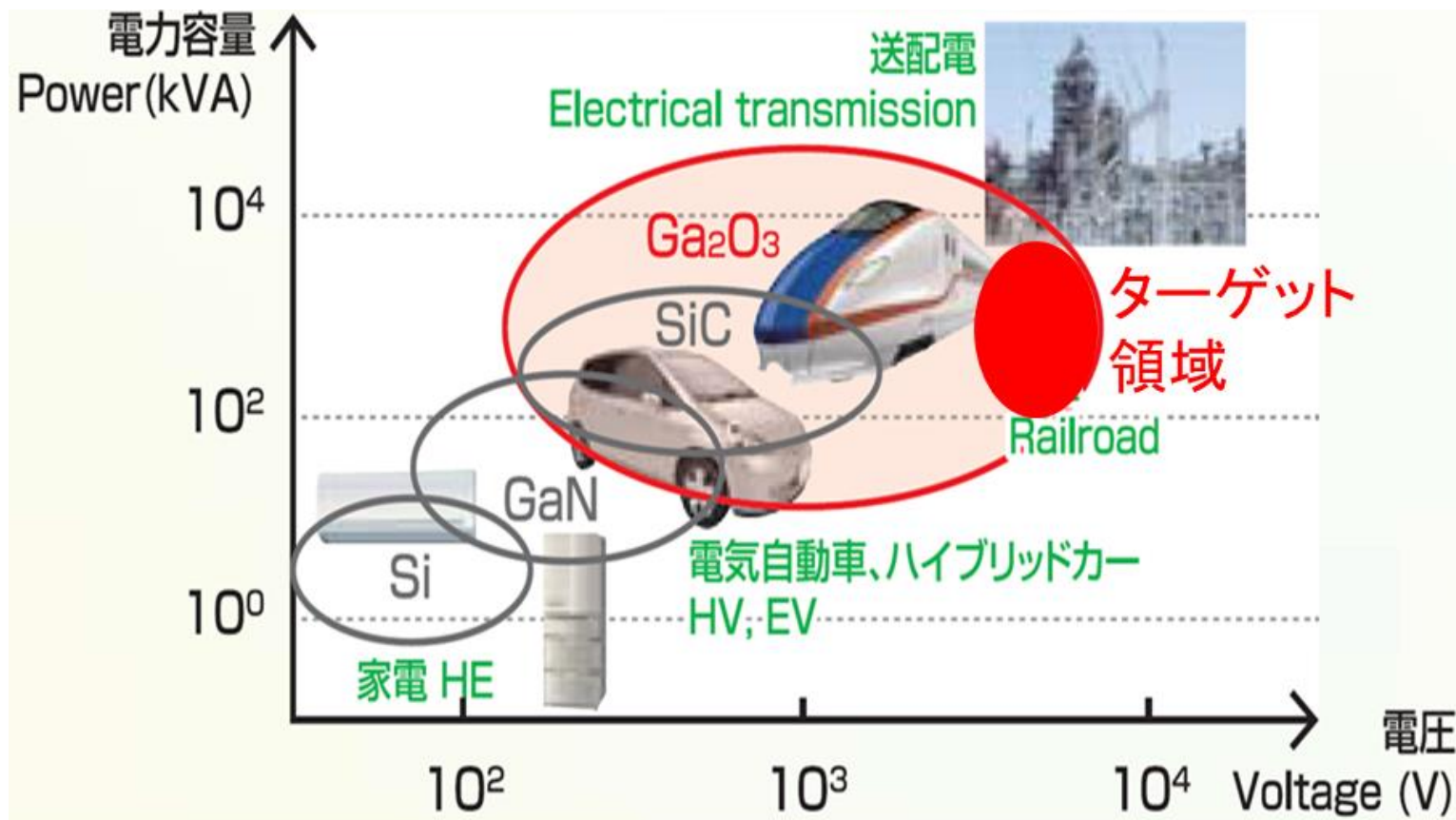
100 mm エピウエハ
(販売中)

2 inch エピウエハ
(販売中)

SBD
(開発中)

1. 研究の概要と酸化ガリウムデバイスへの期待

酸化ガリウム ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) 超高耐圧、大電流トランジスタの実用化に向けた要素技術及び反転MOSチャネル構造の基礎研究



ユニポーラデバイスの耐圧と電力容量の関係

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の物性比較

ウルトラワイドバンドギャップ半導体

- ・高い絶縁破壊電界 バリガ性能指数 Siの3000倍 SiCの10倍
- ・低い熱伝導度
- ・p型導電層形成技術が未確立

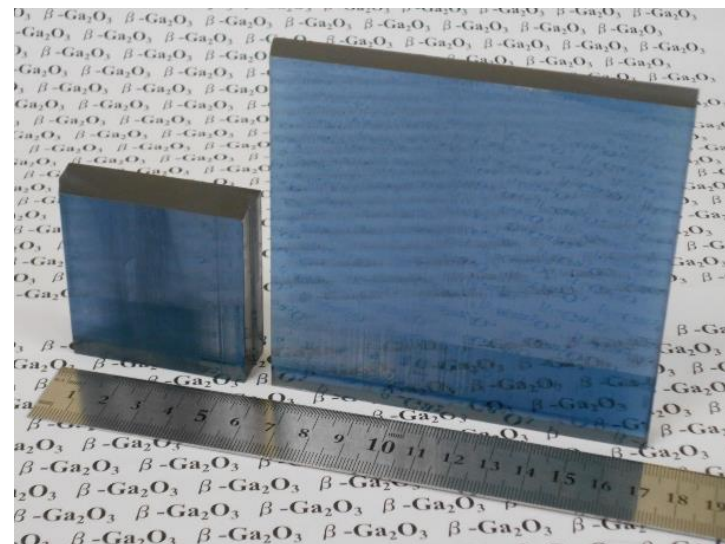
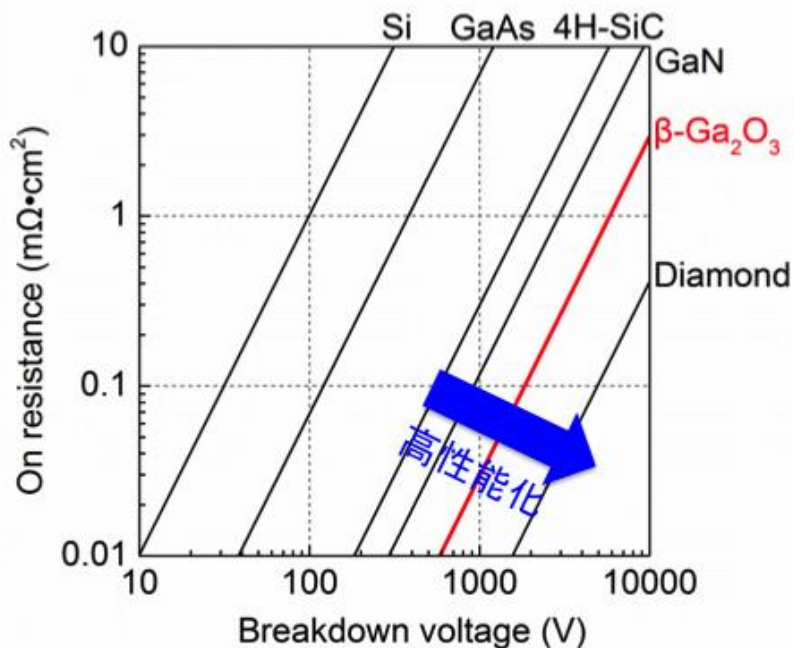
ウルトラワイドバンドギャップ半導体

	Si	4H-SiC	GaN	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	Diamond	AlN
バンドギャップ: E_g (eV)	1.1	3.3	3.4	4.5-4.9	5.5	6.2
絶縁破壊電界: E_c (MV/cm)	0.3	2.5	3.3	8 (推定)	10	15.4
電子移動度: μ (cm^2/Vs)	1,400	1,000	1,200	300 (推定)	2,000	850
比誘電率: ϵ_s	11.8	9.7	9.0	10	5.5	8.5
熱伝導度: λ (W/m·K)	150	370	130	10, 30	2000	340
バリガ性能指数: $\epsilon\mu E_c^3$	1	340	870	3,444	24,664	59,160
導電性制御	n, p	n, p	n, p	n	p	-

なぜ酸化ガリウム ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) なのか (2)

低損失なデバイス特性
(シリコンの1/3000)

高品質で低コストな単結晶基板
(シリコンと同等)

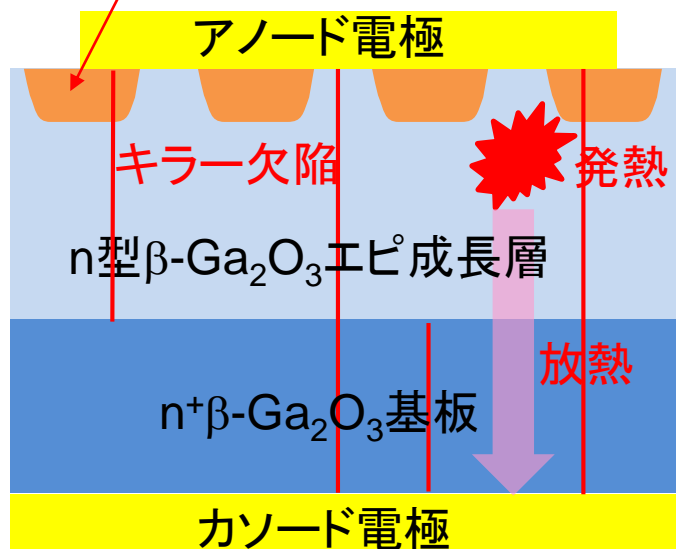


SiCやGaNを超える低損失デバイスが低コストで実現できる。

酸化ガリウムパワーデバイスで、世界中の電力損失を低減!!

2. 酸化ガリウム ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) の技術課題は？

p型 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 技術未確立



例 ショットキーダイオード
構造断面図

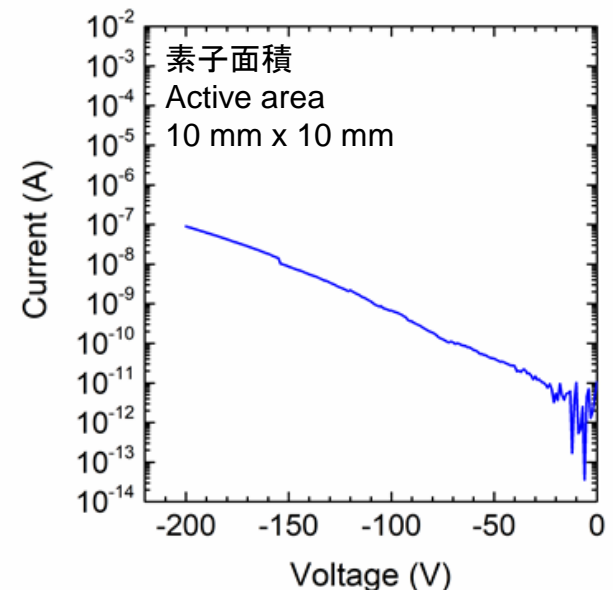
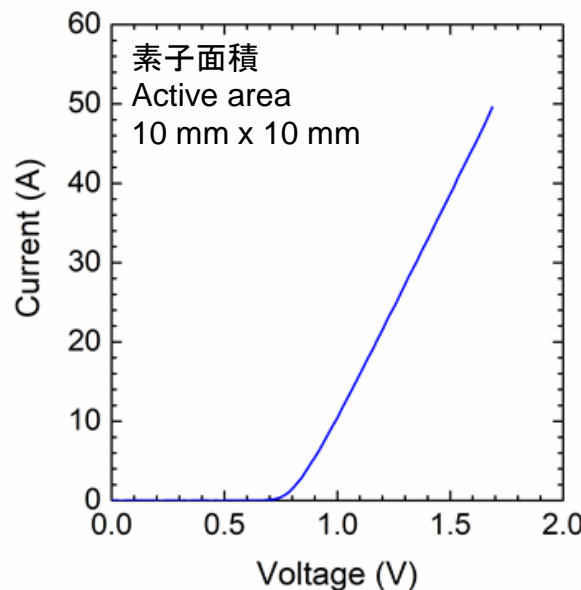
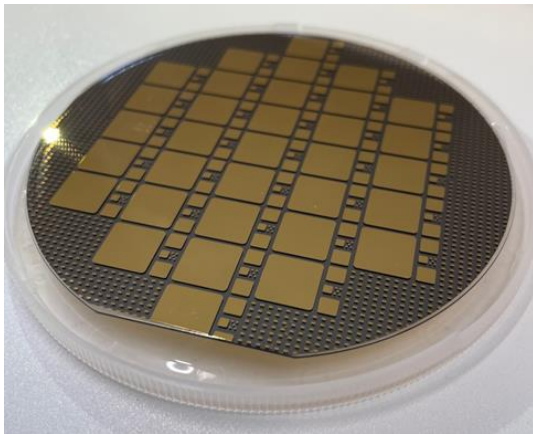
先行する $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ショットキーバリア
ダイオードにて開発

1. 酸化ガリウムウエハの
キラー欠陥低減
→ 素子の大型化、大電流化
2. **低い熱伝導率**への対応
→ デバイスの放熱
3. **p型導電層技術未確立**への対応
→ デバイス設計
(高耐圧化、しきい値電圧)

本研究反転MOSチャネル開発

The 4th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials(2022)発表
2022年3月14日プレスリリース

- ・キラーク陥密度を低減した高品質100 mm エピウエハを実現
- ・逆方向特性の歩留まりから、キラーク陥密度は0.7個/cm²程度



開発中100 mm エピウエハ
上に作製したダイオード
10 mm × 10 mm

順方向特性

Forward characteristics

逆方向特性

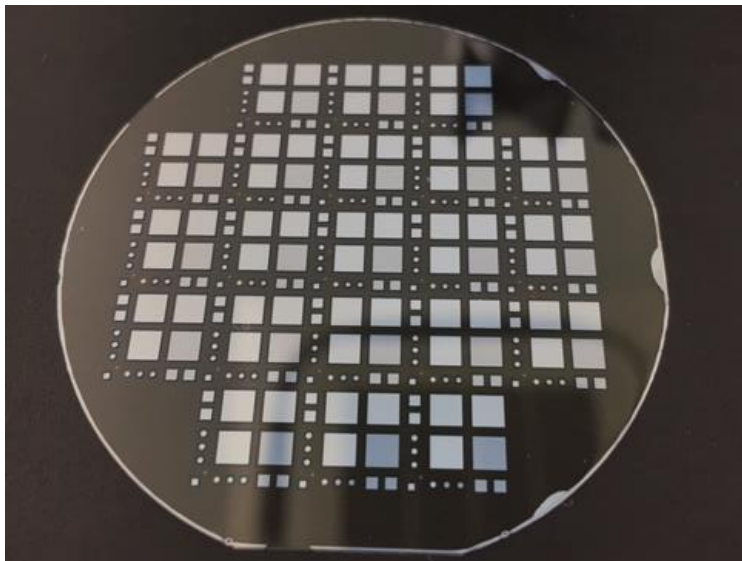
Reverse characteristics

ショットキーバリアダイオードの特性

I-V characteristics of Schottky barrier diode

技術課題2: 低い熱伝導率への対応

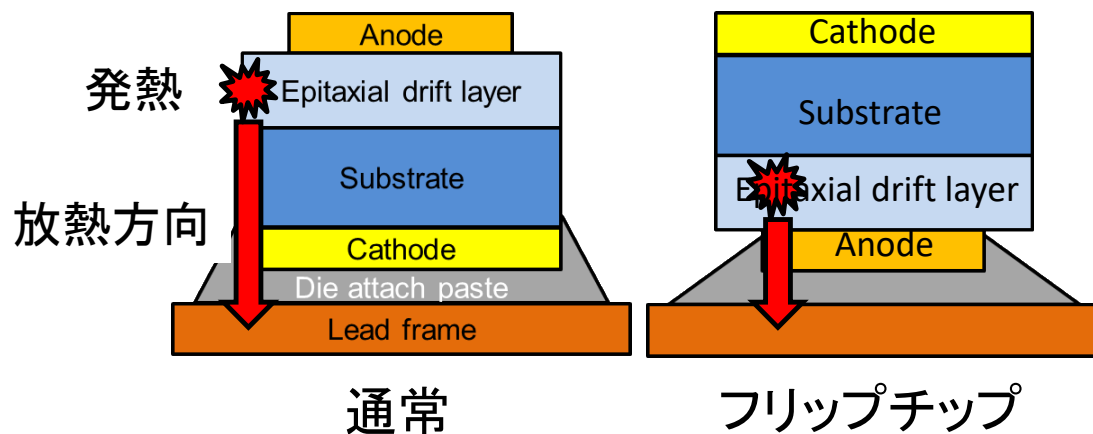
対策方法1: 基板薄化



4インチウエハ基板薄化
200 μm 厚 デバイス適用中
100 μm までの薄化を計画

対策方法2: フリップチップ

応用物理学会 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会[13p-D419-12]



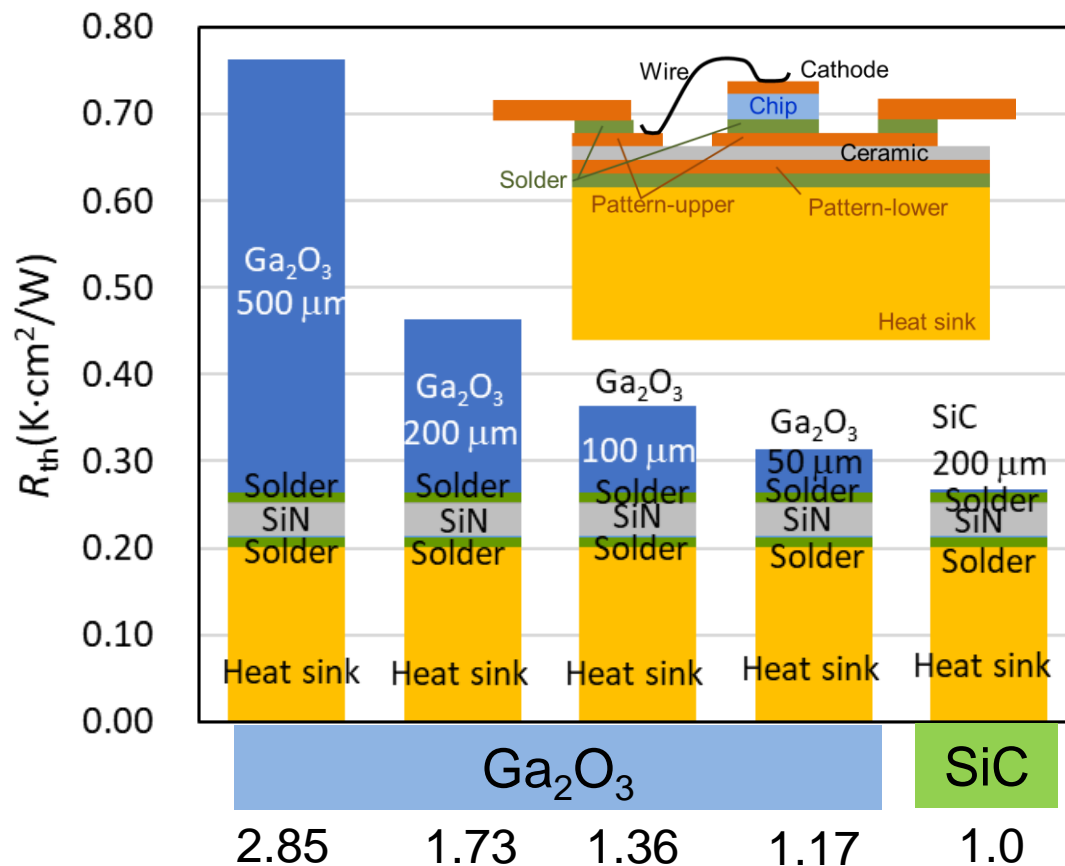
フリップチップにすることで、
0.9°C/Wを実証

基板薄層化効果の見積 1次元解析

薄層化(50-100 μm)により実装時の Ga_2O_3 熱抵抗の影響を小さくする

$$\Delta T = R_{th} \times P_{diss} \quad P_{diss} = R_{sp} \times J^2$$

素子温度上昇 熱抵抗 消費電力 オン抵抗 電流密度



計算に用いたパラメータ

厚さd (nm)	材料 (熱伝導度λ)
100	Ga_2O_3 (11 W/m·K)
50	はんだ接合層 (40-50 W/m·K)
50	Cu (398 W/m·K)
300	Si_3N_4 (80 W/m·K)
50	Cu (398 W/m·K)
50	はんだ接合層 (40-50 W/m·K)
8000	Cu (398 W/m·K)

各層の $R_{th} = d/\lambda$

モジュール実装時の熱抵抗成分比較

3. p型導電層技術未確立への対応

高耐压化 FinFET(n型層空乏化)

低ドナー濃度厚膜エピ開発

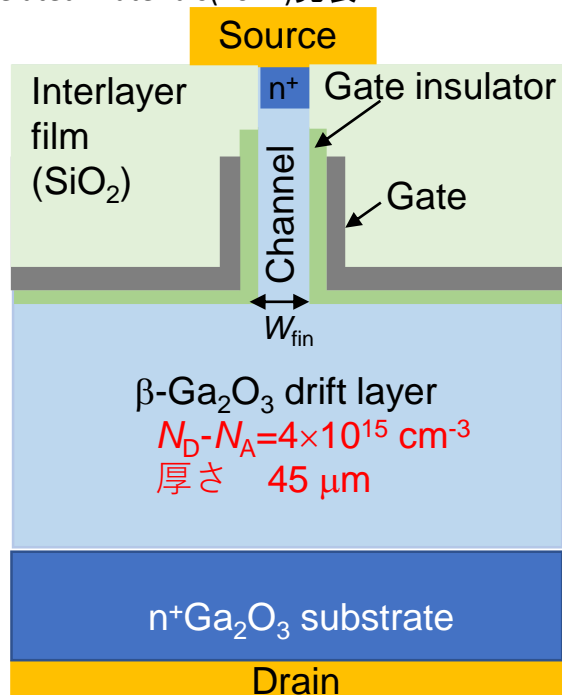
縦型Ga₂O₃トランジスタとして

世界最高の耐压5.0 kV実証

応用物理学会 2021年第82回秋季学術講演会[12p-N305-14]

The 4th International Workshop on Gallium Oxide

and Related Materials(2022)発表



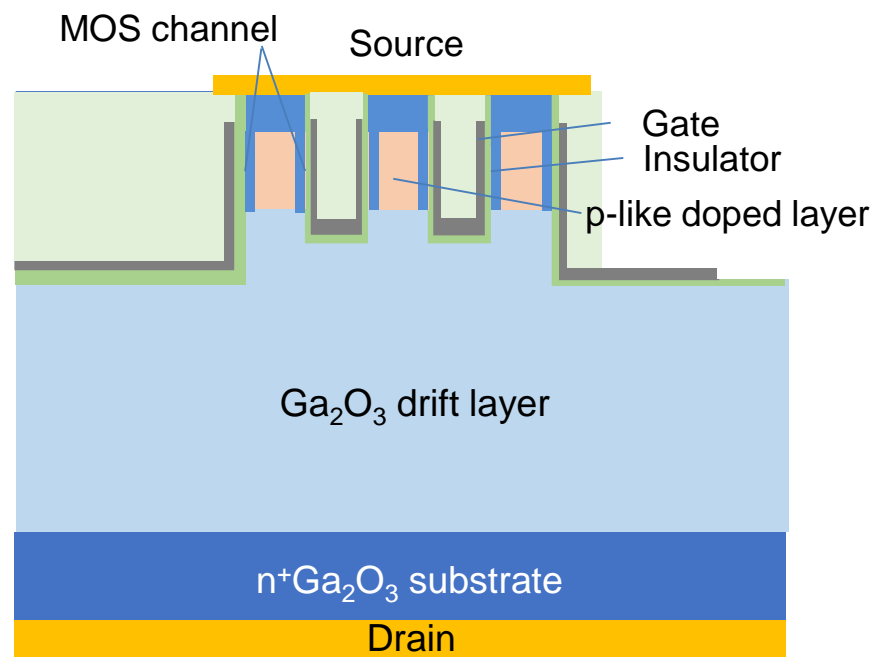
タイプA

10 kV級酸化ガリウムトレンチ

MOSFETの研究開発(2018-2020)

大電流化 Trench MOSFET
反転MOSチャネル構造開発

高抵抗のアクセプタ添加層形成技術



タイプS

反転MOSチャネル型酸化ガリウム

トランジスタの研究開発(2020-2024)

なぜ反転MOSチャネル構造を開発するのか



Novel Crystal Technology, Inc.

大電流化にはプロセスが容易な反転MOSチャネル型FETの開発必要

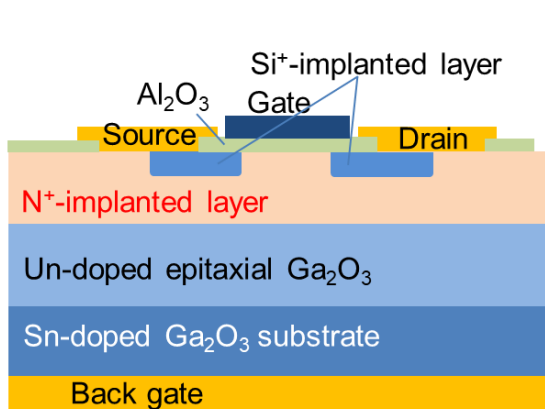
デバイス構造	FinFET n型層空乏化チャネル	トレンチMOSFET 反転MOSチャネル
断面構造		
チャネル	n型導電層	MOS反転層
p型層	不要	必要
しきい値	0.5 ~ 2 V (メサ幅で制御)	>3 V (アクセプタ濃度で制御)
メサ幅	< 400 nm	1~5 μm
露光法	電子ビーム露光が必要	ステツパ露光で対応可能
量産性	既存4, 6Φライン対応不可	既存4, 6Φライン対応可
開発動向	小型TEG-特性発表 大電流化未了 Cornell Univ., NCT	開発中 NICT, NCT

酸化ガリウム反転MOSFET (1) 移動度評価

窒素イオン注入チャンネル酸化ガリウムMOSTランジスタ

応用物理学会 2022年第69回春季学術講演会 [22p-E302-7]

- ・窒素(N)イオン注入により高抵抗ウエル層を形成
- ・FinFET構造では実現が難しい 高いしきい値電圧 +6.2 V実現
- ・窒素イオン注入MOSチャンネルの高い移動度 52 cm²/Vs 確認
(SiC ~30 cm²/Vs)



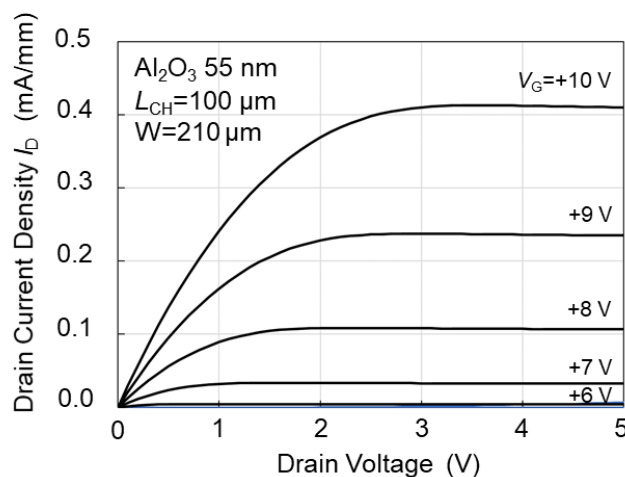
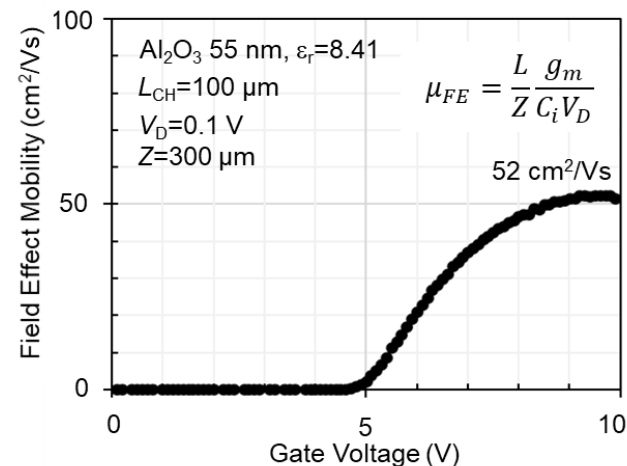
移動度評価用

長チャンネル ($L_{CH}=100 \mu\text{m}$)

MOSTランジスタの断面構造

MOS transistor

Cross-sectional structure

 $I_d - V_{ds}$ 特性 $I_d - V_{ds}$ characteristics

移動度-ゲート電圧特性

Mobility-gate voltage
characteristics

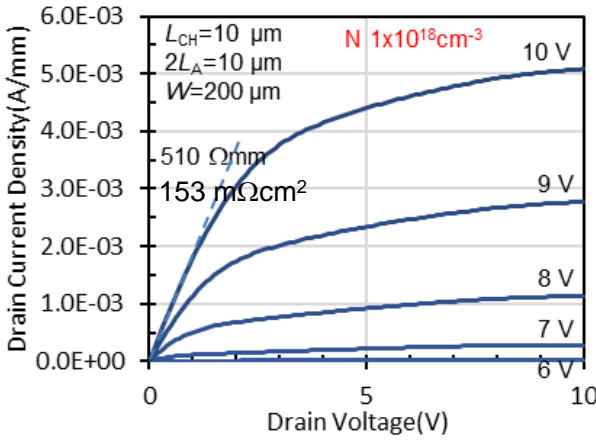
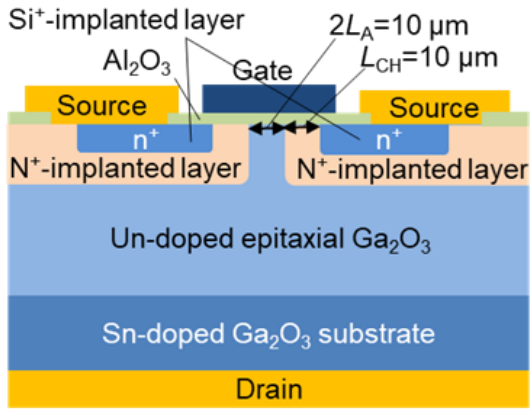


β-Ga₂O₃縦型反転MOSチャネルトランジスタ動作を 世界で初めて実証

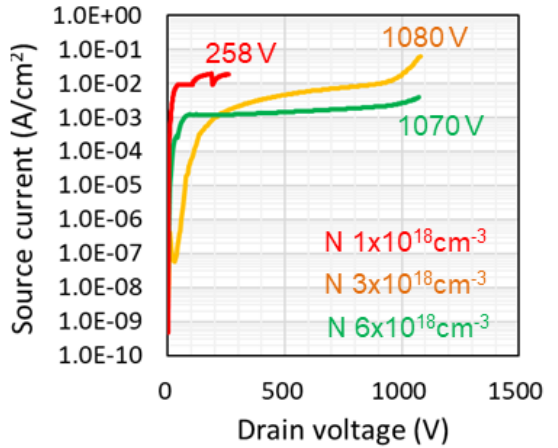
応用物理学会 2022年第83回秋季学術講演会[21p-M206-8]
2022年9月20日プレスリリース

DI-MOSTランジスタの構造、特性

ウェル層の窒素(N)濃度 $1-6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
しきい値電圧 V_{TH} 6.6-8.5 V
耐圧 BV 258-1080 V



I_d V_{ds} 特性



耐圧波形

β-Ga₂O₃ DI-MOSFET
の断面構造

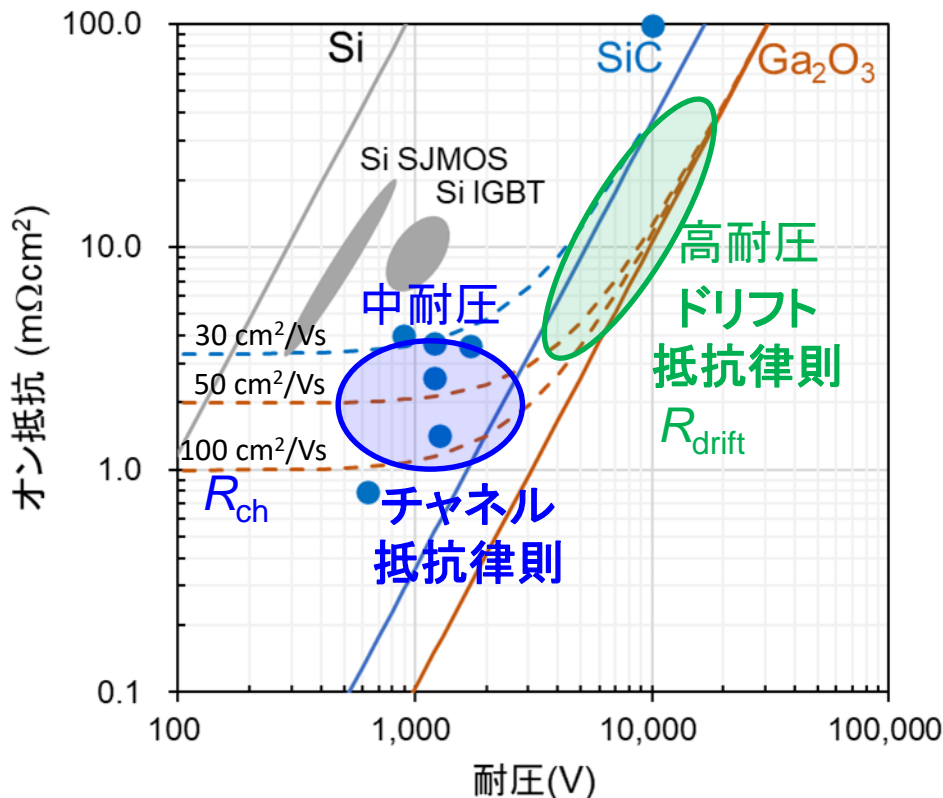
Structure of β-Ga₂O₃
DI-MOSFET

I_D - V_D characteristics of
β-Ga₂O₃ DI-MOSFET

Three-terminal off-state
Breakdown characteristics

SiCに比較して

- ・高い絶縁破壊電界強度(6-8 MV/cm)
- ・高いMOSチャネル移動度(50-100 cm²/Vs)
- ・低コストでウエハ・デバイス作製可能



耐圧とオン抵抗の関係
トランジスタの性能指標

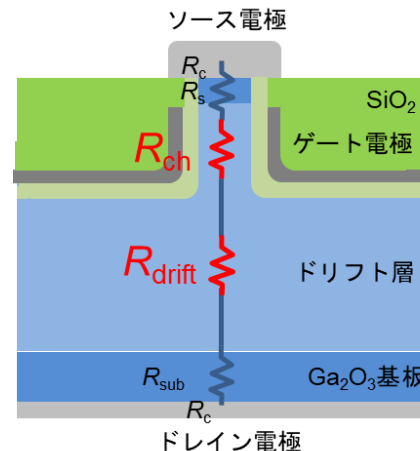
Transistor performance index

1)高耐圧領域(> 3.0 kV)

加速器用パルス電源
水浄化システム用パルス電源
風力発電、スマートグリッド

2)中耐圧領域(650 V-3 kV)

EV急速充電器、データセンター



トランジスタの断面構造

Cross-sectional structure of transistor 15

4. まとめ

反転MOSチャネル型酸化ガリウムトランジスタの研究開発 (令和2年度-令和6年度)

令和2-4年度

要素技術を開発し、 β -Ga₂O₃反転MOSチャネル型トランジスタ
を世界で初めて実現

高いMOSチャネル移動度 52 cm²/Vs (SiC 30 cm²/Vs)

ノイズに強いしきい値電圧 6.2 V

耐圧 1100 V

今後

令和5年度 高耐圧ドリフト層と合わせて 10 kV耐圧実証

令和6年度 外部Fab量産ラインを活用して大電流化(素子大型化)
100 A級, 10 kV耐圧MOSTランジスタを実現

謝辞) 開発に際してご支援、ご助言頂いた防衛装備庁関係者の皆様に感謝いたします。

ご支援いただいたプログラム

タイプA 1.2億/3年

10 kV級酸化ガリウムトレンチMOSFETの研究開発
(2018-2020)

低ドナー濃度、厚膜エピを用いたFinFET構造にて縦型Ga₂O₃トランジスタの耐圧として**世界最高値を更新する耐圧5.0 kV**を確認
(従来 2.6 kV, Cornell Univ. 2019.12)

タイプS 3.7億/5年

反転MOSチャネル型酸化ガリウムトランジスタの研究開発
(2020-2024)

反転MOSチャネル型トランジスタを世界で初めて実現
高い**MOSチャネル移動度 52 cm²/Vs** (SiC 30 cm²/Vs)
十分高い**しきい値電圧 6.2 V**

ご支援により、一部は世界に追いつき、追い越すことができました。
ご支援に感謝いたします。