

戦略的省エネルギー技術革新プログラム
フェーズ名：実用化開発

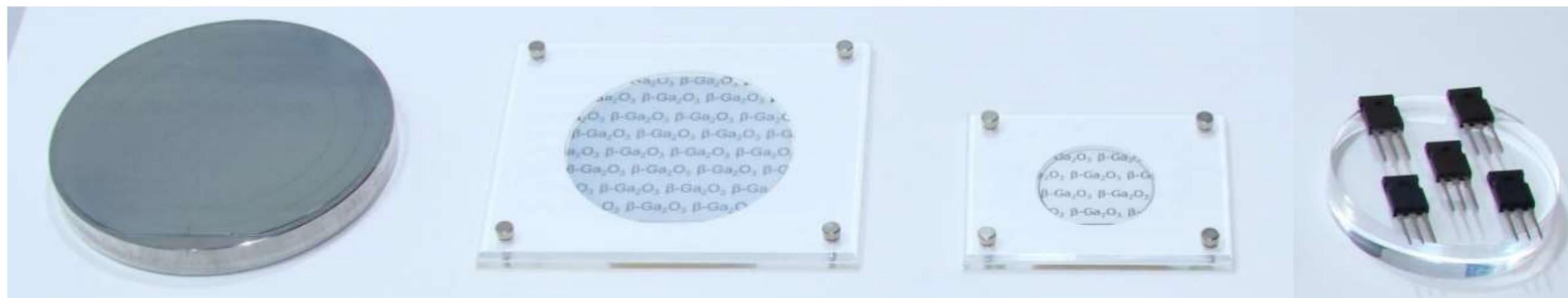
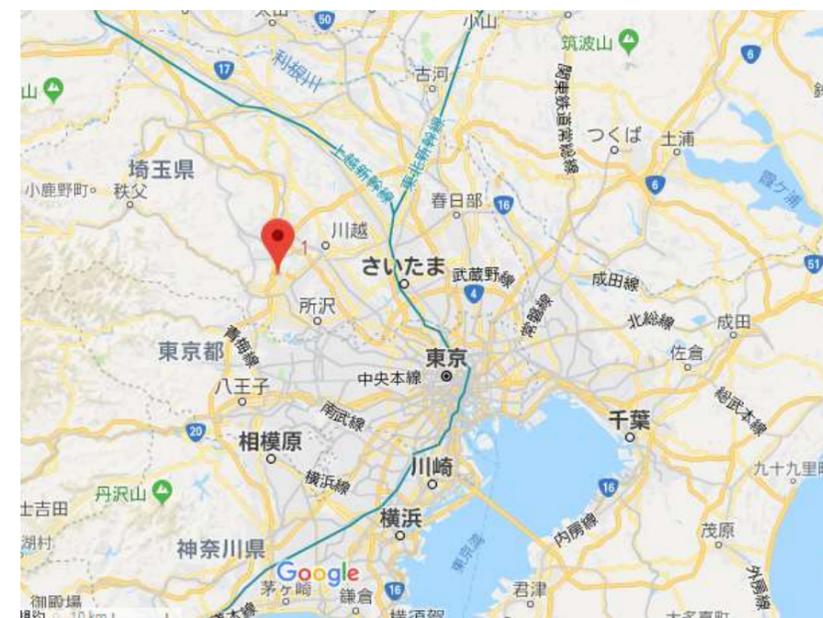
アンペア級酸化ガリウムパワーデバイスの開発

プロジェクト実施者：株式会社ノベルクリスタルテクノロジー
不二越機械工業株式会社
プロジェクト実施期間：2018年7月～2020年5月



1. 会社概要
2. 研究開発の背景
3. 研究開発の目的
4. 研究開発の目標
5. 研究開発体制
6. 研究開発成果
7. 今後の展望
8. まとめ

- 会社名： 株式会社ノベルクリスタルテクノロジー (NCT)
- 所在地： 埼玉県狭山市
- 役員： 取締役： 倉又朗人、佐々木公平、橋口裕作、山腰茂伸
監査役： 南部修太郎、佐村秀夫
- 設立： 2015年6月
- 事業内容： β -Ga₂O₃基板・エピウエハの開発・製造・販売
 β -Ga₂O₃デバイスの開発・販売(予定)
- 資本金： 4億9,692万5千円
- 主な出資者： タムラ製作所(38%)、個人投資家(36%)、事業会社*(26%)
* AGC、TDK、岩谷ベンチャーキャピタル、佐鳥電機、新電元工業、JX金属、双日マシナリー、トックス・セミコンダクター、安川電機
- 資本政策： 2023年のIPOを目指す
- 従業員数： 41名(2020年6月末現在)



6 inch 基板
(開発中)

4 inch 基板
(販売中)

2 inch エピウエハ
(販売中)

SBDs
(開発中)

- 会社名： 不二越機械工業株式会社 (Fujikoshi Machinery Corp.)
- 所在地： 長野県長野市松代
- 役員： 取締役： 市川大造、古川昌徳、宮崎昌人、山崎順造、市川和成
監査役： 光安啓明
- 設立： 1952年5月
- 事業内容： 半導体材料(シリコンウェーハ等)精密研磨装置の開発・製造・販売
- 資本金： 6000万円
- 従業員数： 201名(2020年10月末現在)



シリコン関連装置

Φ300 mm ウェーハ対応
両面ポリッシングマシン



LPD - 300

Φ300 mm ウェーハ対応
片面ポリッシングマシン



MCP - 302



信越化学殿HPより

サファイア、SiC関連装置

サファイア、SiC対応
両面ラッピングマシン



USP - 13B

サファイア、SiC対応
片面ポリッシングマシン

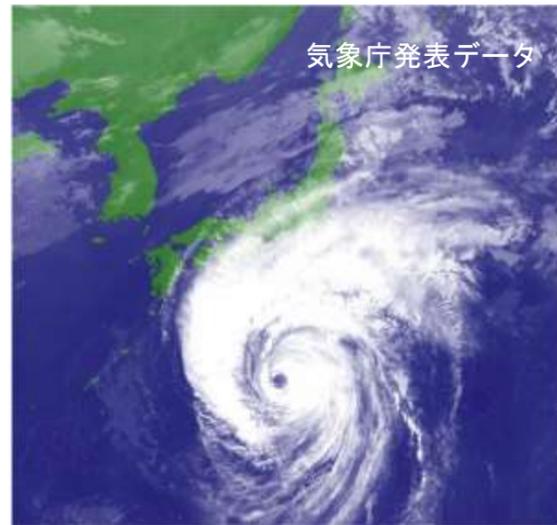


SRLM - 19

サファイア、SiC対応
片面ラッピングマシン



SLM - 485



地球温暖化問題の深刻化

脱炭素へ税優遇
再生エネ製品設備投資で

研究開発支援に基金

「グリーン投資」促進策のイメージ

税制 → 設備投資に減税

- ① 風力発電
- ② 次世代型リチウムイオン電池
- ③ パワー半導体

技術革新への投資促進 (法人税から租税控除)

繰上償却の活用

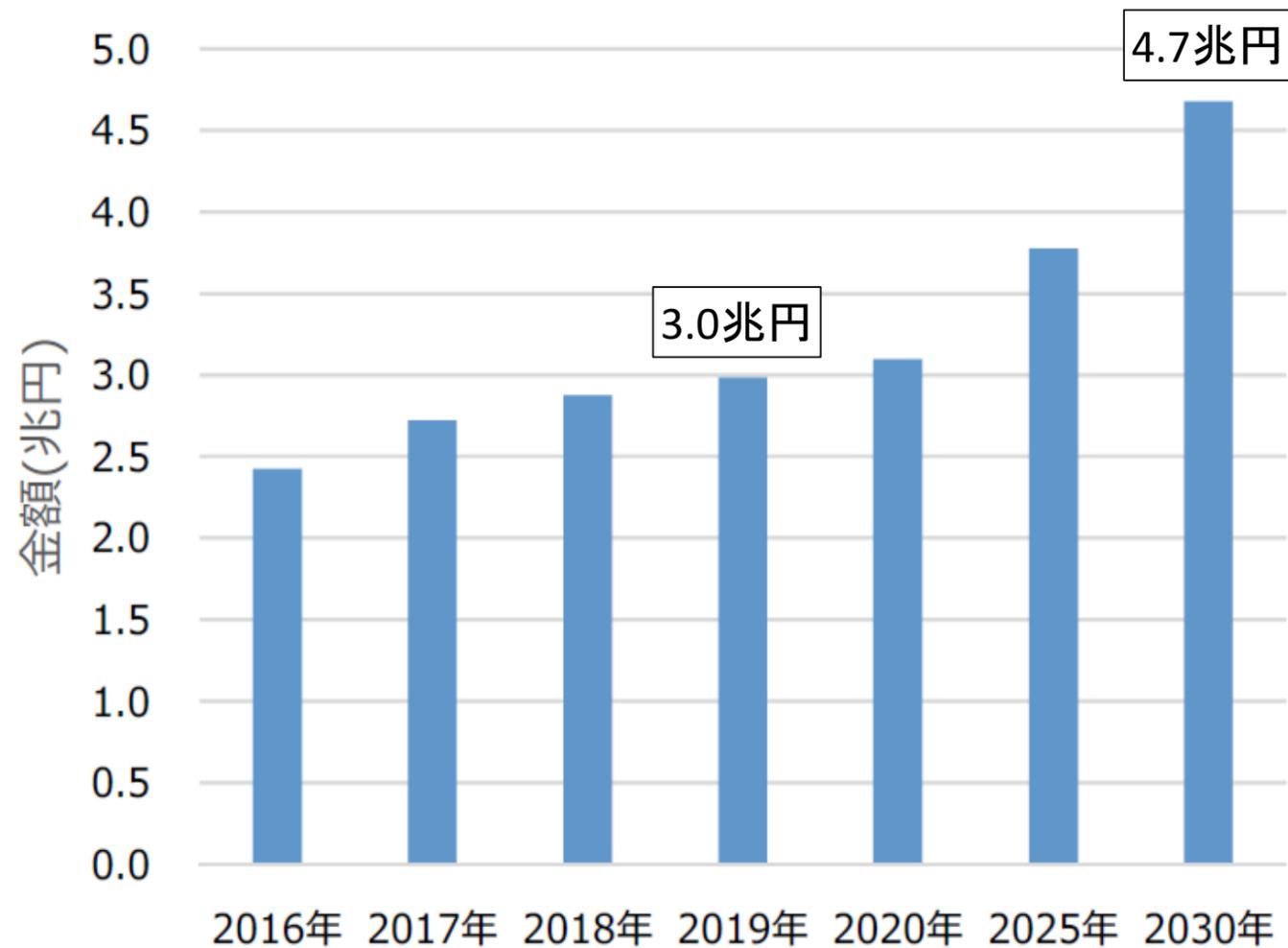
- 過去の赤字と足元の黒字を相殺して納税額減
- 炭素量の取り組み要件に

予算 → 研究開発支援

NEDO 研究開発支援の基金

- ① 水素
- ② 蓄電池
- ③ カーボンリサイクル
- ④ 洋上風力

政府・与党



パワー半導体全体の市場

地球温暖化問題に対処する技術として高い成長が見込まれている。

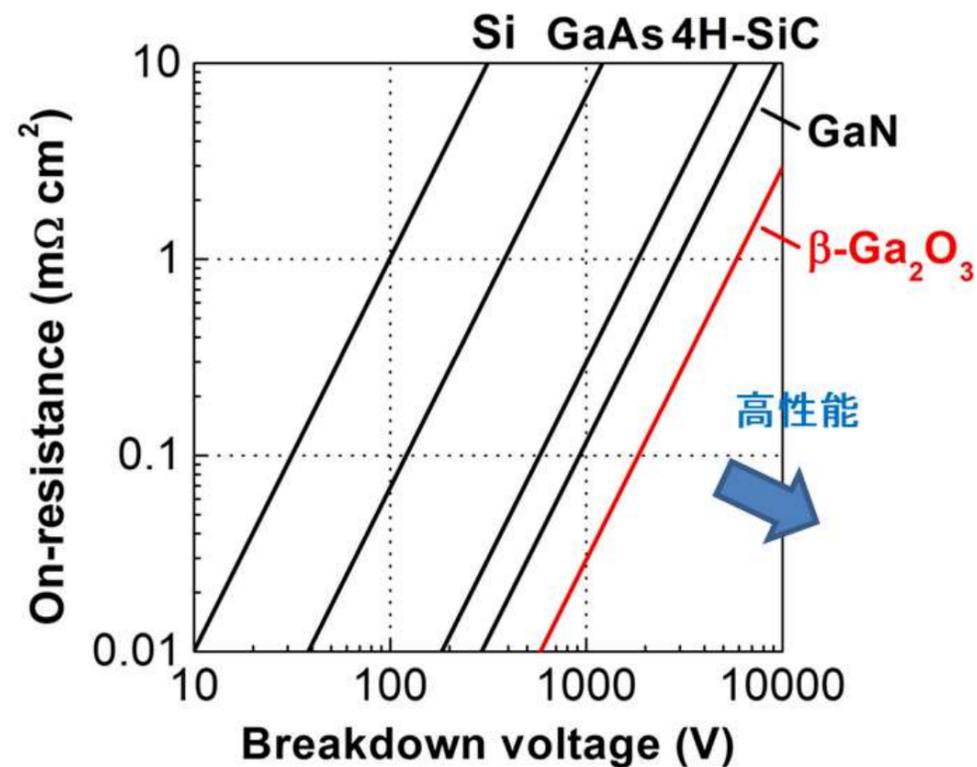
出展: 日本経済新聞 2020年11月13日(金)

国による「グリーン投資」政策の推進

- ・更なる電力損失低減のため、**低損失で安価なパワーデバイス**が求められている。
- ・既存のSiパワーデバイスは、材料物性限界でこれ以上の大幅な**損失低減困難**。
- ・次世代のSiCやGaNパワーデバイスは、**材料コストが高いため広い普及に課題**。

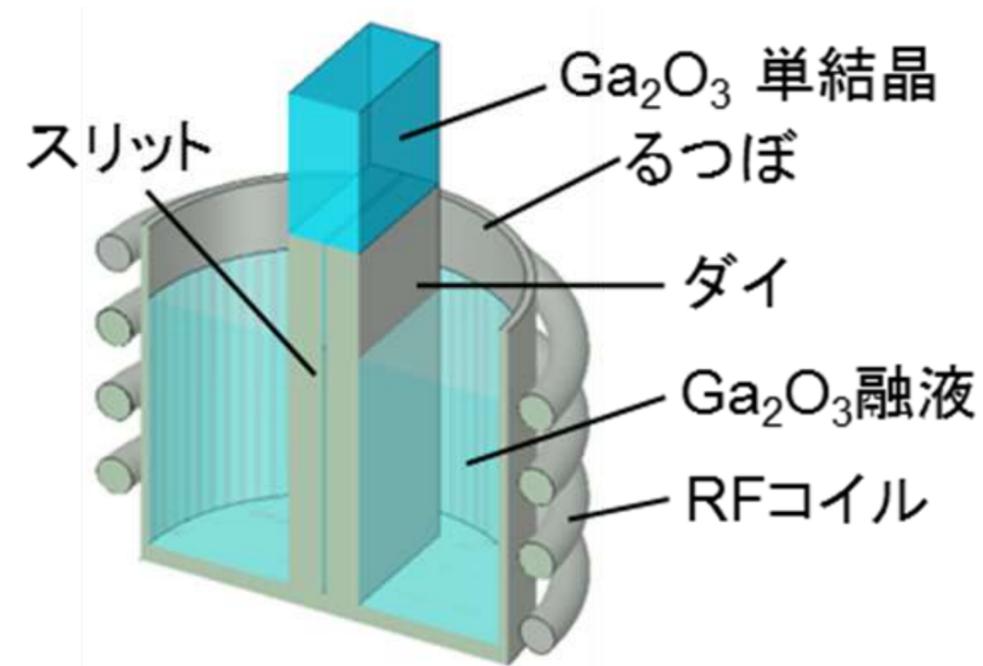
β -Ga₂O₃パワーデバイス = SiCやGaNより低損失で、低コストな新材料
→中耐圧の汎用品から高耐圧の特殊品まで、広い範囲へ応用可能。

低損失



高い絶縁破壊電界 (8 MV/cm)

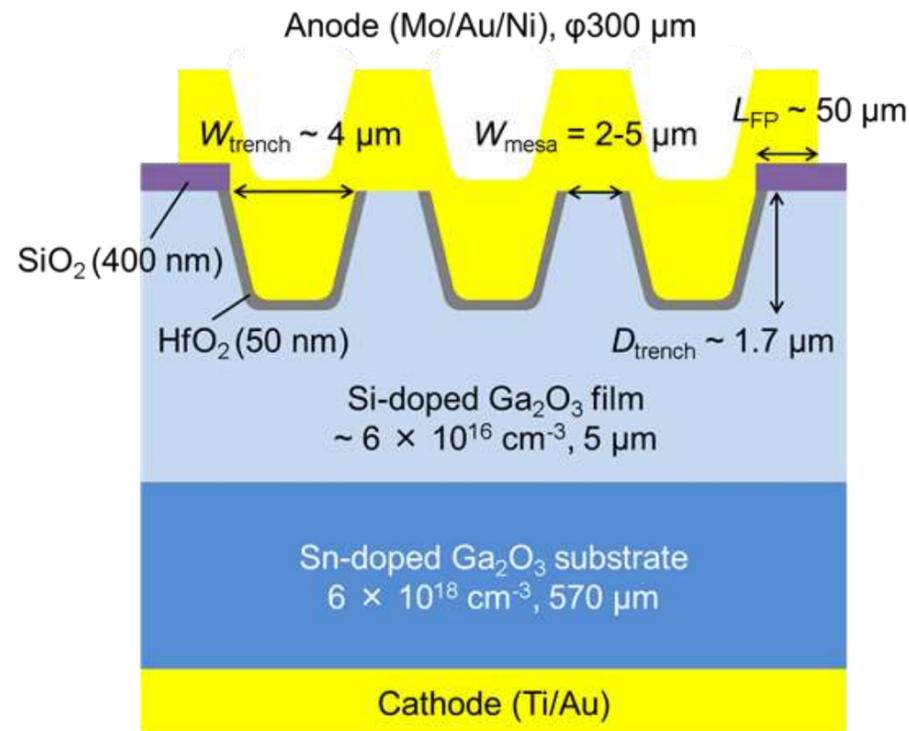
低コスト



単結晶育成方法の模式図

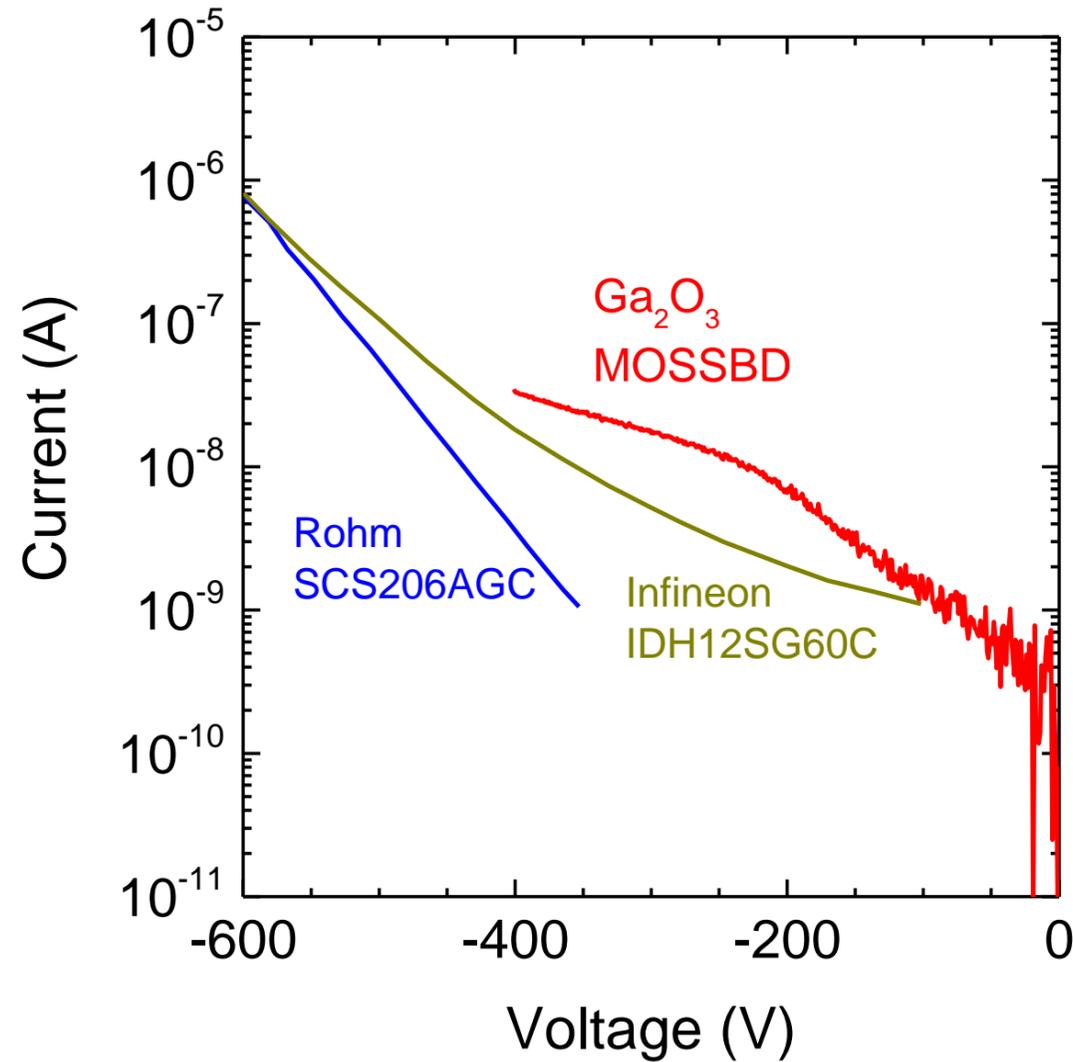
融液成長による高成長速度 (30 mm/h)

▪ これまでに超低損失 β - Ga_2O_3 SBDの開発に成功。

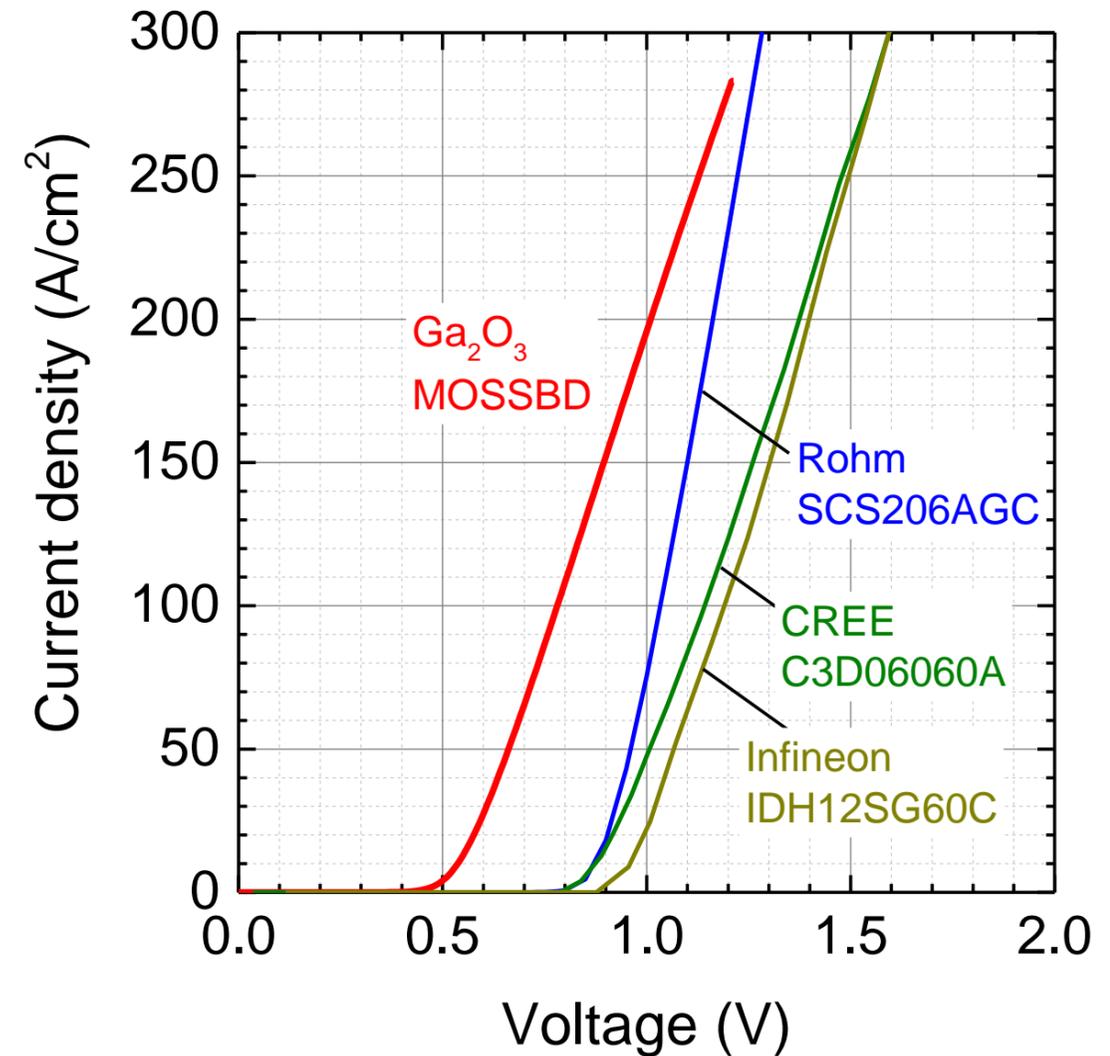


K. Sasaki *et.al.*, IEEE Electron Device Lett. **38**, 783 (2017).

β - Ga_2O_3 製SBD



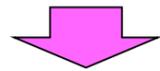
逆方向特性



順方向特性

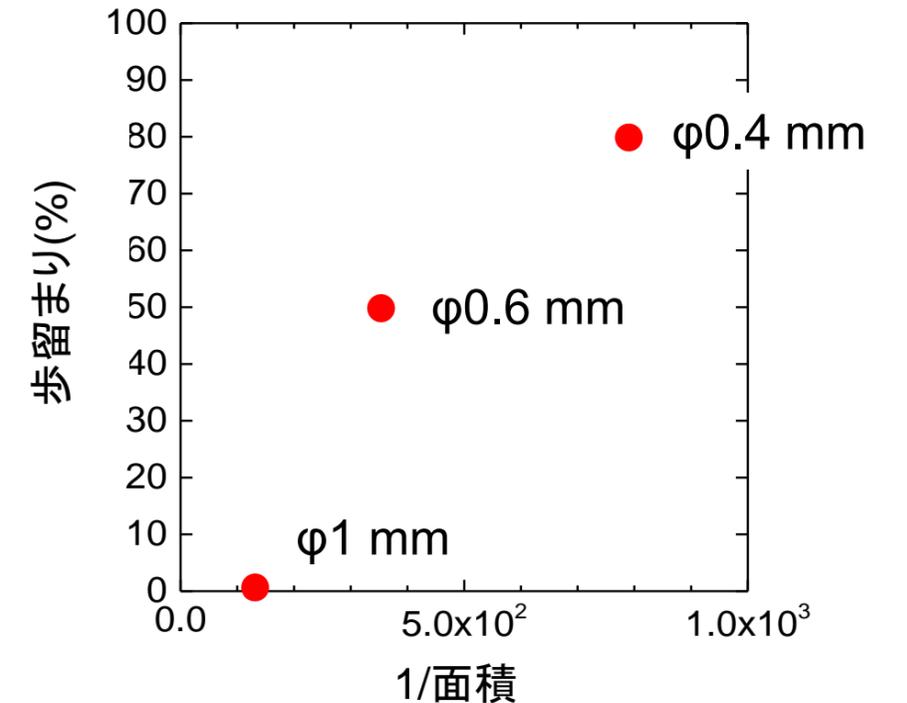
市販SiC製SBDと同等の逆方向リークレベルを維持したまま、
順方向電圧を30-40%低減。

- ・しかし、素子直径が0.4 mm程度の小さな素子でしか性能が発揮できず、素子直径1 mmでは逆方向リーク電流が増加して良品の歩留まりが0%に低下(右上図参照)してしまうという課題があった。
- ・エミッション顕微鏡観察により、電極直下にエミッションスポットが確認された。(右下図参照)



- ・ **10^3 /cm²程度のキラークラック¹⁾の存在を示唆。**
- ・ β -Ga₂O₃製SBDの製品化のためには、キラークラックの低減が必須。
- ・2019年度末までに基板およびエピ膜の高品質化により、**キラークラック密度を10 /cm²以下に低減する。**
- ・**2 mm角以上の大型素子を実現し、10 Aの電流値を実証する。**

1) デバイス特性を劣化させる欠陥



歩留まりの電極サイズ依存性



エミッション顕微鏡像

全体目標 (主目標)	達成目標(値)	開発当時の 技術レベル
<u>アンペア級ダイオードの実証</u>	オン抵抗5 mΩcm ² 以下、耐圧600 V、電流10 A以上。	オン抵抗8 mΩcm ² 、耐圧220 V、電流0.4 A。
研究課題目標	達成目標(値)	開発当時の 技術レベル
(1)キラー欠陥の評価技術の開発	評価手法を確立し、キラー欠陥の生成機構を解明する。	キラー欠陥の起源は全く明らかになっていない。
(2)キラー欠陥密度の低減	結晶育成技術、エピ技術、研磨技術の改善によりキラー欠陥密度1 × 10 ¹ /cm ² 以下のエピウエハを実現する。	エピのキラー欠陥密度7 × 10 ² /cm ² 。
(3)VB法高品質β-Ga ₂ O ₃ 結晶育成技術の開発	抵抗加熱VB法により、結晶の直径4“φ、長さ100 mm、転位密度10 ² /cm ² 以下。	高周波加熱VB法により、直径1”φ、長さ20 mm、転位密度10 ² /cm ² 。

技術開発責任者
倉又 朗人

ノベルクリスタルテクノロジー (NCT)

- ・キラークラックの評価
- ・エピ
- ・研磨
- ・ダイオードの実証

不二越機械工業 (FMC)

- ・VB法結晶育成

共同研究

佐賀大学

- ・キラークラックの評価

AGC

- ・研磨

TDK

- ・キラークラックの評価
- ・ダイオードの実証

共同研究

信州大学

- ・VB法結晶育成

協力機関: タムラ製作所、大陽日酸

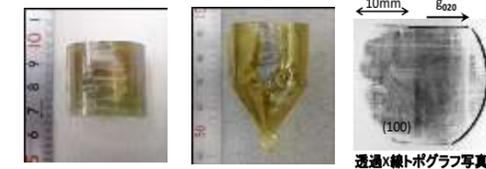
佐賀大学

キラークラックの評価



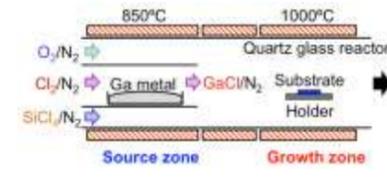
FMC & 信州大学

VB法結晶育成



NCT

エピ



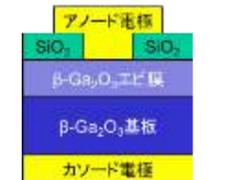
AGC

研磨



TDK

ダイオードの実証



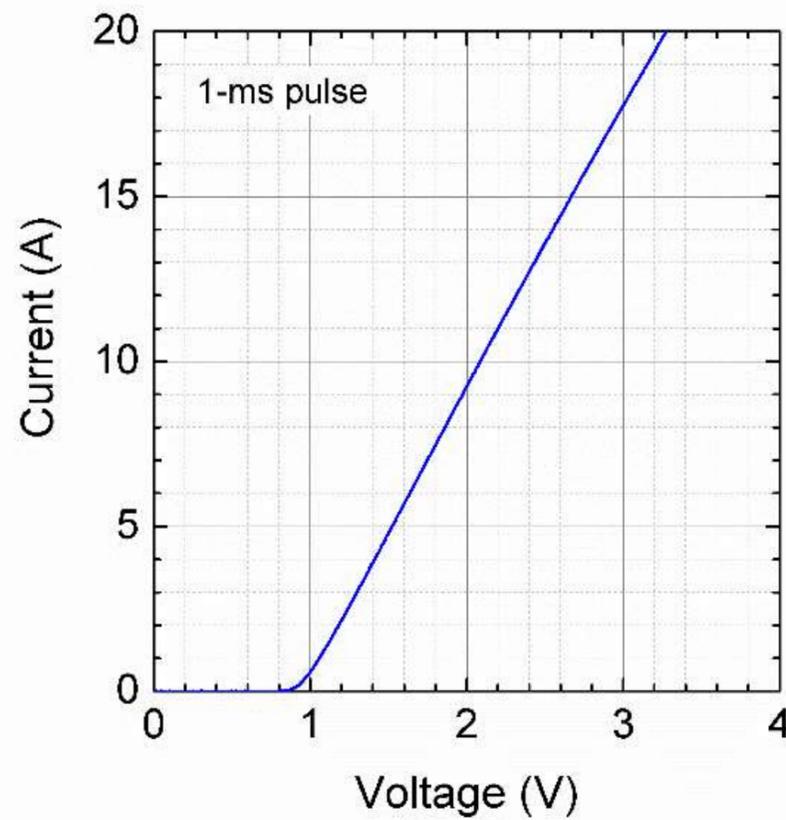
最終目標

耐圧600 V、電流10 A以上の
 β -Ga₂O₃製SBD

← 結晶・エピウエハ

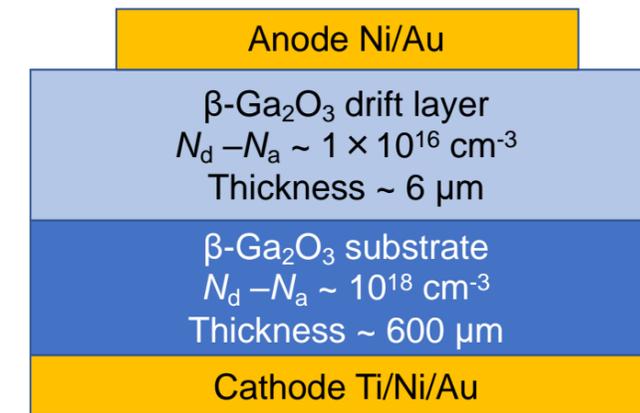
全体目標(主目標): アンペア級ダイオードの実証

まず、従来の結晶育成法であるEdge-defined Film-fed Growth (EFG) 法で作製した基板の上に、改良されたハライド気相エピタキシー (HVPE) 技術により、キラ欠陥密度を低減したエピを成膜し、2.3mm角の素子を作製した。

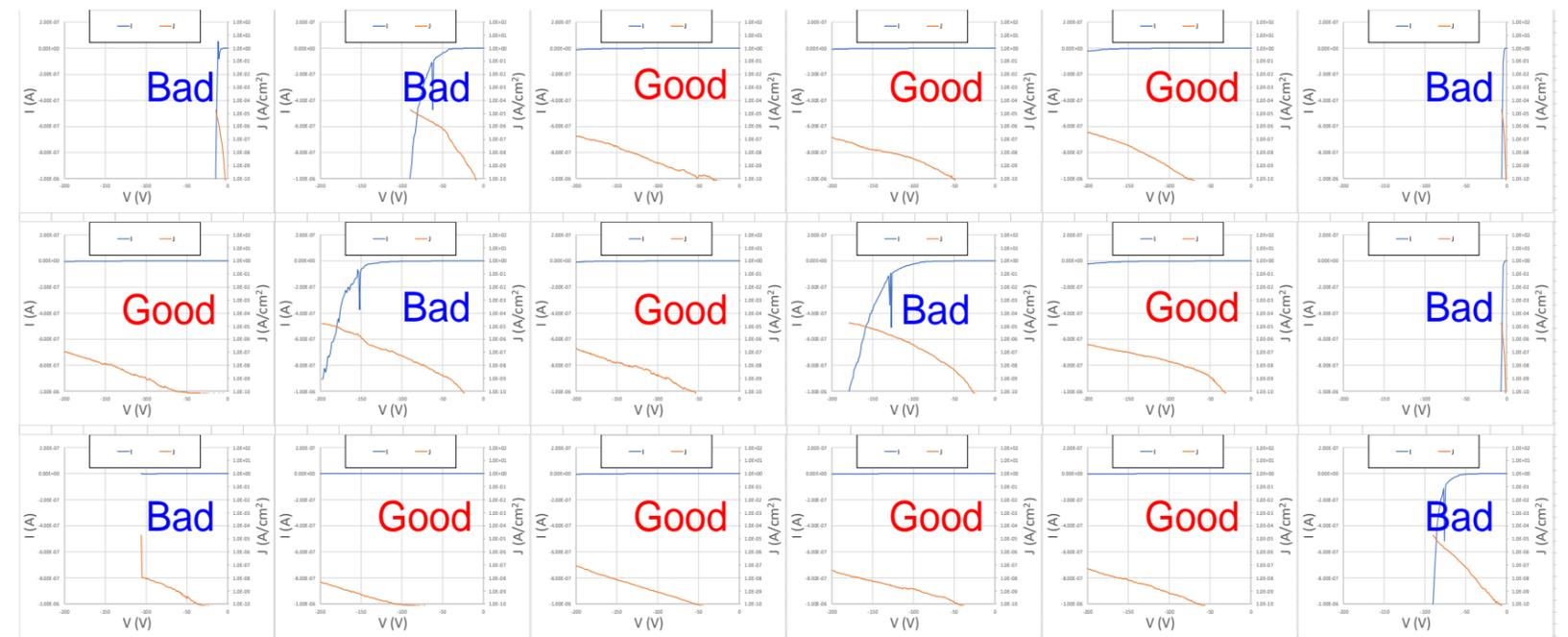


順方向特性。オン抵抗は $6 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ であり、**20 A** の大電流動作を確認できた。

目標値: オン抵抗 $5 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ 以下、耐圧 600 V、電流 10 A 以上。



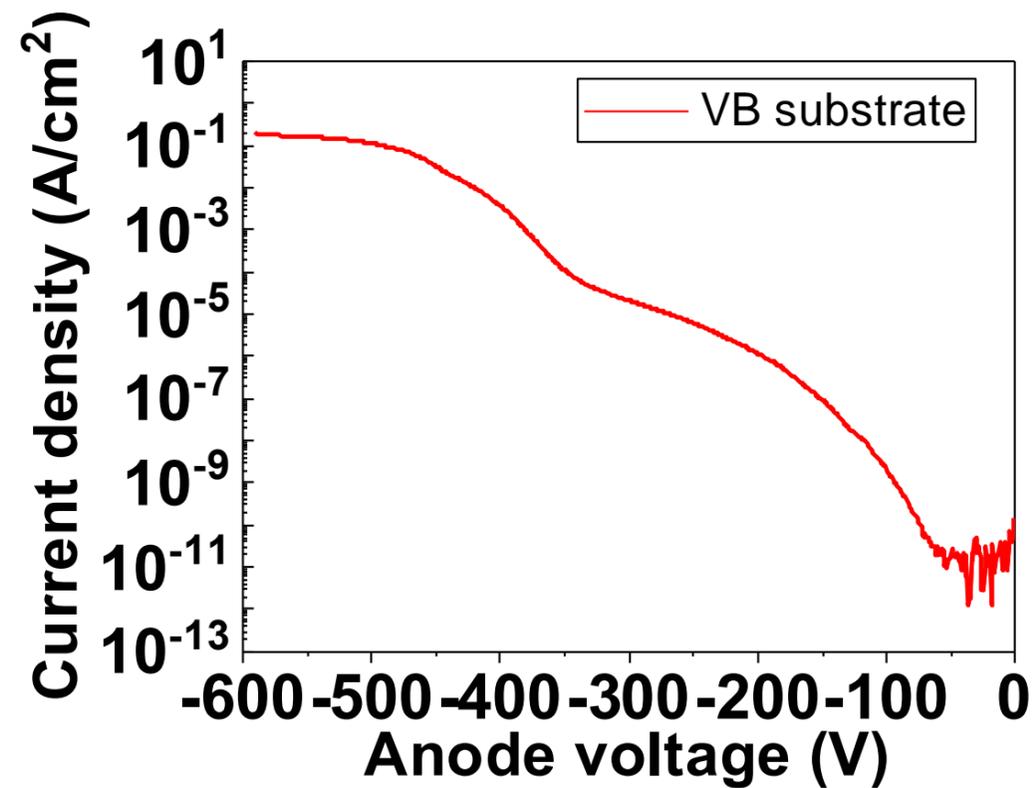
2.3 mm角素子の構造模式図。



逆方向特性のマップ。素子歩留りは56%であり、従来と比べて大きく改善した。推定されるキラ欠陥密度は $10 / \text{cm}^2$ であった。

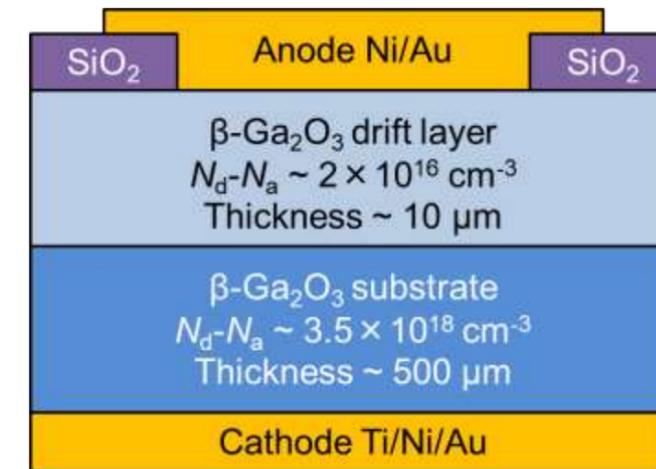
全体目標(主目標): アンペア級ダイオードの実証

次に、耐圧を上げるためフィールドプレート(FP)構造を付けた2.3mm角の素子を作製した。基板には今回開発したVB法で作製した低欠陥基板を用いた。

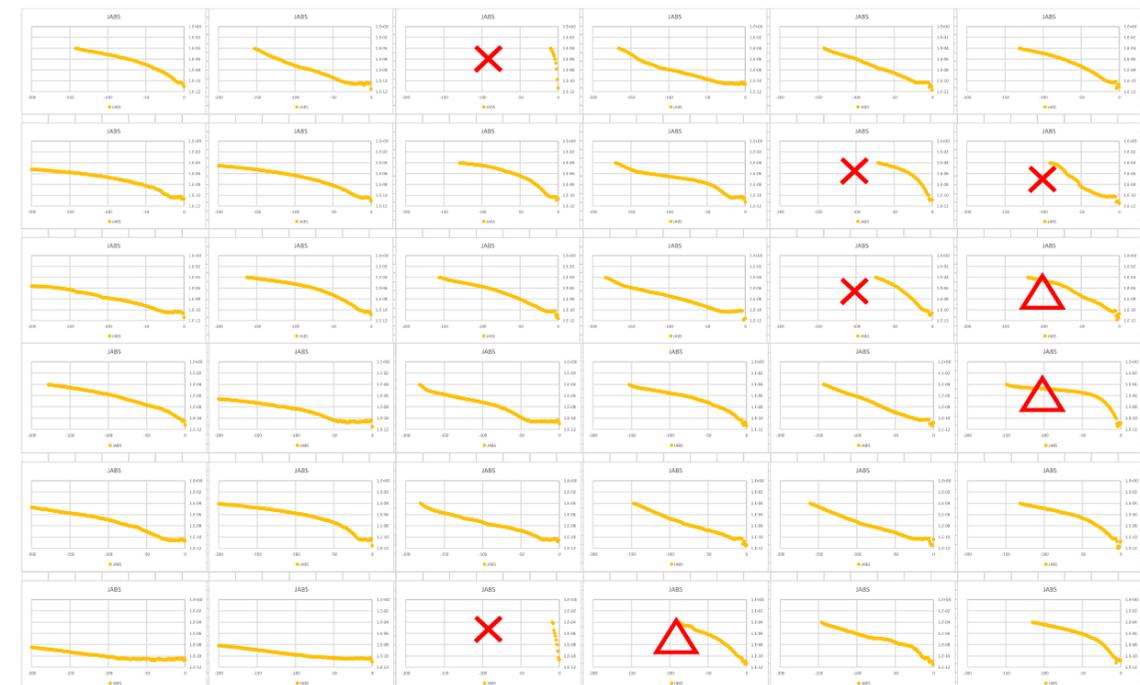


逆方向特性。耐圧590 Vが得られた。

目標: オン抵抗5 mΩcm²以下、耐圧600 V、電流10 A以上。



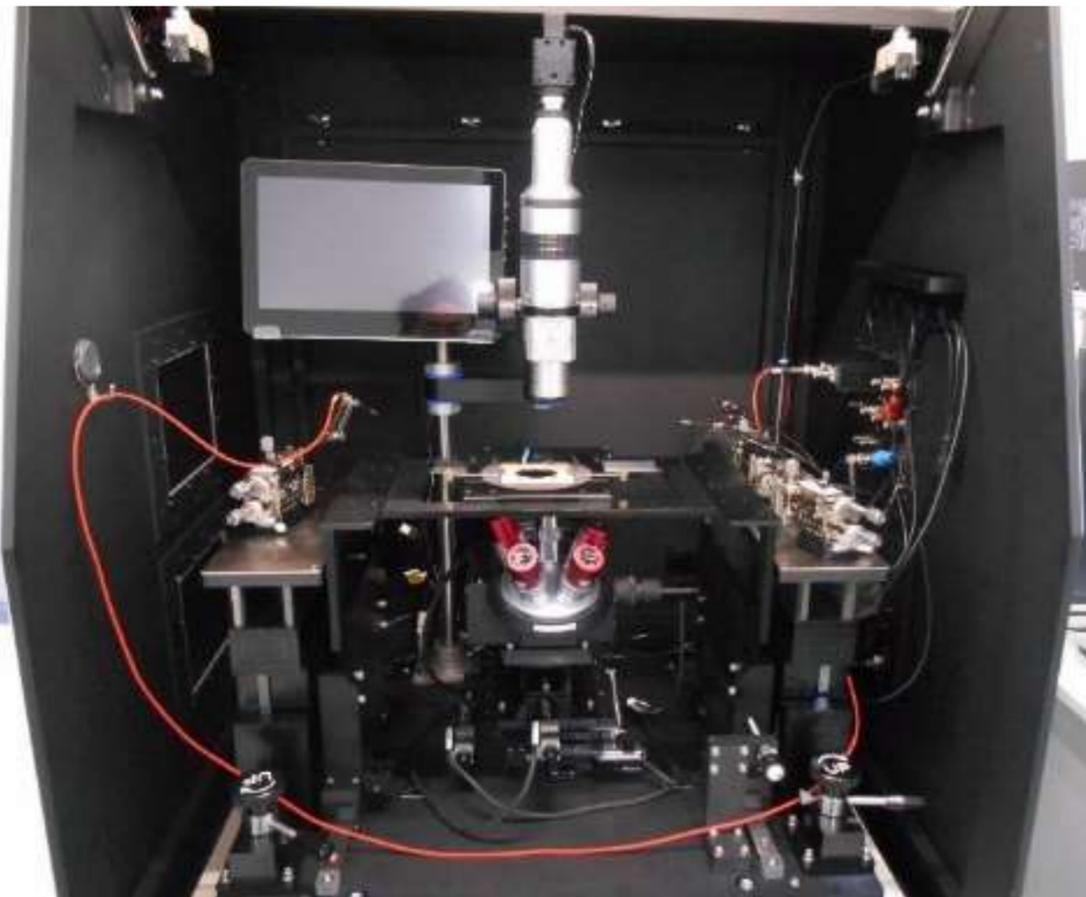
FP付き素子の構造模式図。



逆方向特性のマップ。素子歩留りは78%と更に改善した。推定されるキラークラック欠陥密度は5 /cm²であった。

個別目標(1)キラー欠陥の評価技術の開発

高感度エミッション顕微鏡を開発した。エミッションスポットの位置に何が存在するのかわ、エッチピット法、Atomic Force Microscope (AFM)法、X-rayトポグラフィ法、等の方法で調査した。右の表に欠陥の種類とその特定に至った手法をまとめる。



開発した高感度エミッション顕微鏡

目標:評価手法を確立し、キラー欠陥の生成機構を解明する。

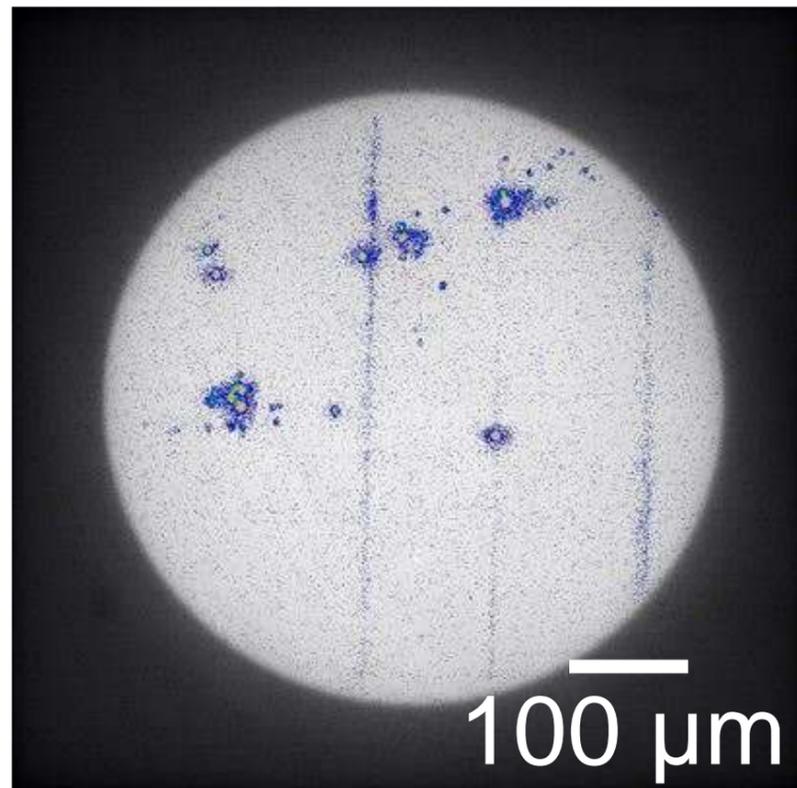
欠陥種類	特定手法等
気相反応粒子	エピ表面形状、エッチピット法により、気相から取り込まれるGaO粒子が異常成長の原因となることを確認。
潜傷由来の転位	エッチピット法により、基板表面の潜傷がエピ膜に貫通転位を生じさせることを確認。
濃度ムラ	SCFM法により、エピ膜表面に10 nm幅程度の線状のドナー濃度ムラが存在していることを確認。
貫通転位	エッチピット法により、エピ膜中に成長方向と平行の貫通転位が存在することを確認。
レジスト残渣	エミッション顕微鏡により、ショットキー電極直下のレジスト残渣がリークパスになることを確認。
CMPナノピット	AFMにより、エピ表面に微細なピットが存在することを確認。
酸素空孔	XPSにより、酸素空孔の量がSBD特性に影響を及ぼす可能性を確認。
積層欠陥	X線トポグラフィにより、基板中に積層欠陥が存在することが示唆されている。

欠陥の種類とその特定に至った手法

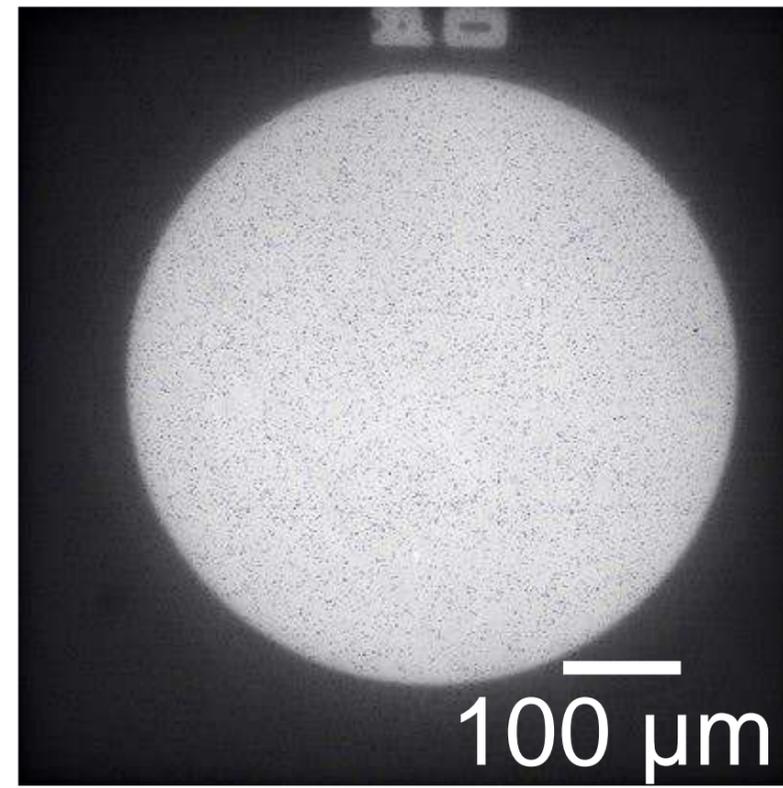
個別目標(2)キラーク陥密度の低減

目標: キラーク陥密度 $1 \times 10^1 / \text{cm}^2$ 以下。

HVPE法において、反応管の変更と、原料分圧等のエピ条件の改良を行うことによりエッチピット密度の低減を図った。全体目標の説明で述べたように改良HVPEエピのキラーク陥密度は $10 / \text{cm}^2$ であった。

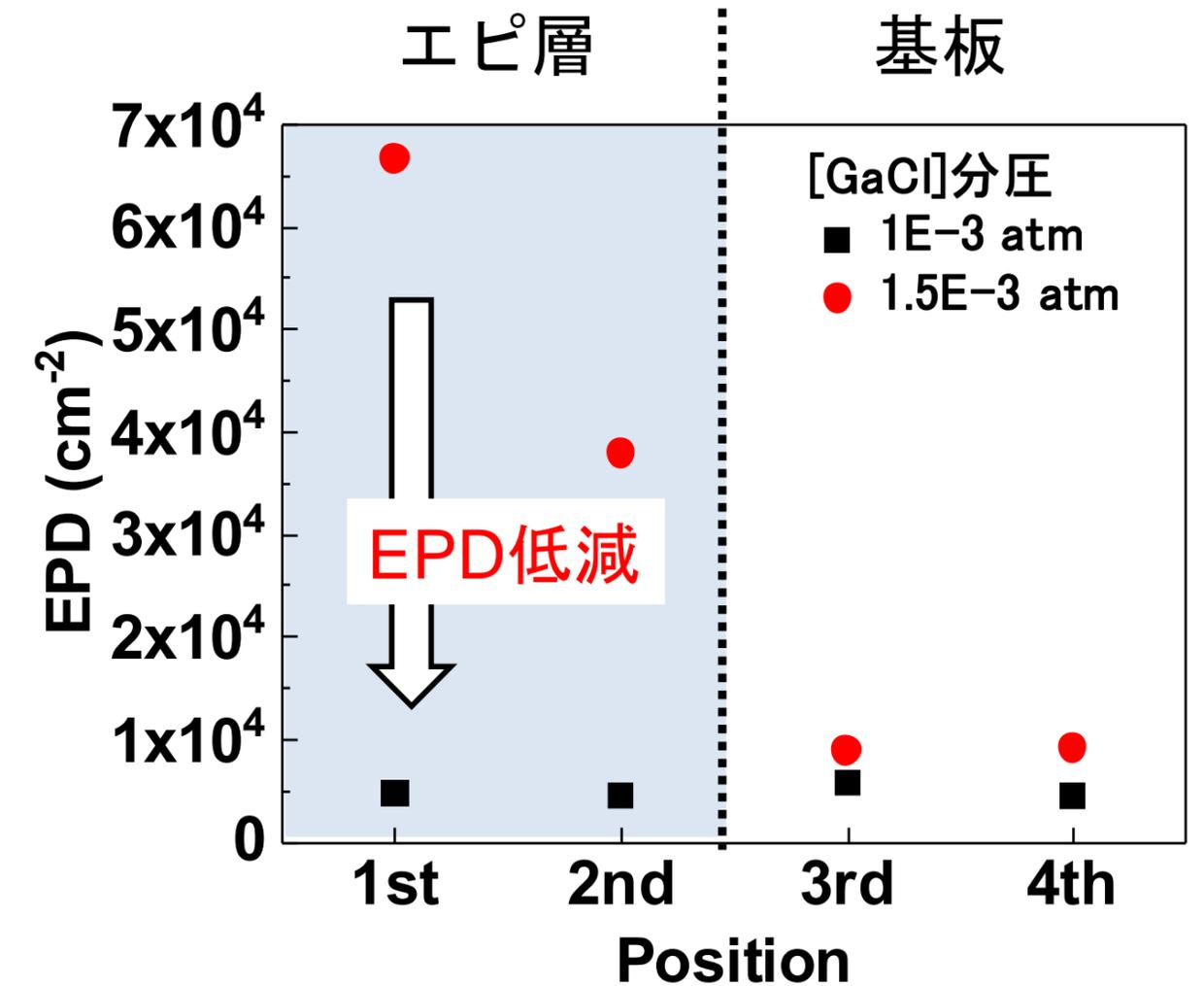


反応管A(従来)



反応管B(改良)

HVPE装置の反応管とエミッションスポットの関係。反応管を改良することによりエミッションスポットを低減できた。



エッチピット密度の深さ方向分布。GaCl分圧を下げることで、エピ層のEPDを基板と同等の値まで低減できた。

個別目標(3)VB法高品質 β -Ga₂O₃結晶育成技術の開発 目標:結晶の直径4"φ、長さ100 mm、転位密度 10^2 /cm²以下。

従来の高周波加熱式VB法よりも大型結晶の育成に適した抵抗加熱式VB装置の開発を行った。



抵抗加熱式VB装置



φ2 inch 単結晶 φ3 inch 単結晶(1回目) φ3 inch 単結晶(2回目)

VB法で育成したφ2-、φ3-inch β -Ga₂O₃単結晶。長さ50 mm。結晶の約半分の領域で転位密度 10^2 /cm²以下であった。

全体計画	最終目標(値)	開発当時の技術レベル	到達レベル
アンペア級ダイオードの実証	オン抵抗5 mΩcm ² 以下、耐圧600 V、電流10 A以上。	オン抵抗8 mΩcm ² 、耐圧220 V、電流0.4 A。	ほぼ達成。 オン抵抗6 mΩcm ² 以下、耐圧590 V、電流20 A。
個別研究項目	最終目標(値)	開発当時の技術レベル	到達レベル
(1)キラ欠陥の評価技術の開発	評価手法を確立し、キラ欠陥の生成機構を解明する。	キラ欠陥の起源は全く明らかになっていない。	達成。 キラ欠陥の発生要因が複数あることを明らかにし、それらをリストアップした。
(2)キラ欠陥密度の低減	結晶育成技術、エピ技術、研磨技術の改善によりキラ欠陥密度1×10 ¹ /cm ² 以下のエピウエハを実現する。	エピのキラ欠陥密度7×10 ² /cm ² 。	達成。 キラ欠陥密度1×10 ¹ /cm ² 。
(3)VB法高品質β-Ga ₂ O ₃ 結晶育成技術の開発	抵抗加熱VB法により、結晶の直径4"φ、長さ100 mm、転位密度10 ² /cm ² 以下。	高周波加熱VB法により、直径1"φ、長さ20 mm、転位密度10 ² /cm ² 。	ほぼ達成。 直径3"φ、長さ50 mm、転位密度10 ² /cm ² 以下(半分程度の領域)

●特許
出願4件

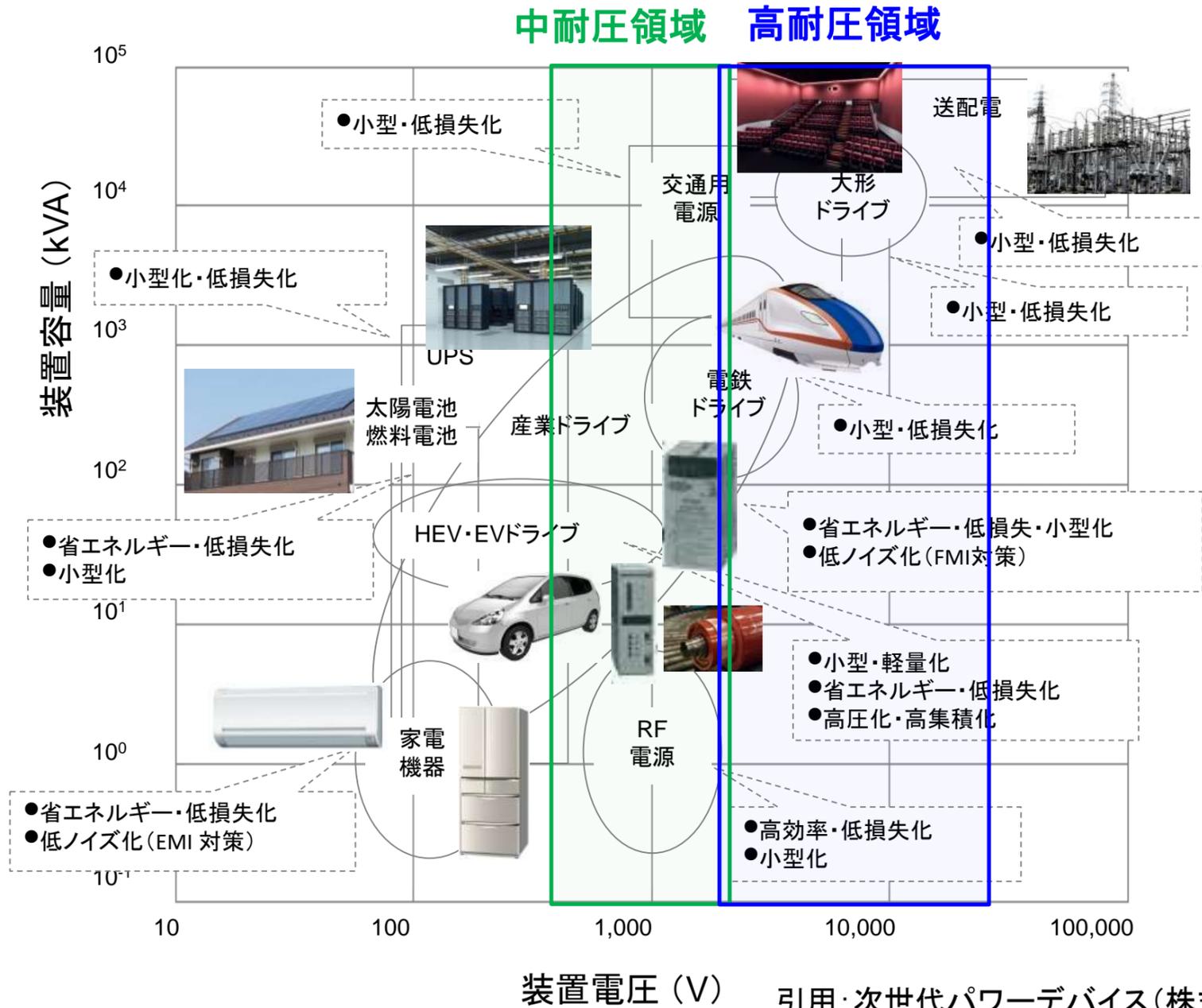
●論文、学会、新聞発表、展示会

種類:件数	日付	論文誌名、学会名 等	発表テーマ
論文:4件	2019/11/30	嘉数 誠、他 放射光学会 Nov. 2019 Vol.32 No.6、285	パワー半導体デバイス応用を目指したダイヤモンド、酸化ガリウムのシンクロトンX線トポグラフィ観察
	2020/5/20	K. Hoshikawa他 Journal of Crystal Growth 545 (2020) 125724 (件数多いため、残りのリストは省略)	2-inch diameter (1 0 0) β -Ga ₂ O ₃ crystal growth by the vertical Bridgman
学会:23件	2019/8/13	2019 IWGO (International Workshop on Gallium Oxide and related materials)	Relation between Emission Spots and Reverse Leakage Current in HVPE (001) β -Ga ₂ O ₃ Schottky Barrier Diodes
	2018.10.31	第47回結晶成長国内会議 (件数多いため、残りのリストは省略)	VB法 β -Ga ₂ O ₃ 単結晶の育成と(100)面ウェーハ加工
新聞:1件	2020/1/16	信濃毎日新聞、1/4ページ、6面	次世代半導体材料 低コストで
展示会:11件	2019/5/7	PCIM2019(ニュルンベルク) (件数多いため、残りのリストは省略)	

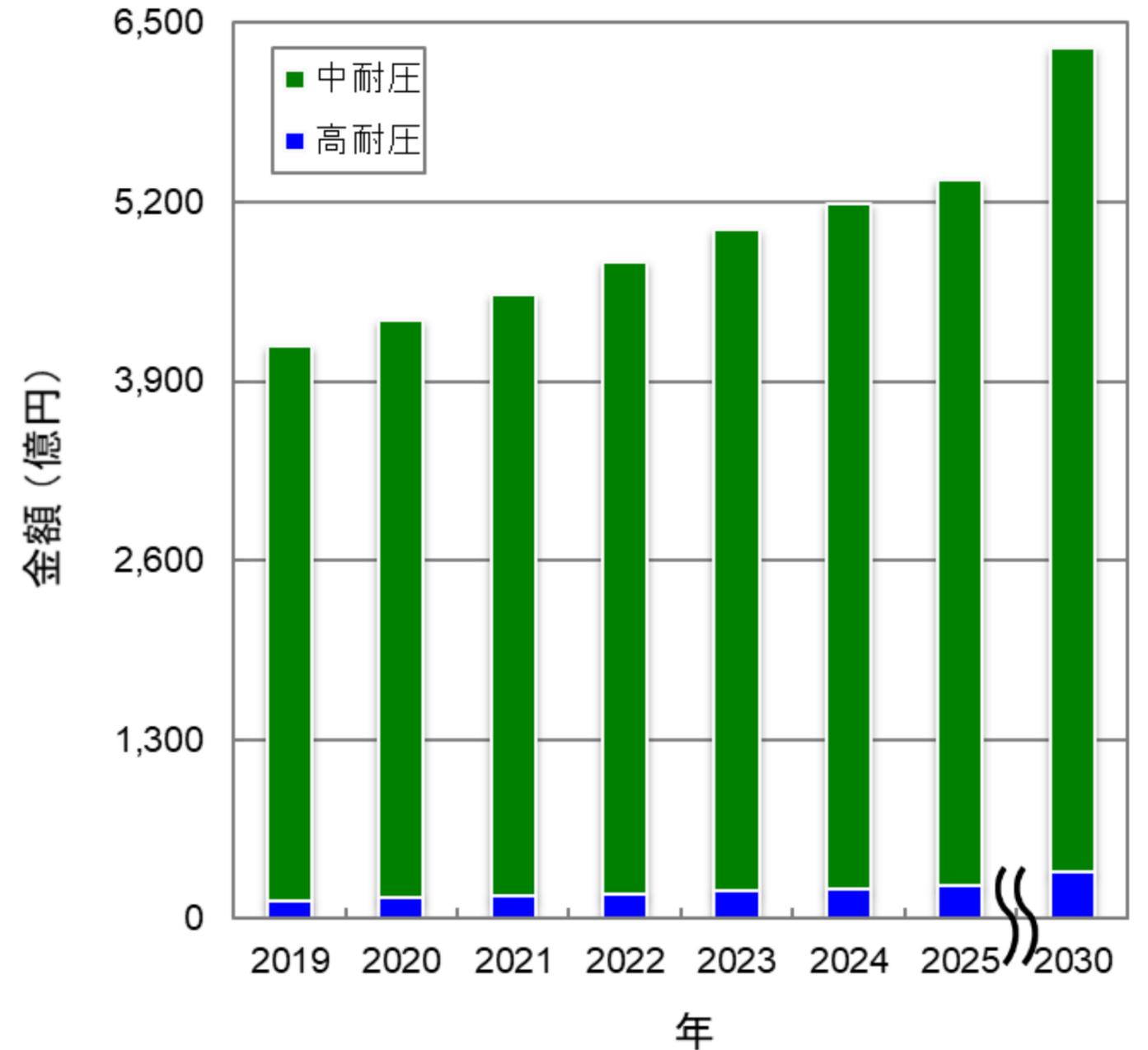
H30	H31/R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
<p>NEDO 戦略的省エネ (実用化開発) ・アンペア級酸化ガリウム パワーデバイスの開発 (キラ欠陥の低減)</p>		<p>NEDO 戦略的省エネ (実証開発) ・β-Ga₂O₃SBDの製 品化開発</p>		<p>2019年度にインキュベーションとして 大陽日酸が単独申請。</p>				
<p>NEDO 戦略的省エネ (インキュベーション/実用化開発) ・大口径量産型エピ成膜装置の研究開発 大陽日酸と共同</p>				<p>自主開発 ・4インチ・6インチ大口径基板 (信州大学、AGCと共同) ・実装技術 (タムラ製作所と共同)</p>				
		<p>製品設計</p> <hr/> <p>設備投資</p>						
		<p>生産ライン立上げ</p>		<p>生産</p>				
		<p>▲</p>		<p>販売</p>				
		<p>サンプル出荷</p>		<p>収益発生</p>				

ターゲットとする市場

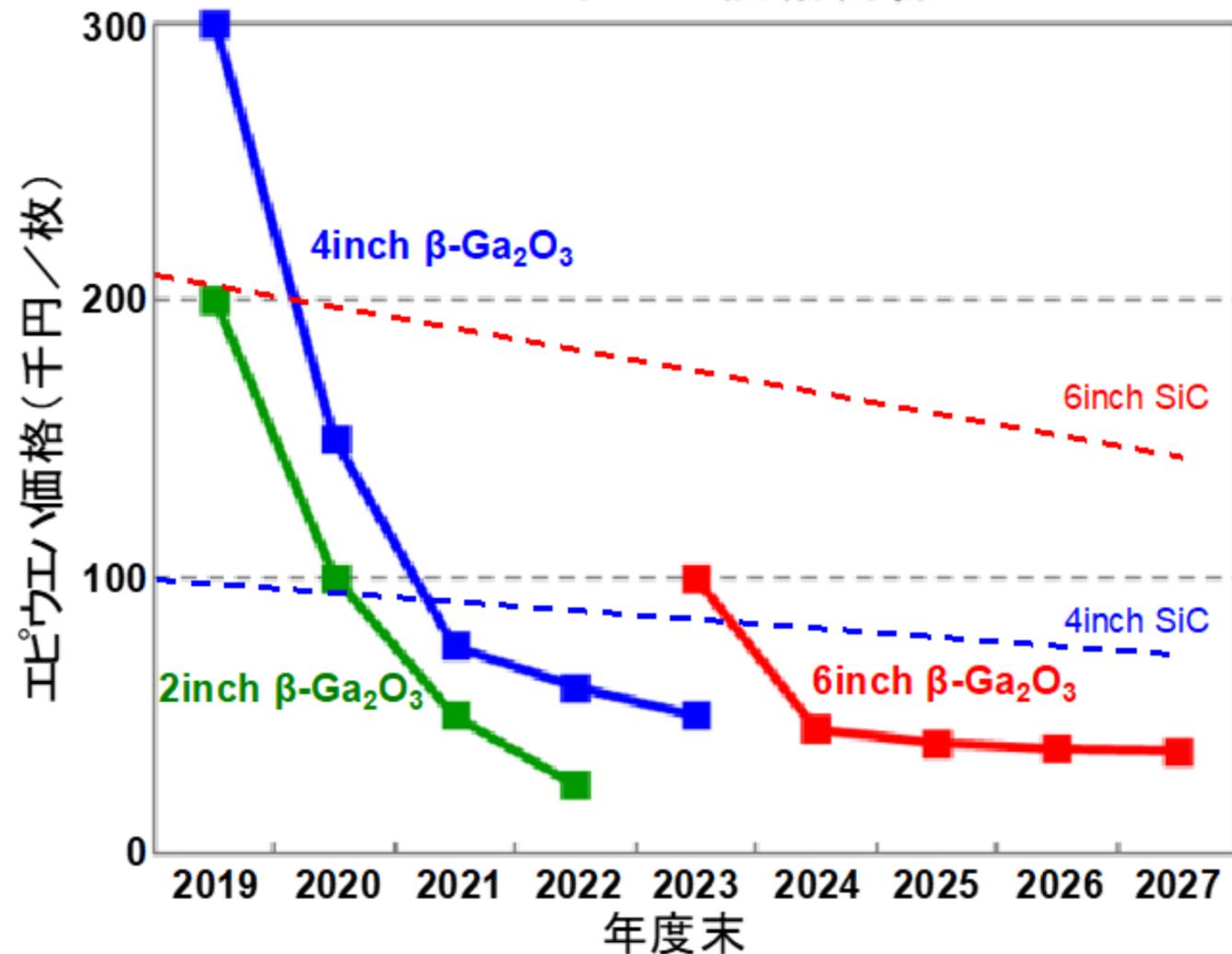
中・高耐圧、低スイッチング損失



市場規模推移予測



●エピウエハとSBDの目標価格



	β -Ga ₂ O ₃ SBD	SiC SBD	Si FRD
耐圧(V)	600	600	600
電流(A)	10	14	10
エピウエハ価格 (円)	40,000 (6インチ)	150,000 (6インチ)	10,000 (8インチ)
プロセスコスト(円)	20,000	20,000	20,000
チップ面積(cm ²)	3.3×10^{-2}	5×10^{-2}	7.2×10^{-2}
製造歩留まり(%)	80	80	95
アンペア単価(円)	2.0	5.6	0.9

SiCの1/3の価格を目標とする

- ・ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は、低損失性と低コスト性を併せ持つ新しいパワーデバイス用半導体材料である。
- ・ウエハ中のキラーク陥密度を2桁低減し、電流20Aの大電流SBDを実証した。
- ・抵抗加熱VB法により $\phi 3\text{-inch}$ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶を実証した。
- ・2021年度に $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBDのサンプル出荷、2022年度に販売開始を予定している。
- ・ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ エピウエハ、SBDは、将来的に、SiCの3分の1の価格を目指す。

