

車載用パワーデバイスの進展と課題

グリーンパワー山本研究所 (GPY研究所) 所長
FTB研究所 特別顧問
パワーデバイスイネーブリング協会 (PDEA) 理事
千葉工業大学 非常勤教員、研究員

山本秀和

yamamoto.hidekazu@it-chiba.ac.jp

1. 車載用パワーデバイスの進展
2. SiCパワーデバイスの課題
3. その他のパワーデバイスの進展と課題
4. パワーデバイス業界の今後の展望
5. まとめ

1. 車載用パワーデバイスの進展
2. SiCパワーデバイスの課題
3. その他のパワーデバイスの進展と課題
4. パワーデバイス業界の今後の展望
5. まとめ

プリウスPCU (Power Control Unit) の進展



回生用IPM
PM200CVB060
(三菱電機)



モータ駆動IPM
PM600CVB060
(三菱電機)

初代プリウス

アルミニウムワイヤー



昇圧コンバータ
PM400DJA120
(三菱電機)



回生用

モータ
駆動用

トヨタ内製インバータ

第2世代プリウス



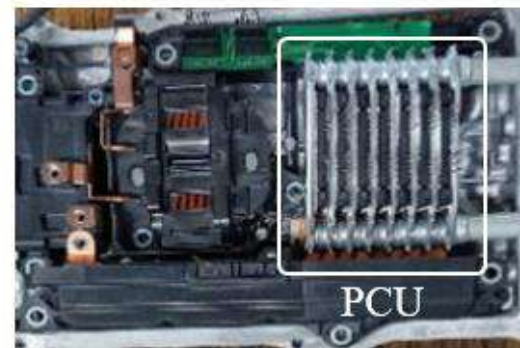
IPM: Intelligent Power Module

アルミニウムリボン

回生用インバータ

昇圧コンバータ モータ駆動用インバータ

第3世代プリウス



PCU



パワーカード

第4世代プリウス

GPY研究所

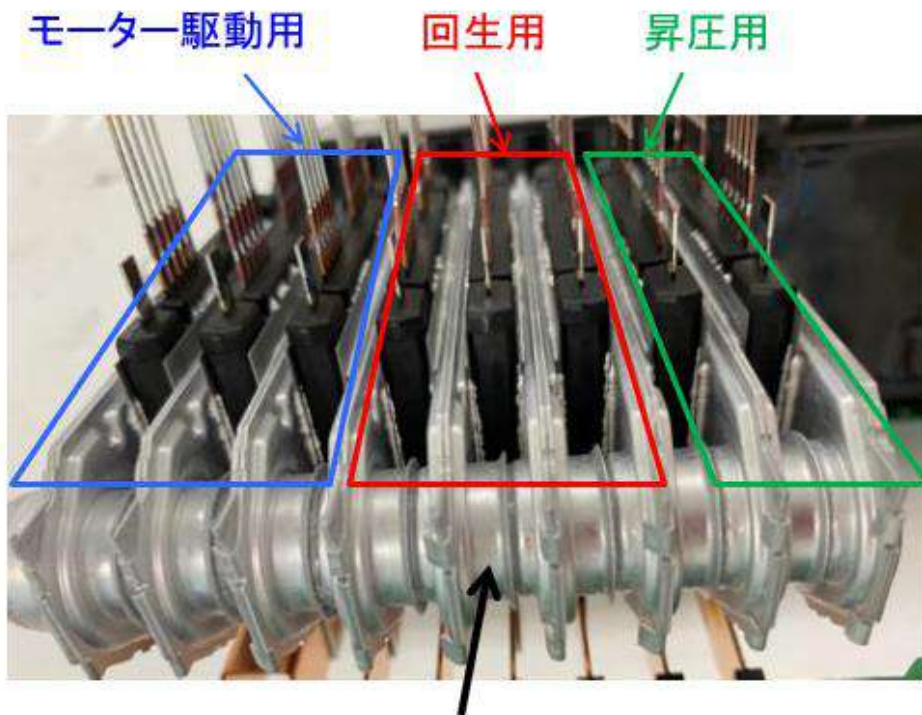
Green Power Yamamoto Lab.

FTBI
FTB Research Institute CO., LTD.

POEA
POWER DEVICE ENABLING ASSOCIATION

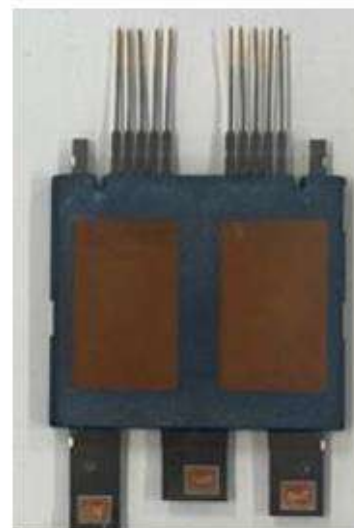
千葉工業大学
CHIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

両面冷却機構



水冷用パイプ(手前と奥にある)

ヤリス搭載パワーコントロールユニット



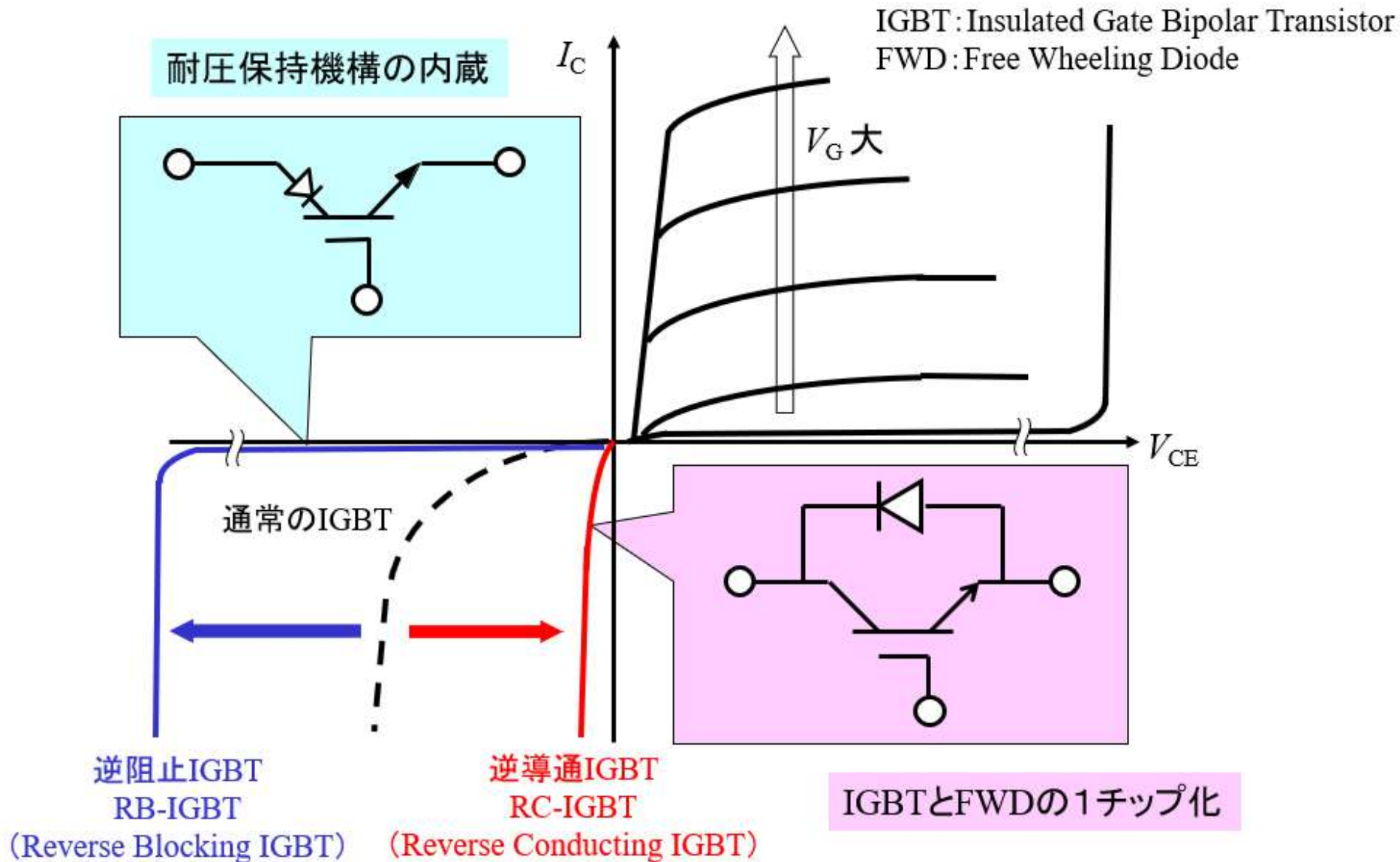
第4世代プリウス
パワーカード



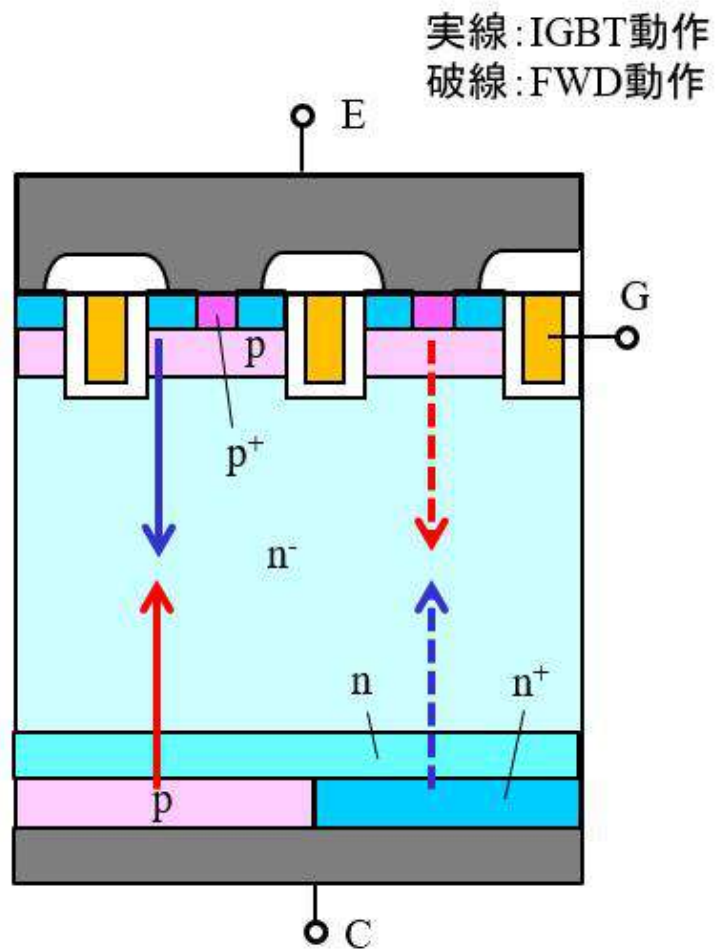
ヤリス搭載
パワーカード

パワーカード

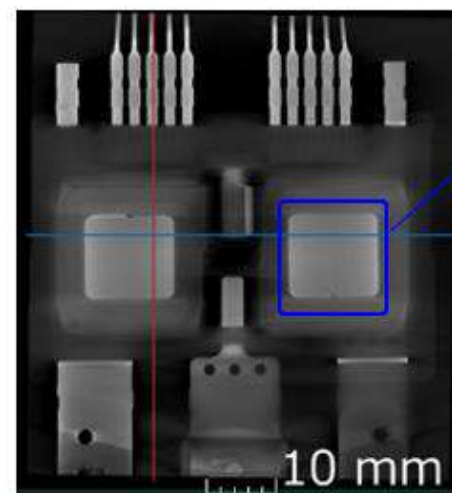
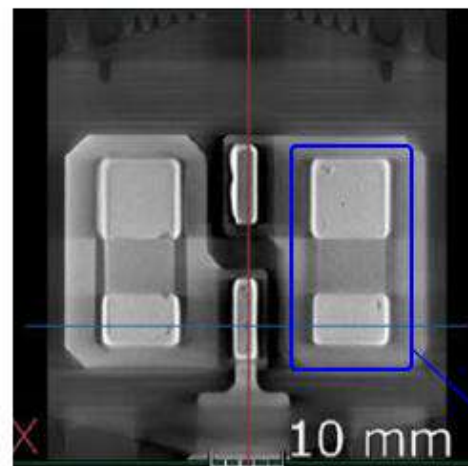
Si-IGBTの多機能化



RC-IGBTの構造と動作、解析結果



RC-IGBTの構造と動作



パワーカードのX線CTによる解析

電気自動車の世界の普及状況

PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle
BEV: Battery Electric Vehicle

Global electric car stock, 2010-2021



IEA. All rights reserved.

充電式電動自動車の普及状況

出展:「Global EV Outlook 2022」IEA(国際エネルギー機関)

GPY研究所

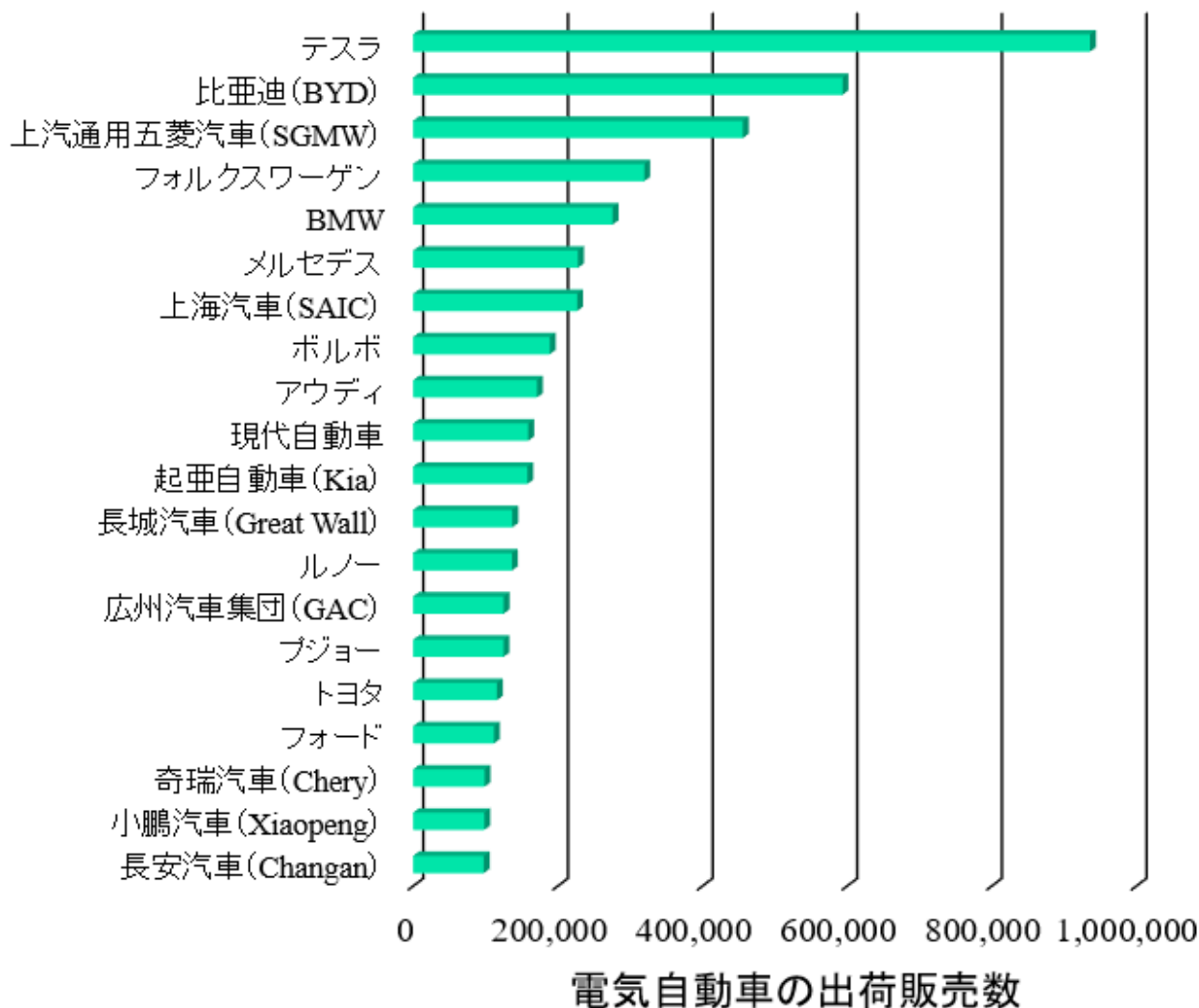
Green Power Yamamoto Lab.

FTBI
FTB Research Institute CO., LTD.

POEA
POWER DEVICE ENABLING ASSOCIATION

千葉工業大学
CHIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

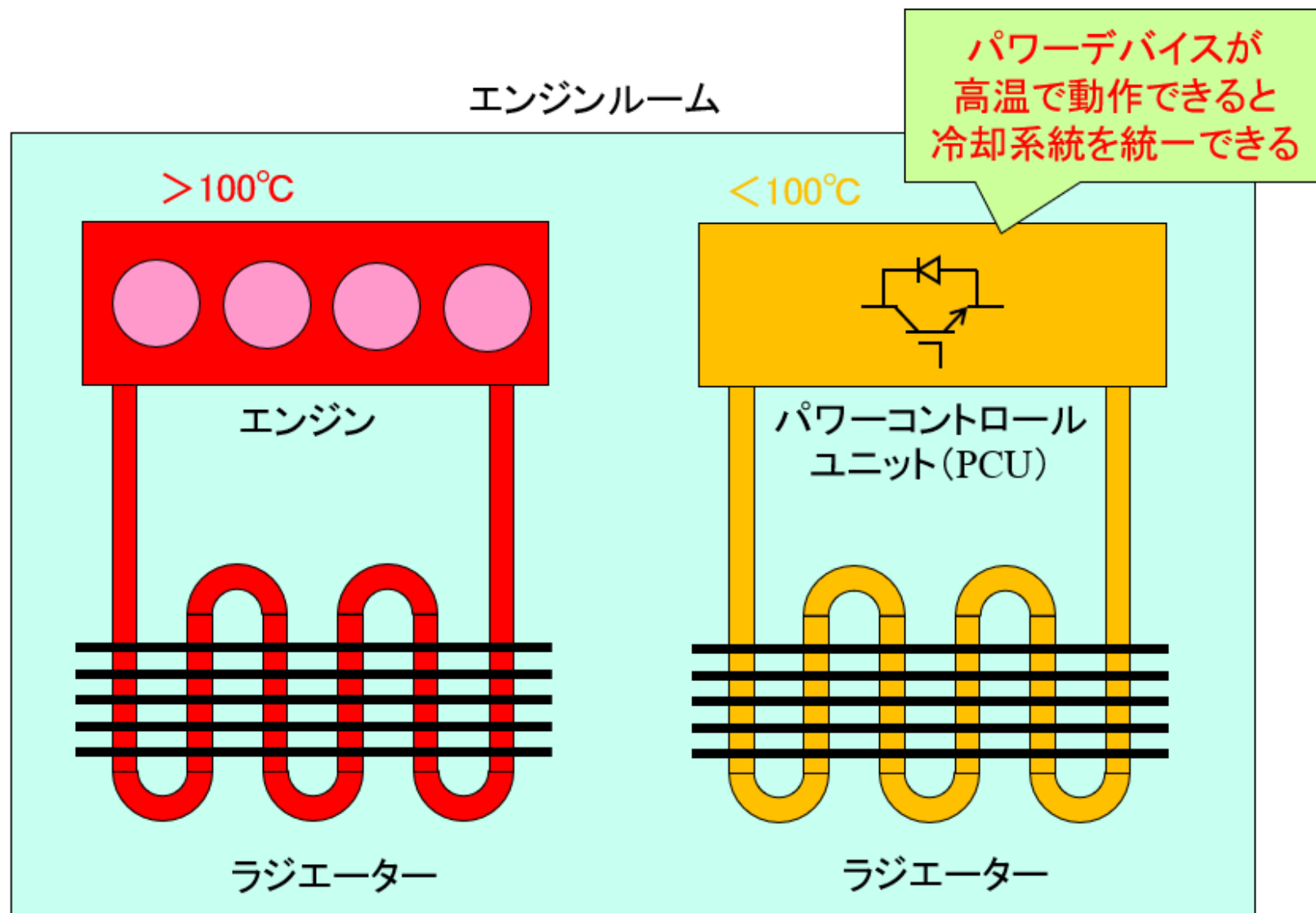
電気自動車の出荷



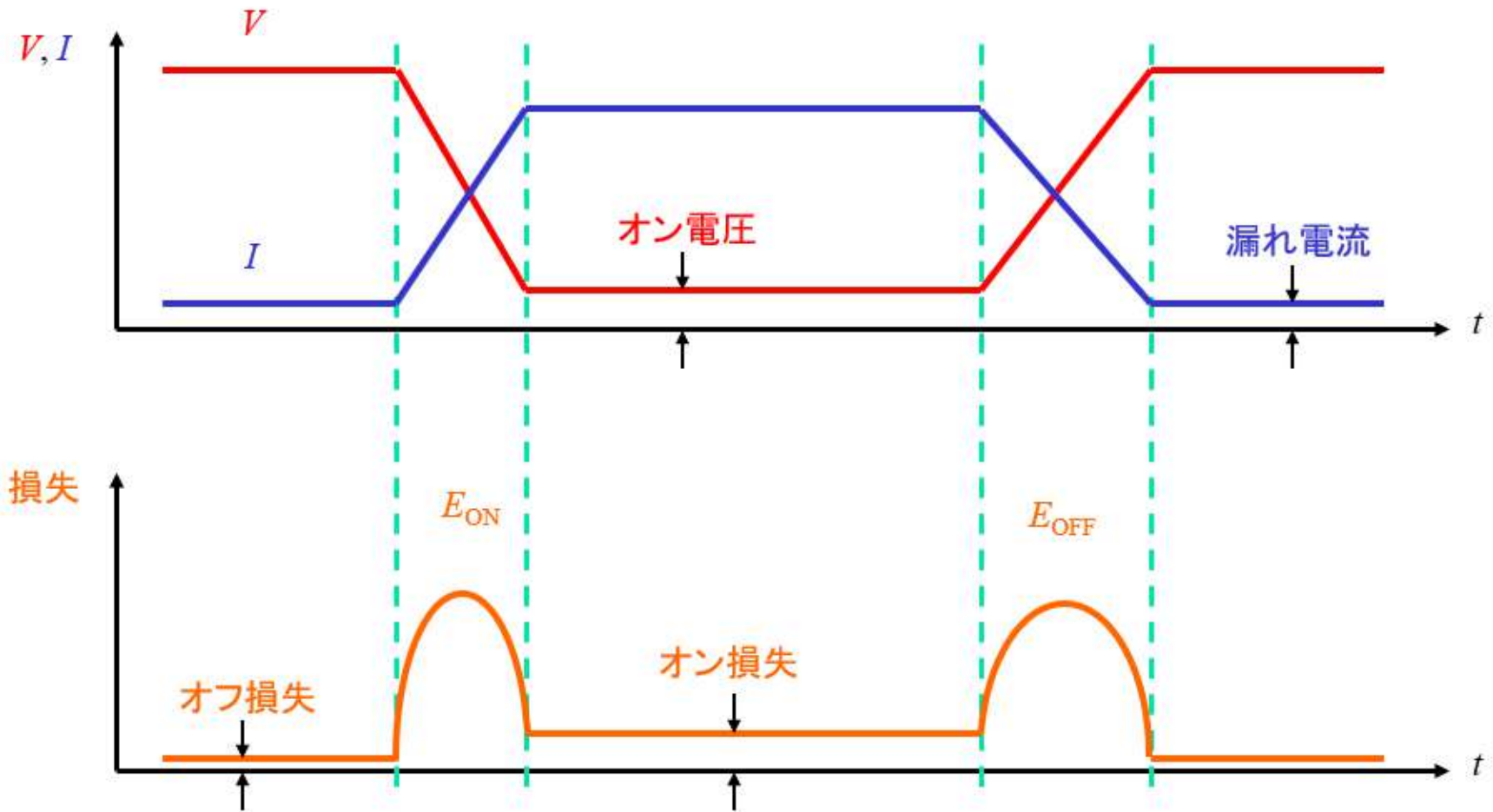
- ・欧米、中国では電気自動車の普及が急速に進んでいる。
- ・欧米、中国では、SiCの車載適用が始まっている。
- ・欧米、中国は、充電インフラも同時に充実させている。
- ・日本は完全に出遅れている。

Clean Technicaのデータを元に山本が作成

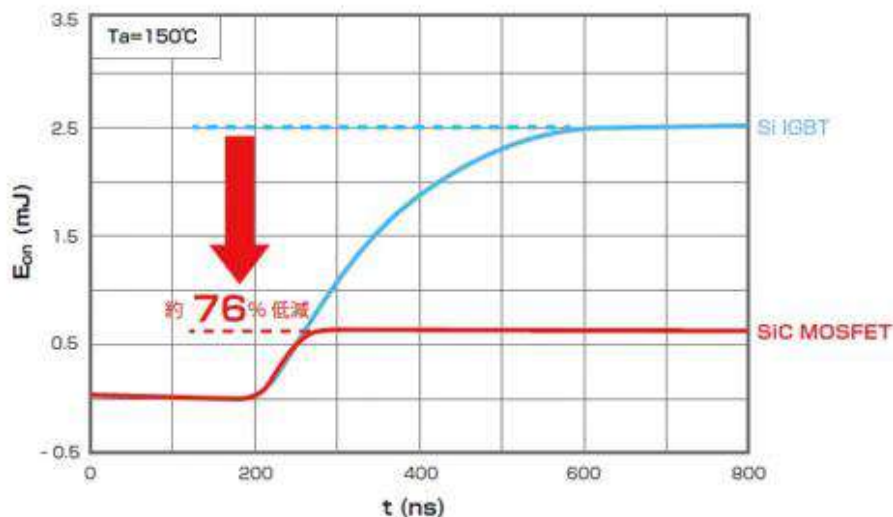
以前のSiCデバイスへの期待



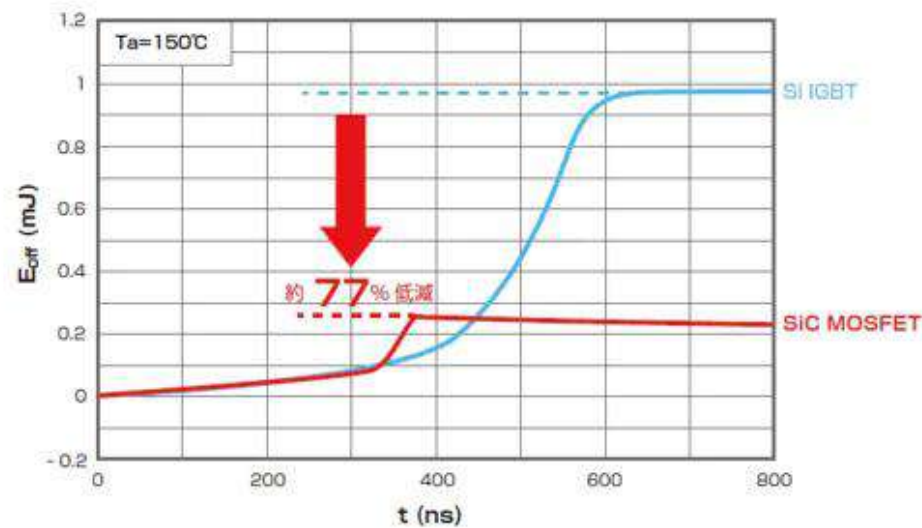
パワーデバイスの損失



最近のSiCパワーデバイスへの期待と要求



(a) E_{on}



(b) E_{off}

Si-IGBTとSiC-MOSFETのスイッチング損失の比較

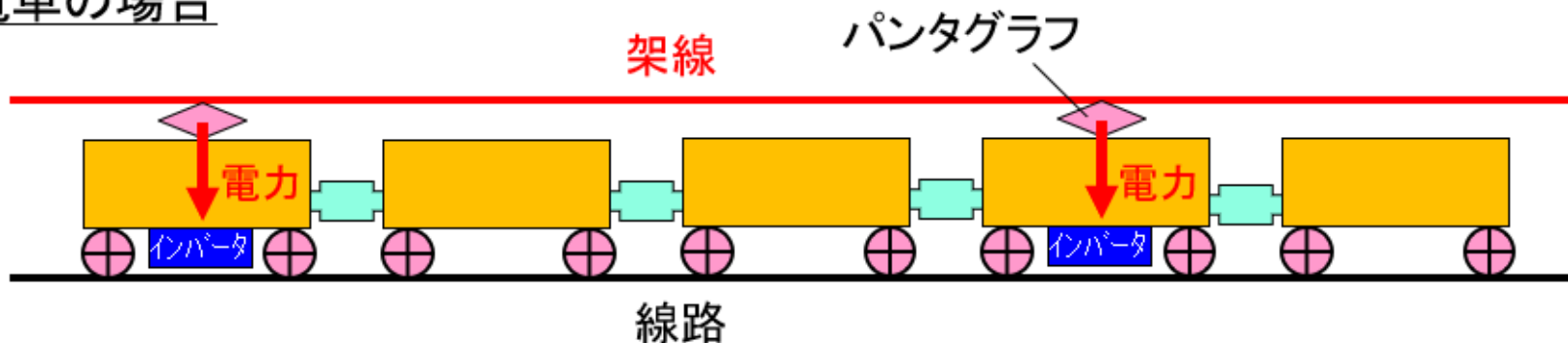
出展: 東芝デバイス&ストレージ殿ホームページ

SiCパワーデバイスの最大のメリットはスイッチング損失の低減

1. 車載用パワーデバイスの進展
2. SiCパワーデバイスの課題
3. その他のパワーデバイスの進展と課題
4. パワーデバイス業界の今後の展望
5. まとめ

電車と電気自動車の違い

電車の場合



電車(複数台連結して走行)の場合、1台のインバータが故障しても、充分走行可能。

電気自動車の場合

電気自動車の場合、1台のPCUでモータ駆動して、走行している。

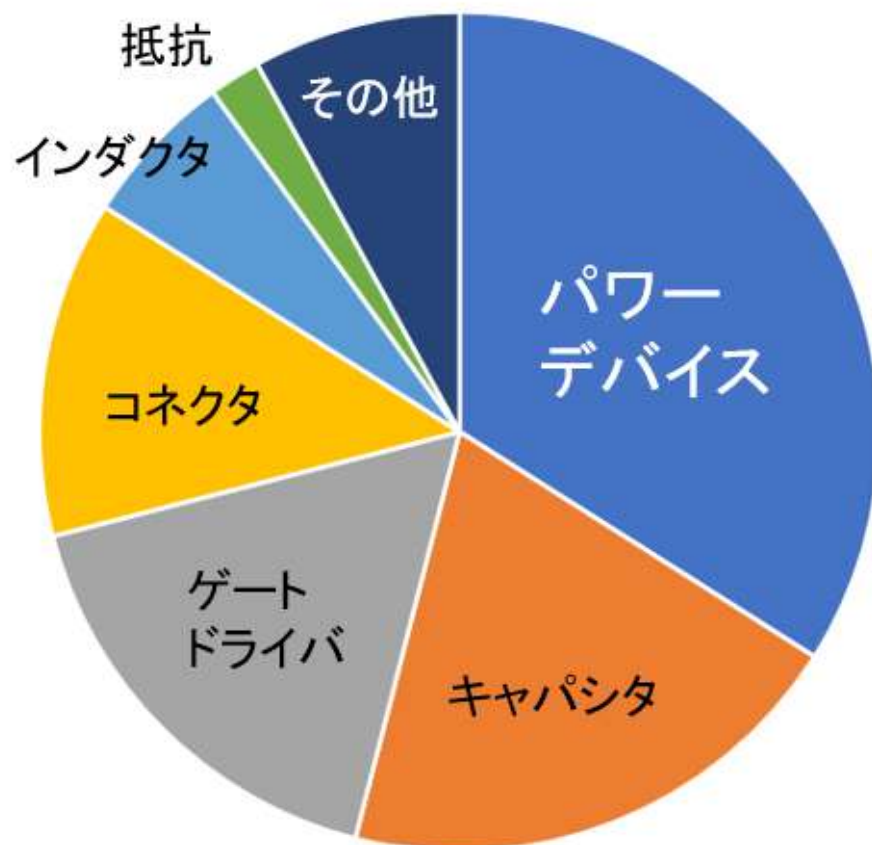


PCUの故障は、**重大な人身事故**につながる。

ハイブリッド車であれば、エンジンでの走行が可能



パワエレ機器の故障要因



パワエレ機器の故障要因



S. Yang et al., IEEE Trans. Ind. Appl., 47 pp.1441-1451(2011)
のデータを元に山本が作成

ゲート酸化膜の信頼性

SiC-MOS構造におけるゲート酸化膜信頼性劣化要因

ゲート酸化膜にかかる電界が高い

- ・オフ時 ⇒ ドリフト層に高電界
- ・オン時 ⇒ ゲート電圧が高い

⇒ ゲート酸化膜の絶縁破壊

熱処理温度が高い

⇒ 表面ラフネスの増加

昇華法

⇒ 高密度の結晶欠陥

⇒ ゲート酸化膜の信頼性劣化

MOSFETはSBDと比較して、
格段に危うい条件下で動作

バイポーラ動作による不良

SiCにおけるバイポーラ劣化

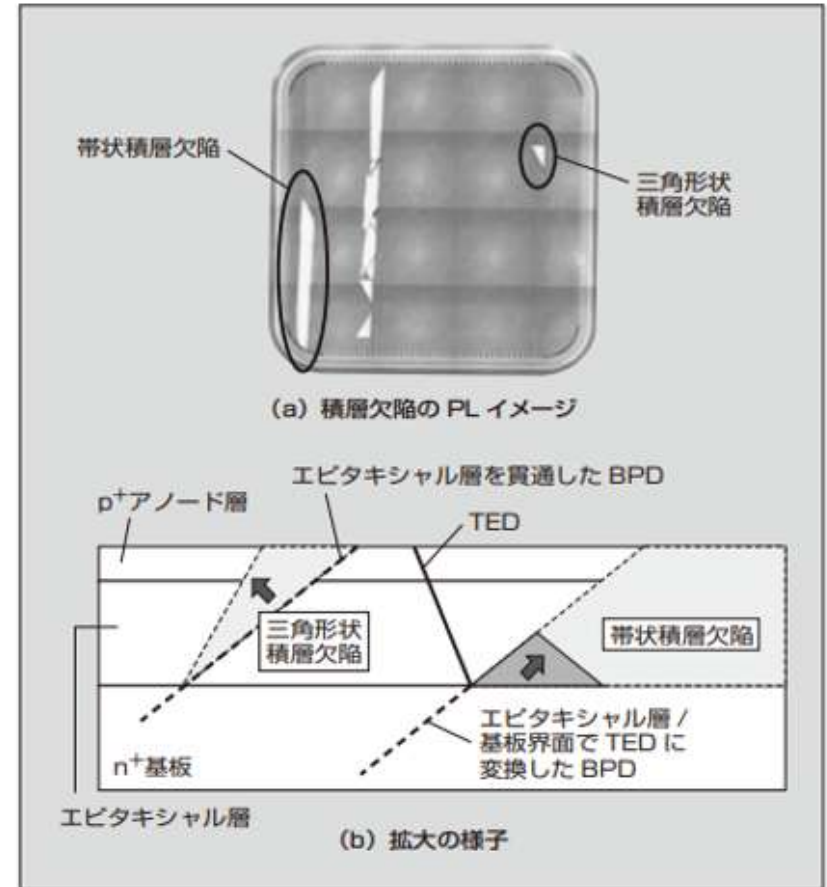
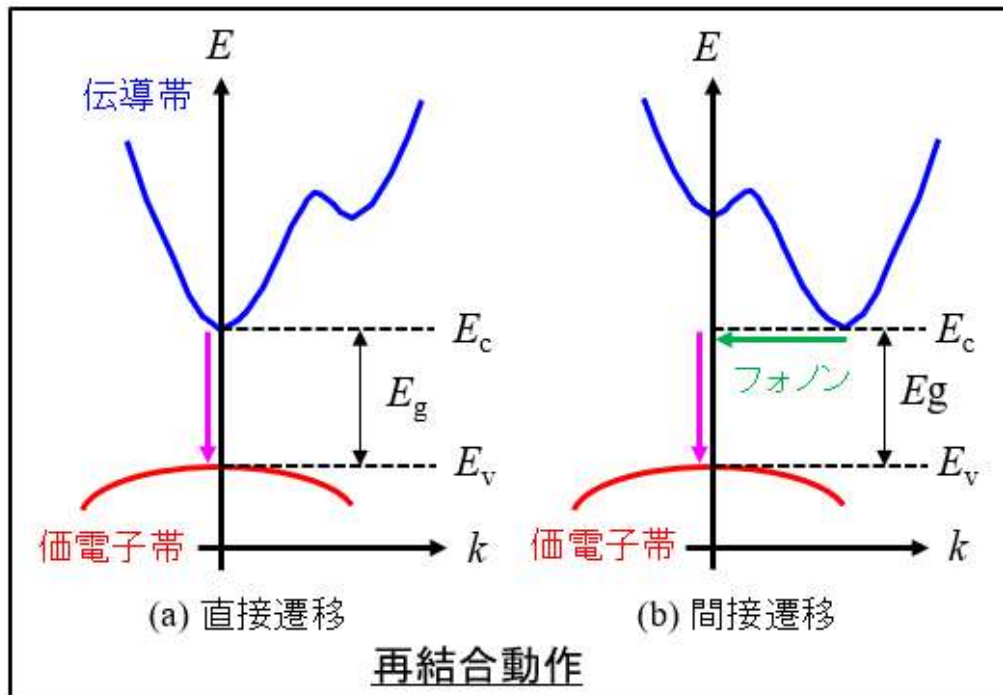
間接遷移半導体のバイポーラ動作



再結合にフォノンが関与

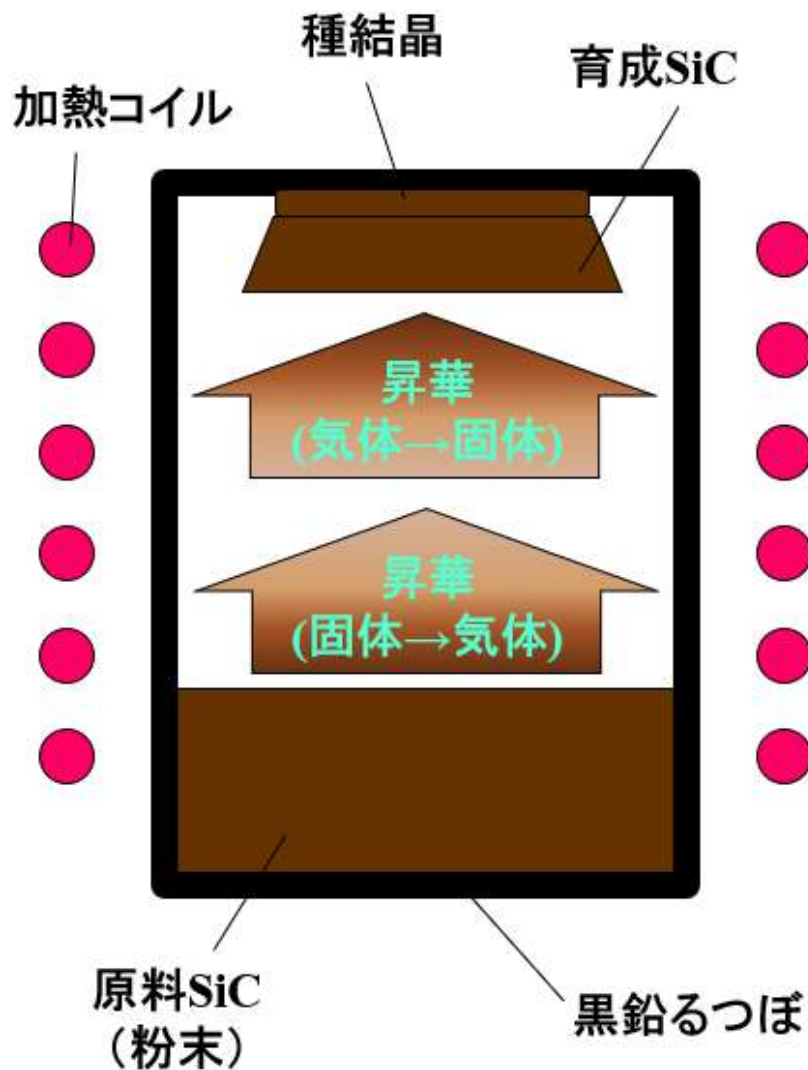


基底面転位が積層欠陥に変化



出展: 俵他、富士電機技報、2017/No.4、p.214

SiCウエハ供給への不安



SiCでは融液成長が困難
↓
現状の結晶製造は昇華法のみ



種結晶にウエハを使用
↓
・大口径化が難しい
・高品位化が困難

Si結晶とSiC結晶の生産性の違い



Siインゴット : 200~300mm × ~1m

VS



SiCインゴット :
150~200mm × 直径以下

NEDO殿ホームページより



SiC結晶製造の方向性



Si単結晶の量産工場

- Si単結晶は、引上げ機を何10台も並べて生産
- SiCは生産性が悪いので、やはり大量の装置を導入して製造する必要がある。
- 日本メーカーにできるか？
↓
- 中国なら実現可能
↓
- 中国からの調達？

Siデバイス

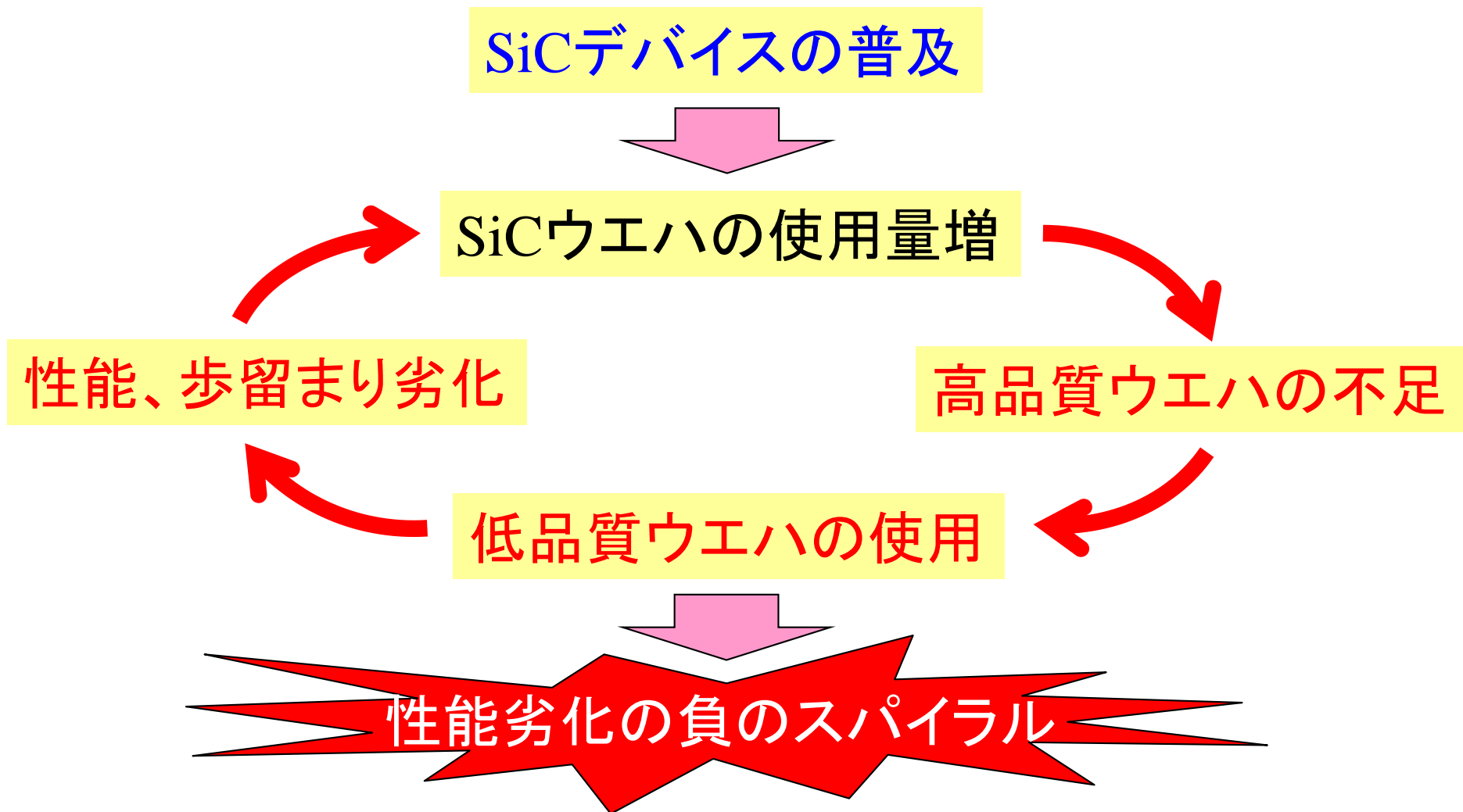
- ・ウエハの供給体制が確立していた。
信越半導体、SUMCO等がニーズに合わせて増産
Siサイクルによる一時的な不足はあったが、常に増産投資
して供給体制を維持
- ・Si結晶／ウエハはそれが可能な製造方法

SiCデバイス

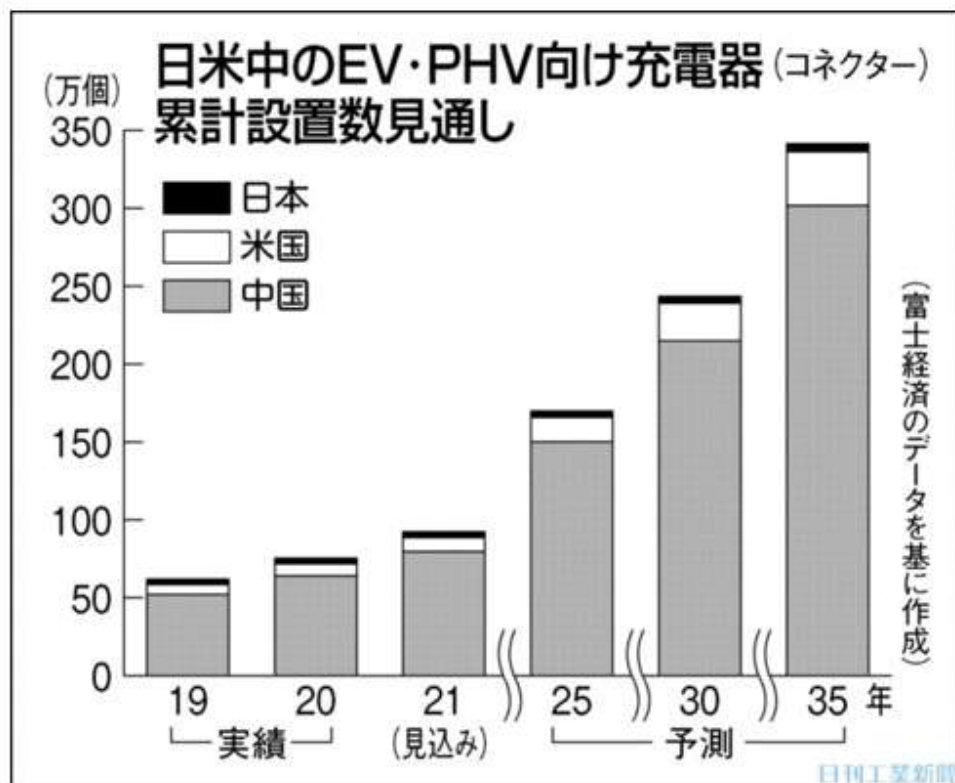
- ・ウエハの供給体制ができていない、特に日本
現在の少量量産時でも供給不足
さらに需要が増加した場合、ウエハの取り合いになる。
⇒ 今後は、凄絶な生存競争の時代になる！

SiCデバイスの普及がもたらす不安

SiCデバイスの普及が進んだ場合



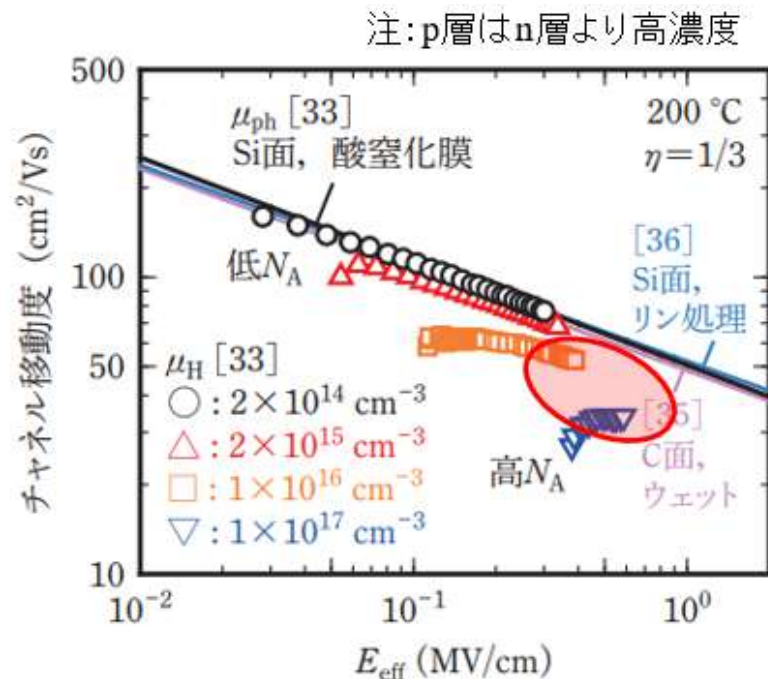
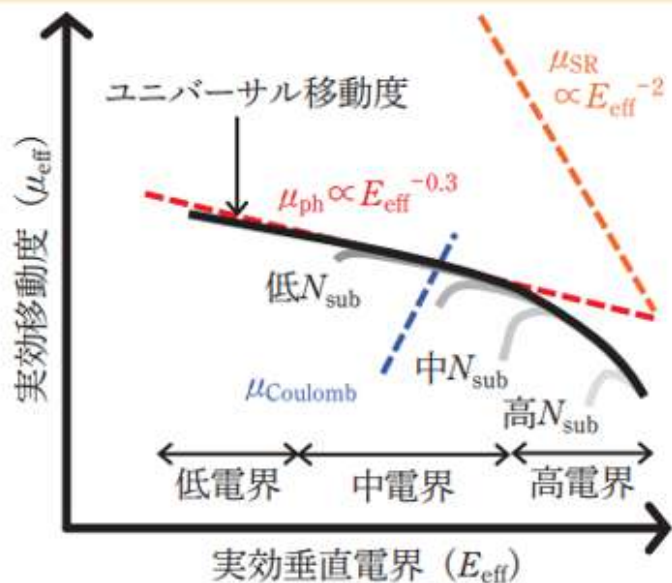
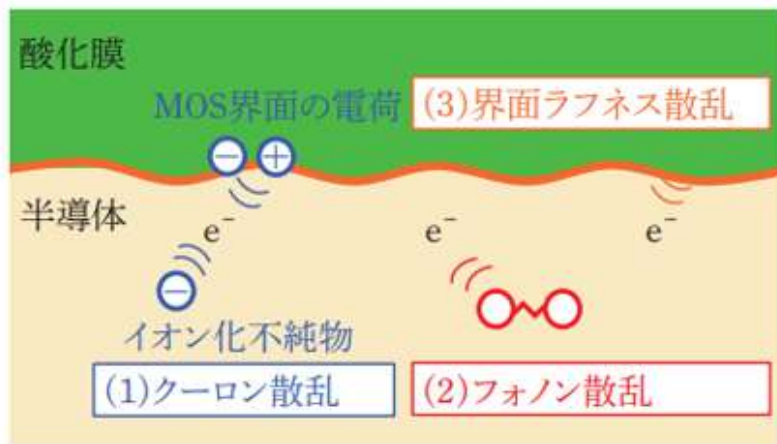
充電インフラ普及への不安



- ・日本は**充電インフラの整備**も進んでいない
- ・中国では、**バッテリー交換**も行われている。
- ・**バッテリーの交換**は、電動バイクでは以前から実施されている。

出典: 日刊工業新聞2021年7月8日

SiC-MOSFETのチャネル移動度

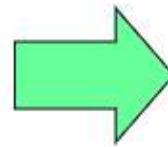


きちっとしたデータを基にした良い研究
 ただし、
SiCはパワーデバイスには向かない
 という結果にも取れる。
 特に、**低耐圧デバイスには向かない。**

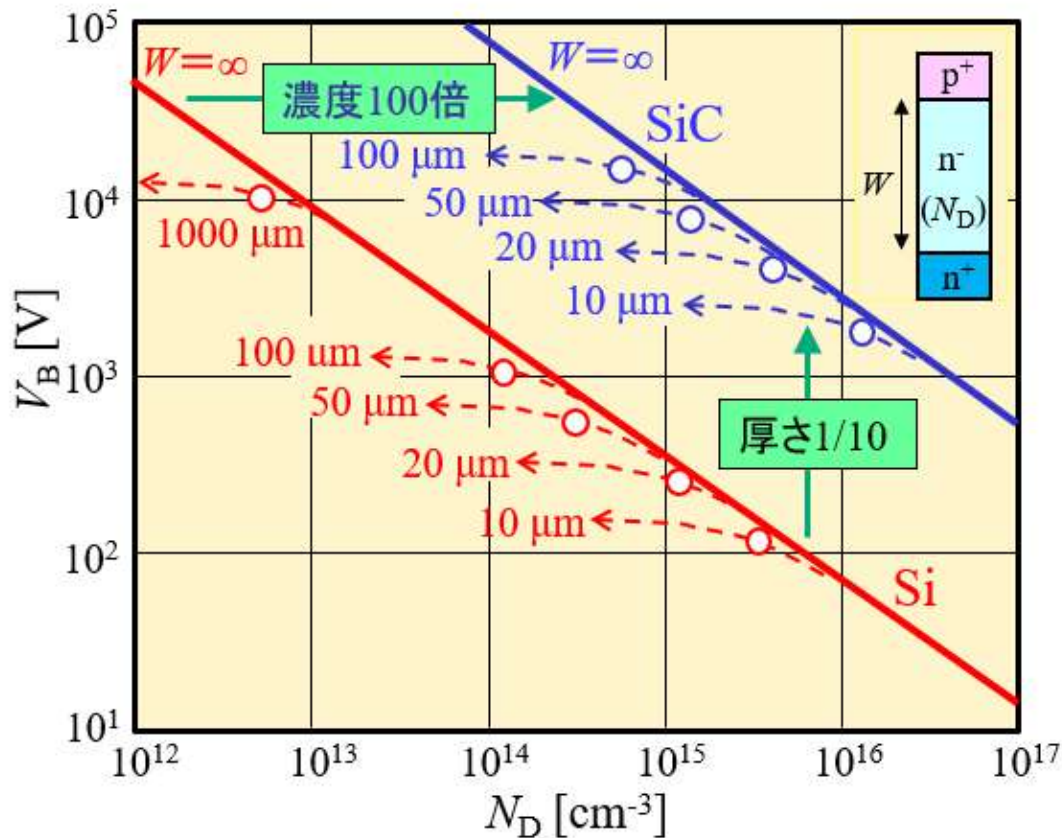
出展:野口宗隆、応用物理学会誌、2022/No.6、p.362

SiCは低耐圧デバイスに向かない

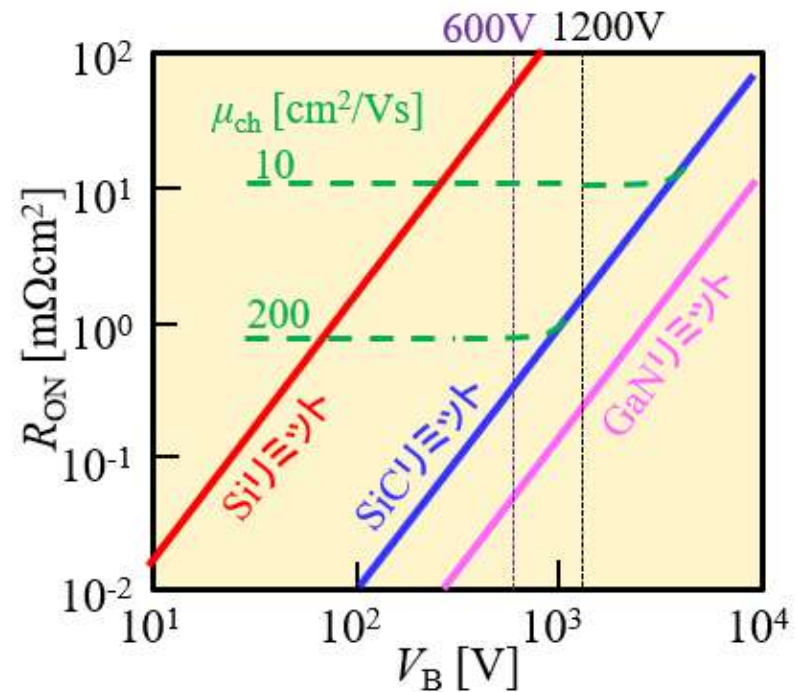
600~1200 V耐圧デバイスの実使用時の μ_{ch} は、 $50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以下(前ページ)



600 V耐圧デバイスではメリットが活かせない



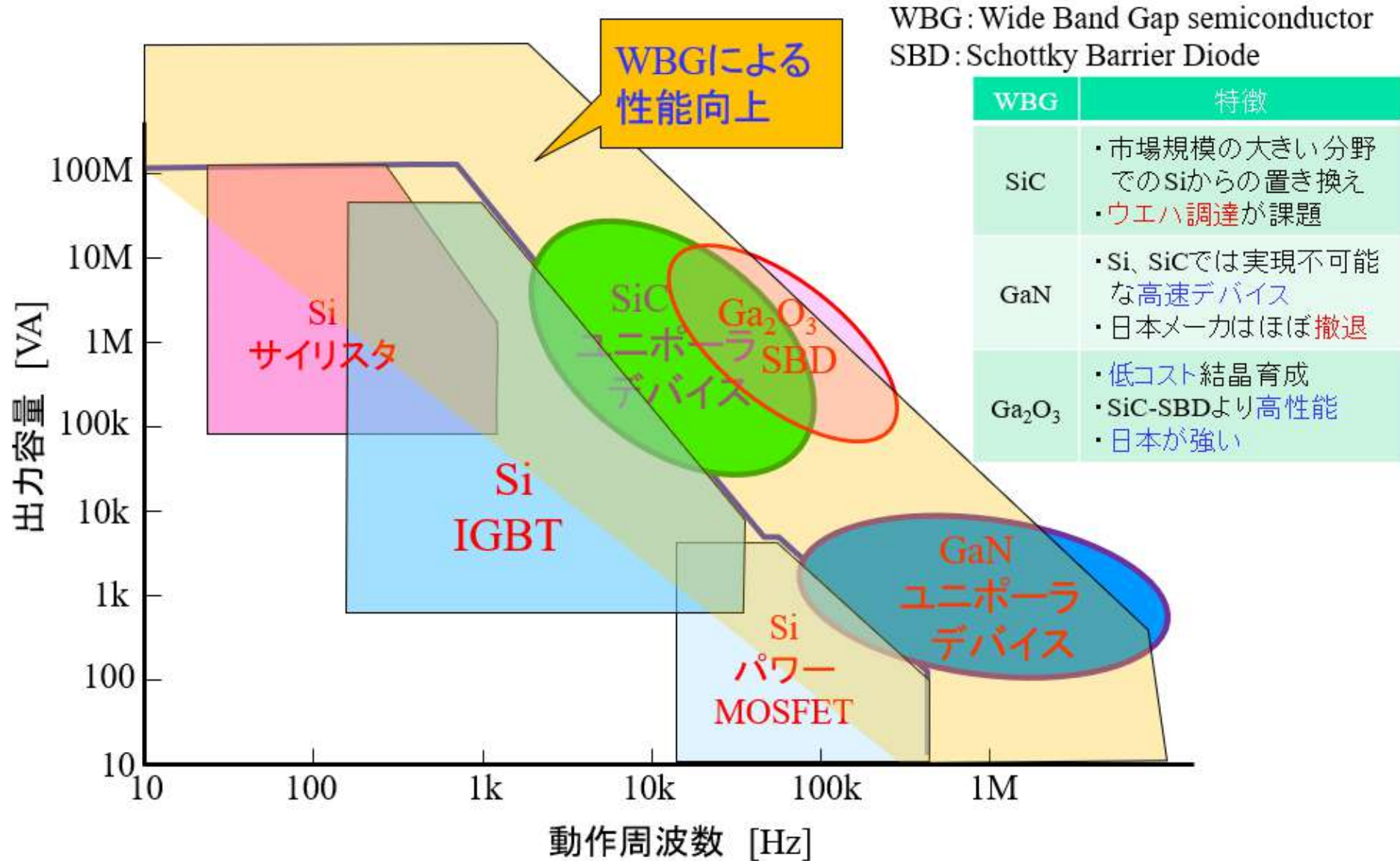
耐圧と不純物濃度の関係



耐圧とオン抵抗の関係

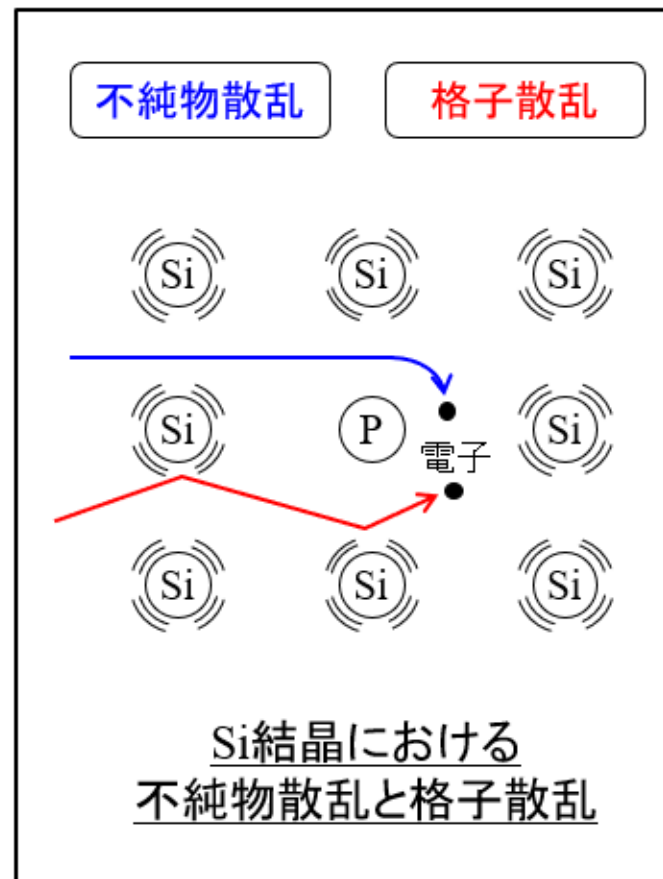
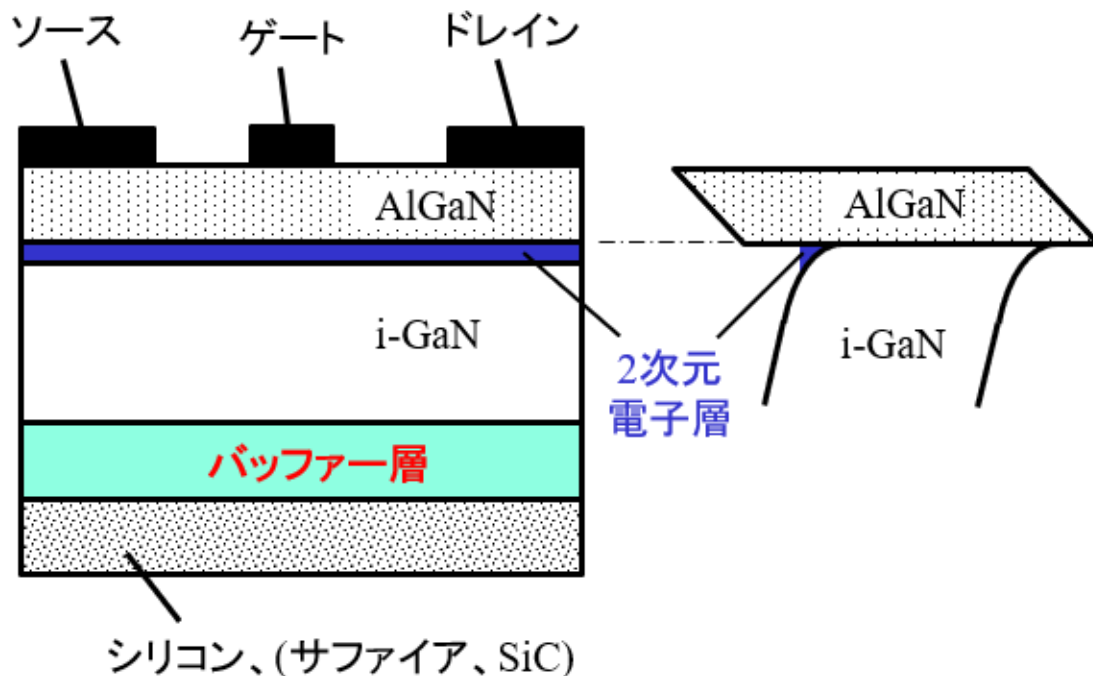
1. 車載用パワーデバイスの進展
2. SiCパワーデバイスの課題
3. その他のパワーデバイスの進展と課題
4. パワーデバイス業界の今後の展望
5. まとめ

パワーデバイスの開発ターゲット



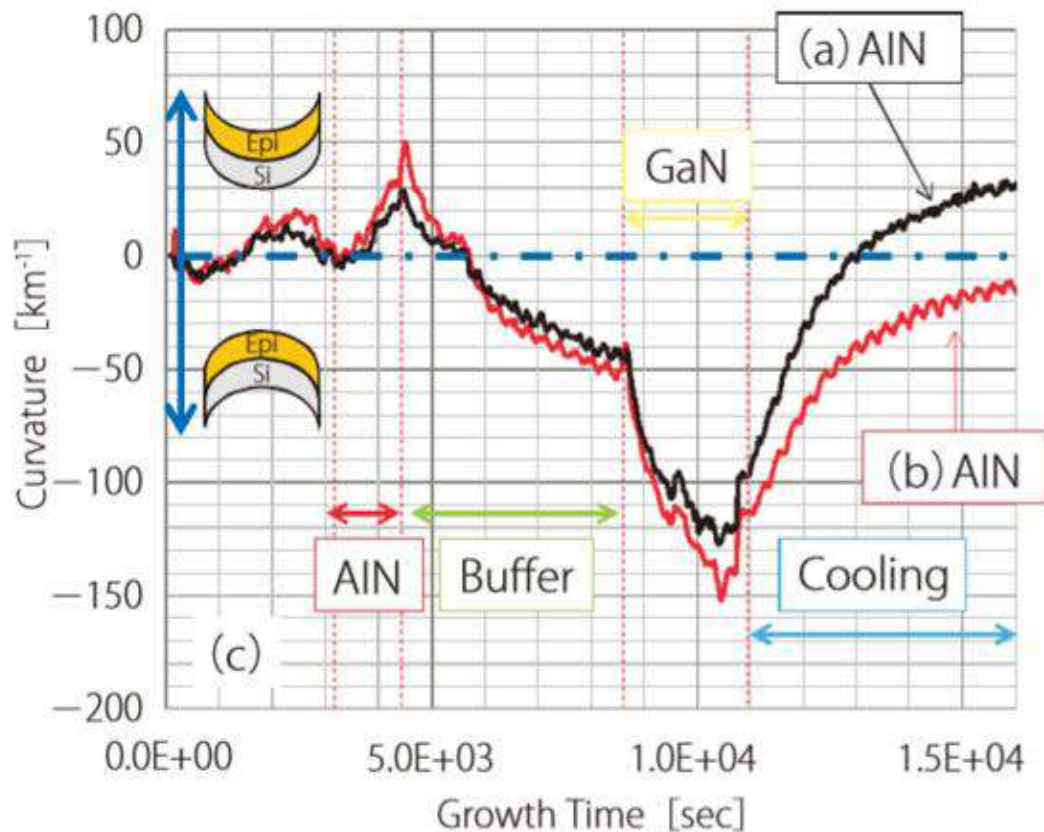
GaN-HEMTの構造と高性能デバイス実現の理由

HEMT : High Electron Mobility Transistor



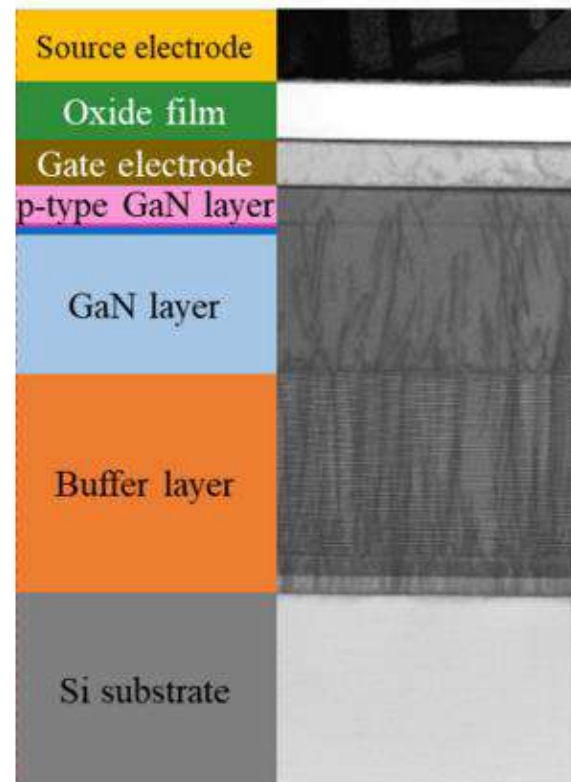
ヘテロ接合 ⇒ 分極によるキャリア生成
⇒ 格子散乱、不純物散乱が少なく、
高速動作が可能

GaN-HEMT用基板におけるエピタキシャル成長例



(a) GaN-HEMT用基板製造時のウエハ反り

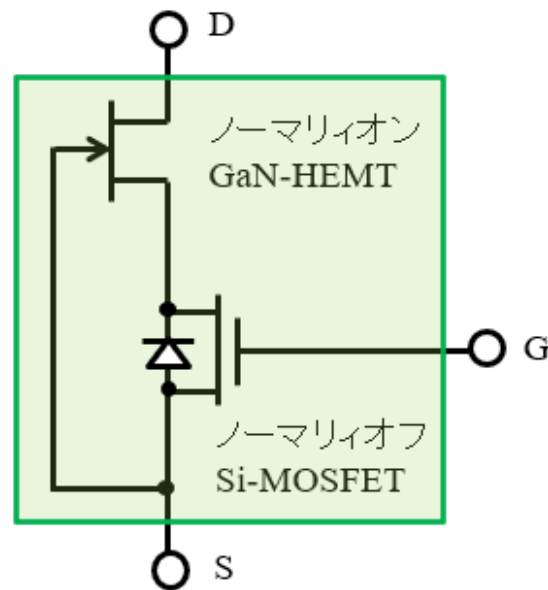
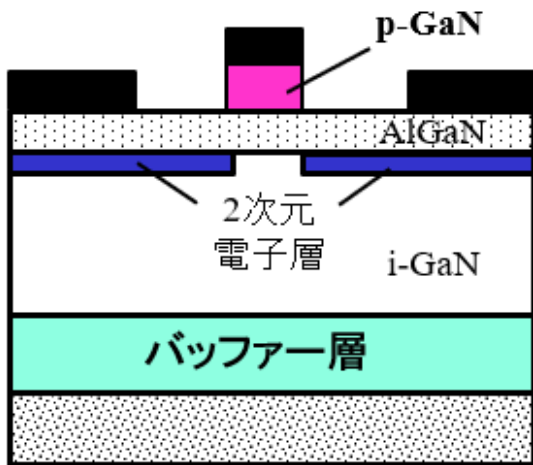
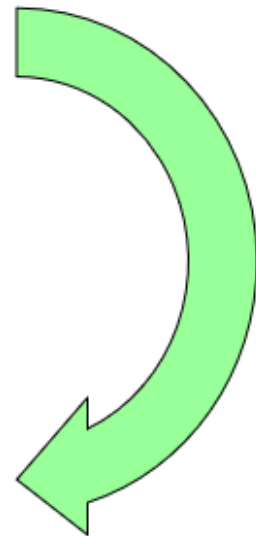
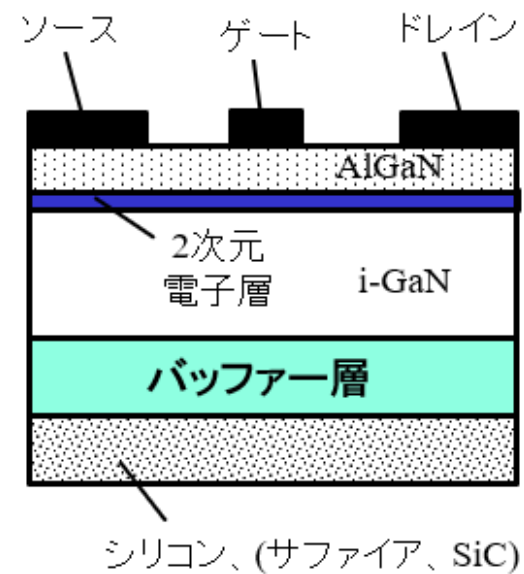
出展: 松本他、電気学会誌、2017/No.10、p.681



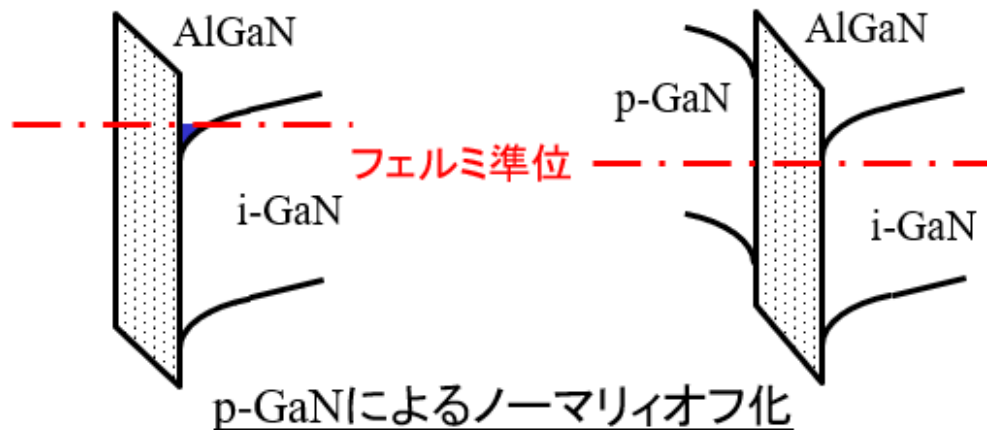
(b) GaN-HEMTのTEM評価結果

出典: 加藤、山本、佐藤: 電気学会論文誌E、142、pp.316-324(2022)

GaN-HEMTのノーマリオフ化



カスコード接続

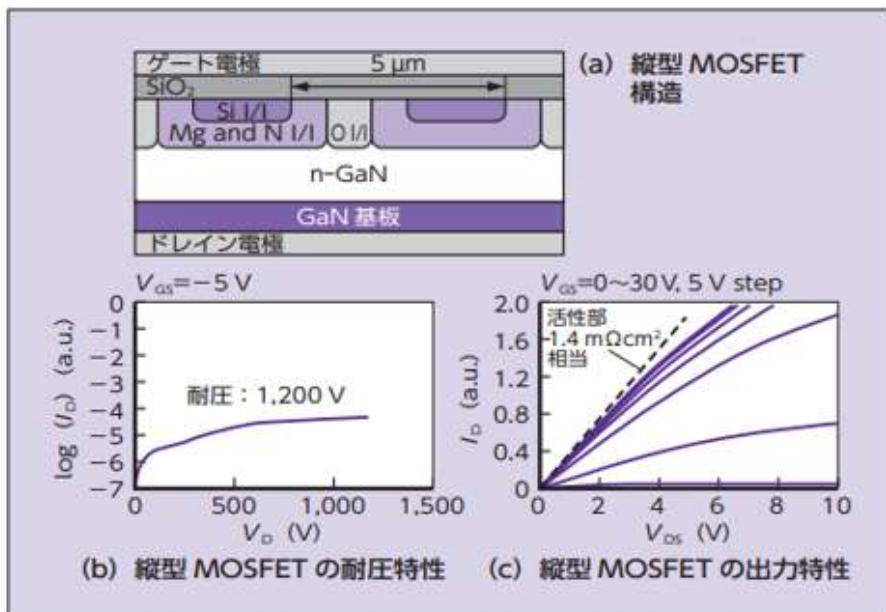


p-GaNによるノーマリオフ化

縦型GaNパワーデバイス

GaN縦型パワーデバイスの構造

図7 縦型 GaN-MOSFET の構造と電気特性



出展: 富士電機技報 2020 vol.93 No.2

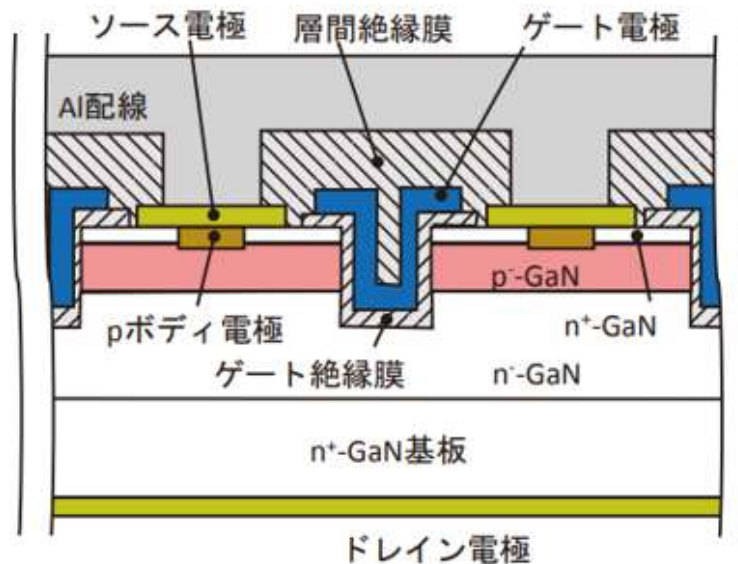
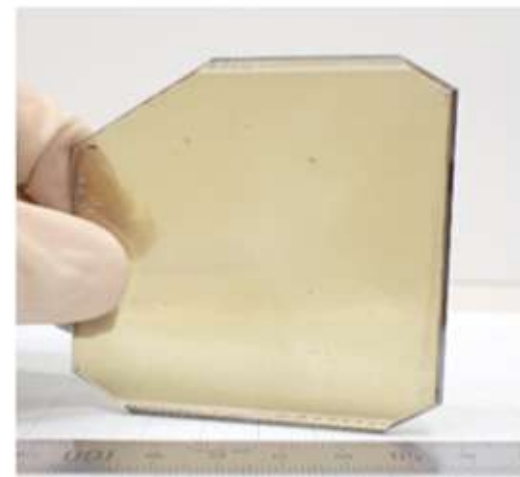
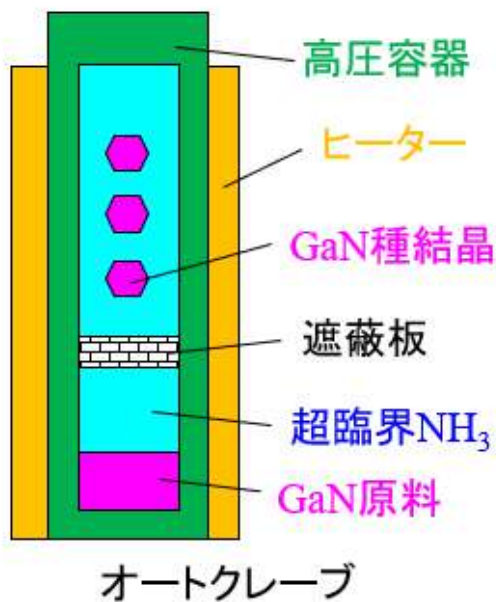
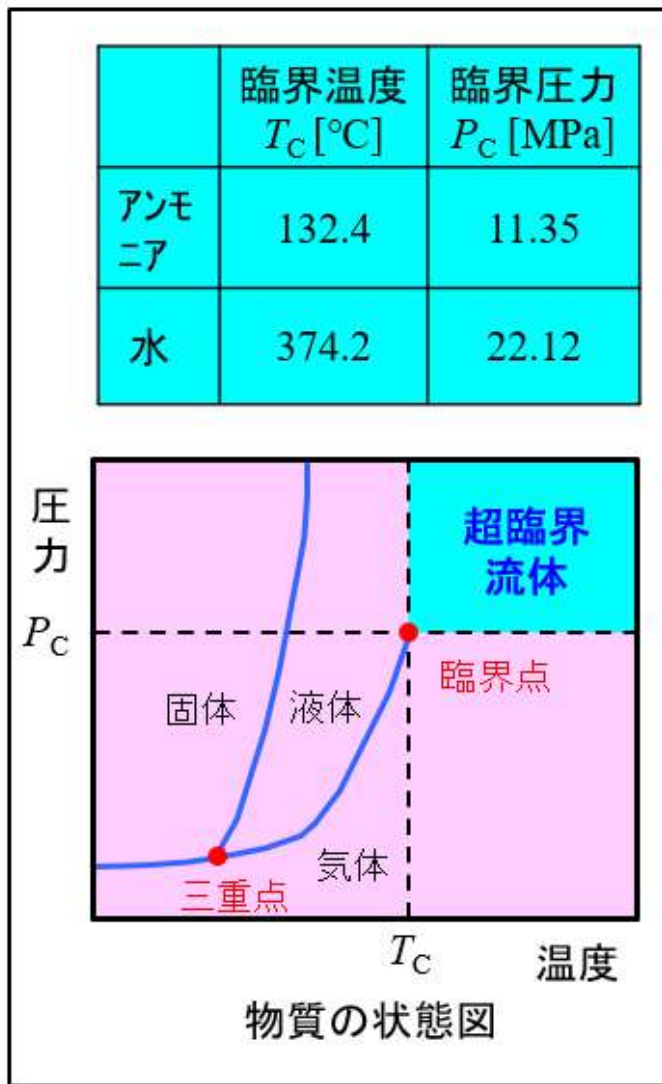
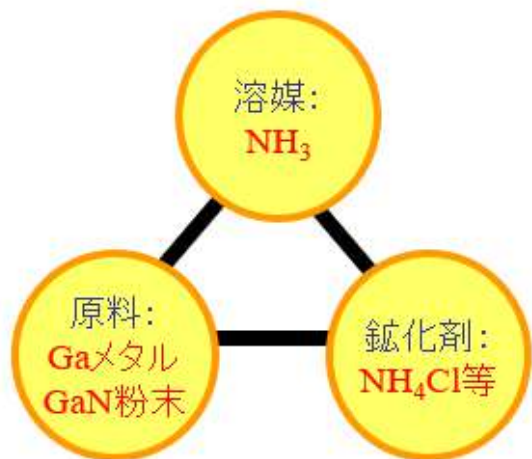


図-2 縦型 GaN トレンチ MOSFET の断面模式図

出展: 豊田合成技報 2018 vol.60

GaN自立基板の低コスト、安定製造法の確立が必要

アモノサーマル法によるGaN自立基板の製造

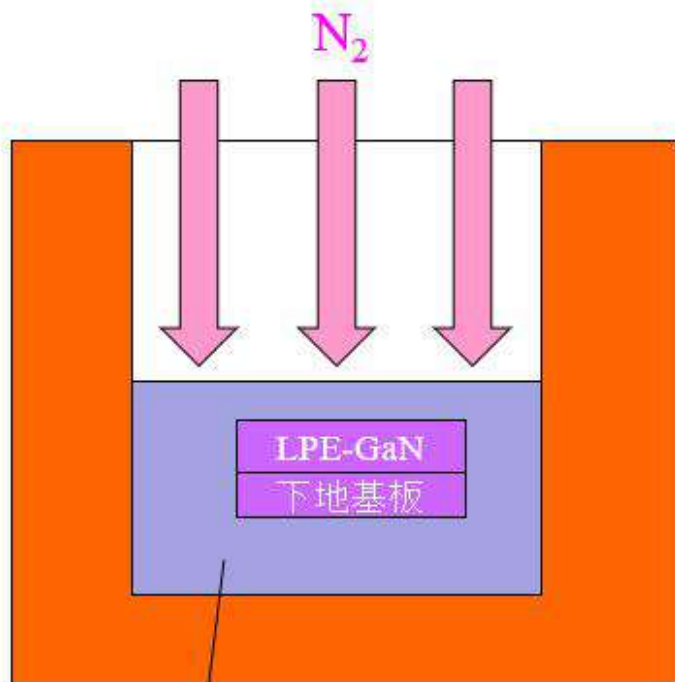


アモノサーマル法を用いて成長したGaN結晶

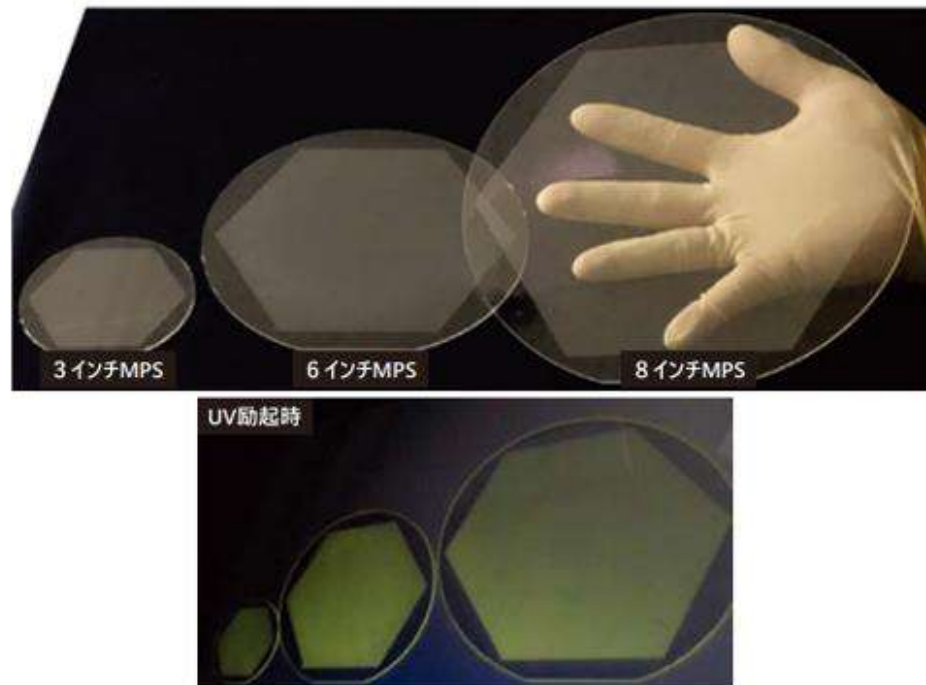
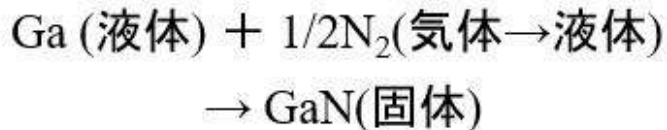
出展: NEDO 殿ホームページ

https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101493.html

Naフラックス法によるGaN自立基板の製造



Na-Ga



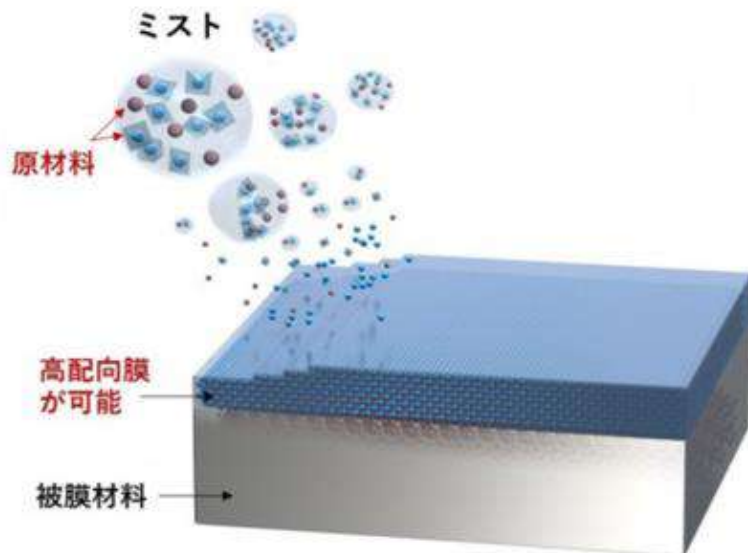
Naフラックス法を用いて成長したGaN結晶

出展: 豊田合成殿ホームページ

https://www.toyoda-gosei.co.jp/kigyou/technology/report/vol62/pdf/vol.62_010.pdf

酸化ガリウムパワーデバイスの進展

ミストCVD法では価格化が可能

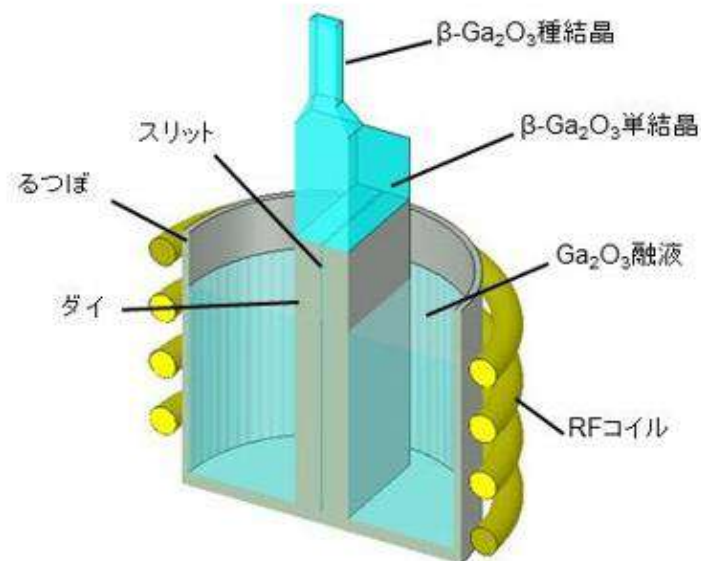


α - Ga_2O_3 結晶の育成

出展: FLOSFIA 殿ホームページ

<https://flosfia.com/technology/>

SiC、GaNでは不可能な
融液成長が可能

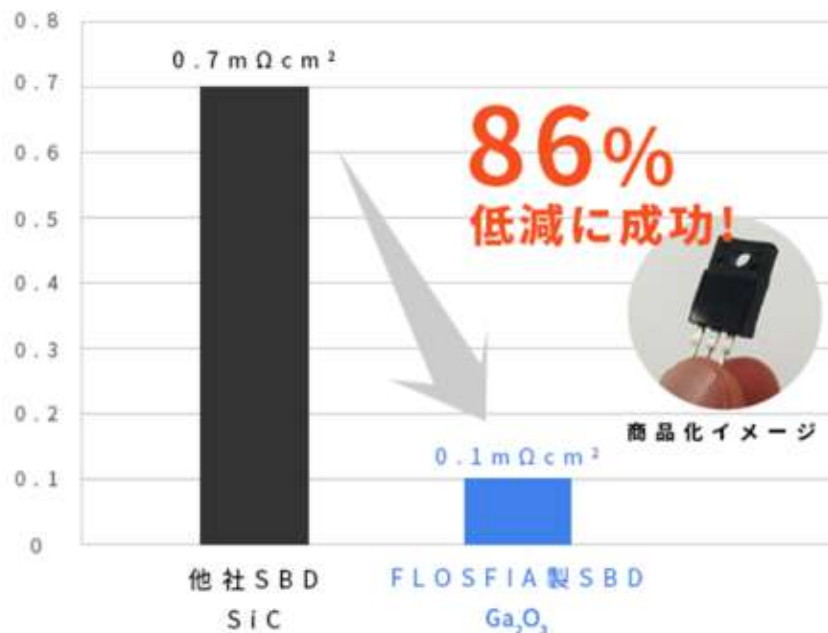


β - Ga_2O_3 結晶の育成

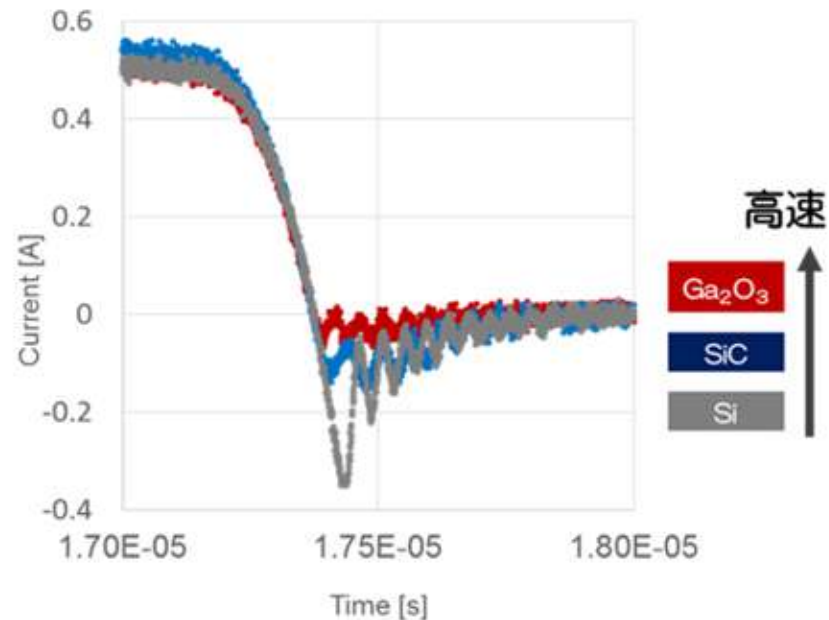
出展: ノベルクリスタルテクノロジー 殿ホームページ

<https://www.novelcrystal.co.jp/about/>

α -Ga₂O₃ショットキー障壁ダイオードの特性



(a) オン抵抗低減による損失改善



(b) スwitchング特性の改善

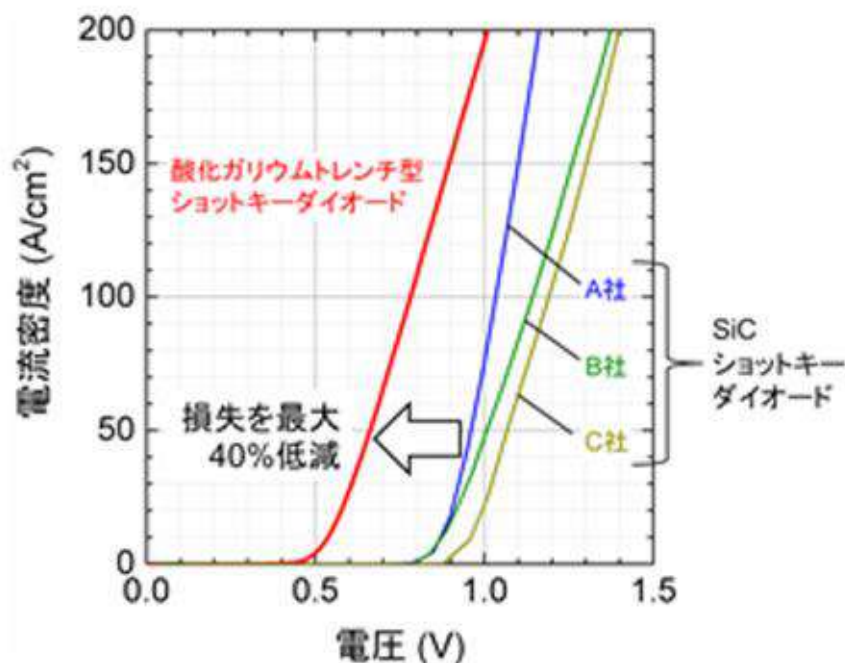
α -Ga₂O₃ショットキー障壁ダイオードの特性

出展:FLOSFIA殿ホームページ

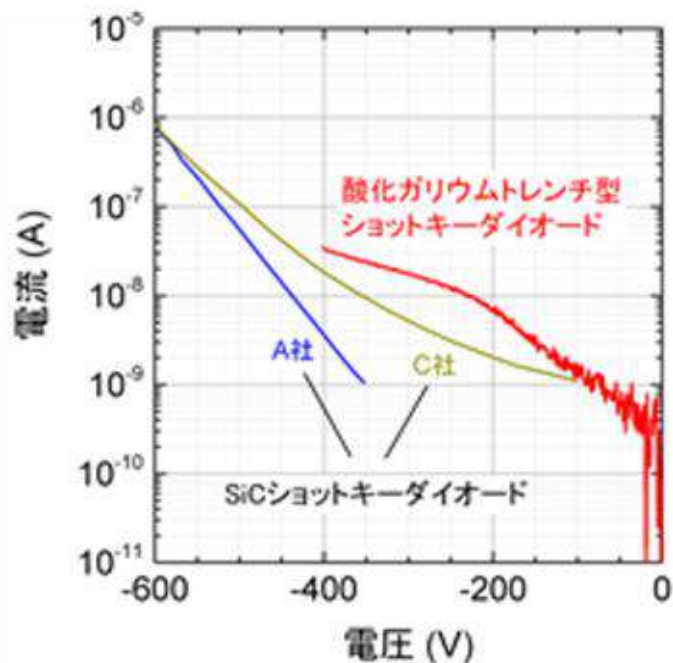
<https://flosfia.com/product/power-devices/>

出展:人羅他、電気学会誌、2017/No.10、p.693

β -Ga₂O₃ショットキー障壁ダイオードの特性



(a) 順方向特性



(b) 逆方向特性

β -Ga₂O₃ショットキー障壁ダイオードの特性

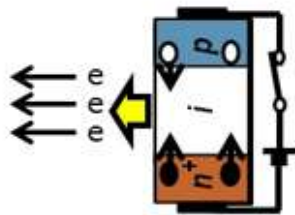
出展: ノベルクリスタルテクノロジー 殿ホームページ

<https://www.novelcrystal.co.jp/2017/309/>

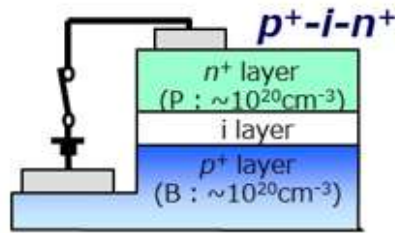
- ✓ 供給体制(α と β は別物)
 - ⇒ ユーザーとしては**複数社購買**が必須
- ✓ Ga_2O_3 では酸素欠損がドナーを形成
 - ⇒ **p型の制御が難しい**
 - ⇒ スイッチングデバイスの実用化には課題が多い
- ✓ Ga_2O_3 は**熱抵抗が高い**
 - ⇒ 基板を除去する等の技術が必要

ダイヤモンドデバイス

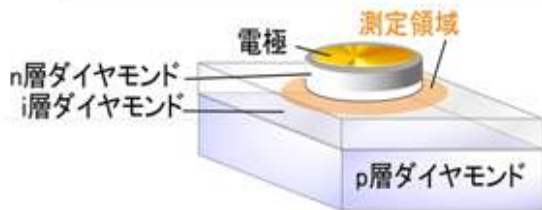
材料の置き換えではない、ダイヤモンドだからできたデバイス開発！



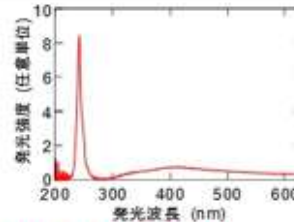
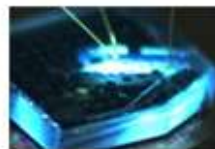
ダイオードから電子が漏れ出る！
超高耐圧用 半導体真空スイッチ



ダイヤモンドなのに大電流が流れる！
高耐圧大電流ダイオード



室温で単光子源、室温で多量子ビット！
室温量子デバイス



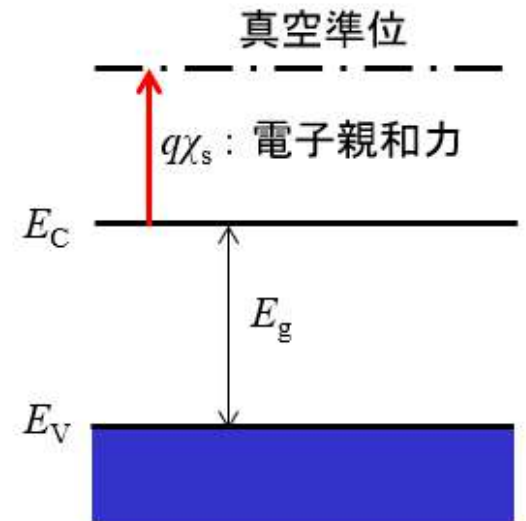
間接遷移半導体なのに光る！
新原理 励起子LED

半導体の教科書にないデバイス群

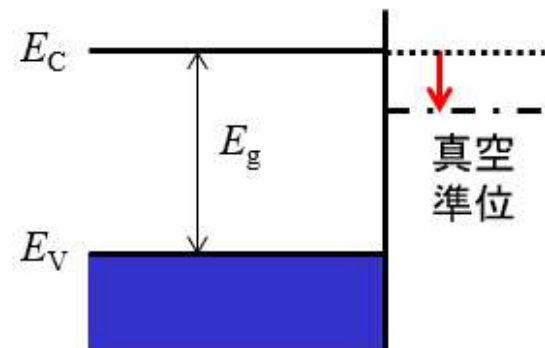
ダイヤモンドは常識はずれのデバイスができる！

出展：産業総合研究所殿ホームページ

<https://unit.aist.go.jp/adperc/ci/teams/daiatsukuba.html>



一般的な半導体の
エネルギーバンド構造

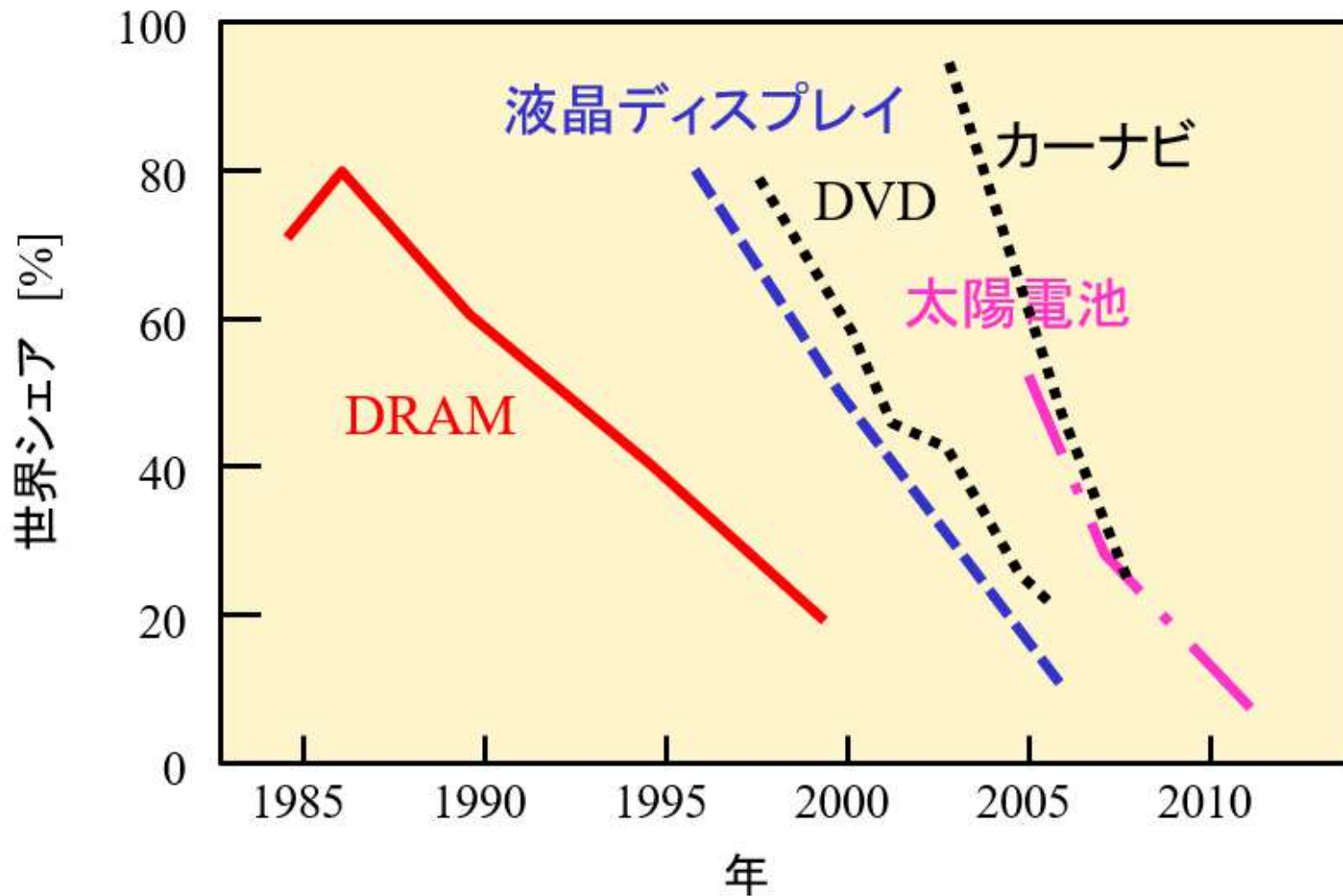


ダイヤモンドの
エネルギーバンド構造

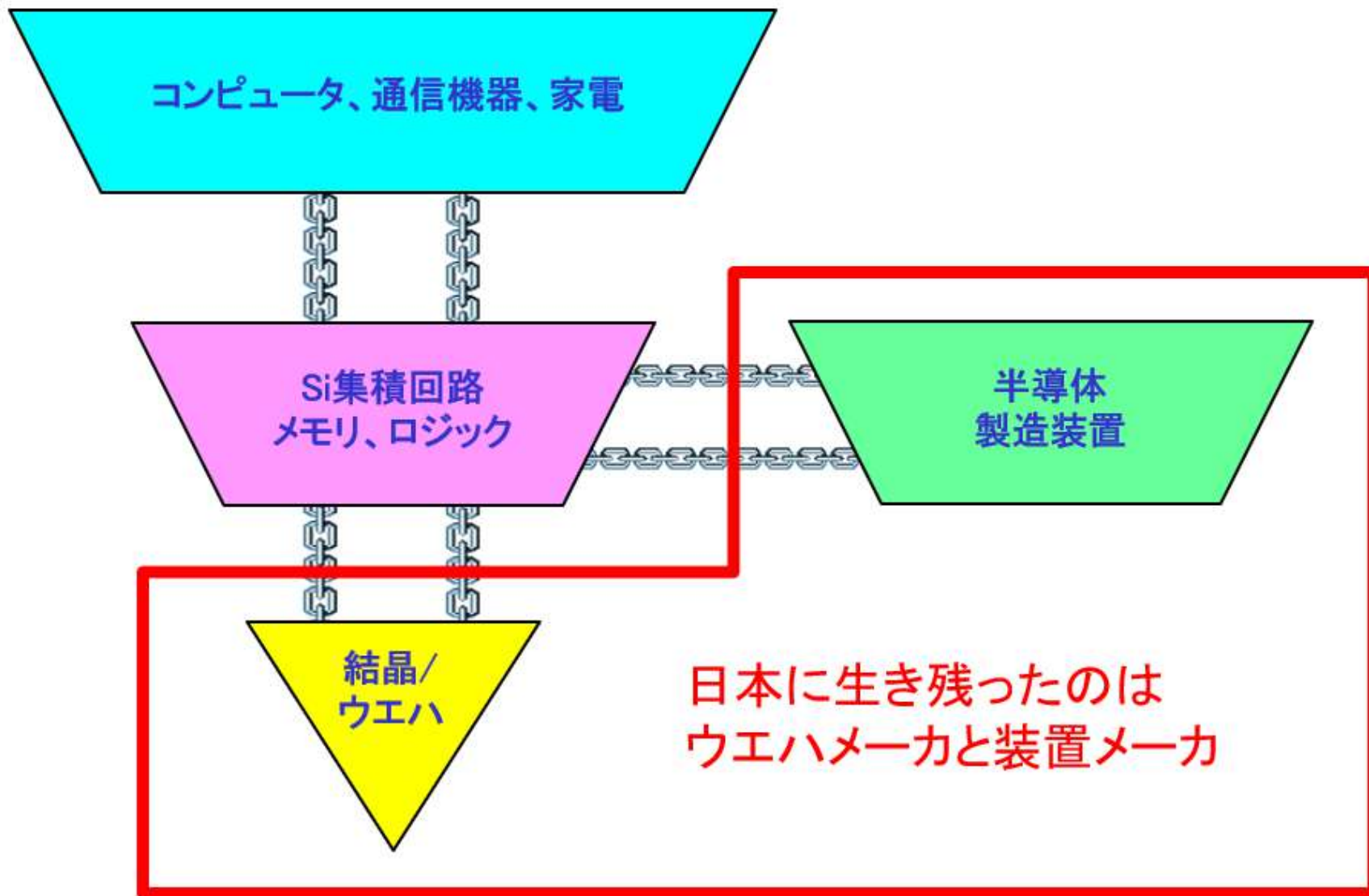
1. 車載用パワーデバイスの進展
2. SiCパワーデバイスの課題
3. その他のパワーデバイスの進展と課題
4. パワーデバイス業界の今後の展望
5. まとめ

日本の電子デバイス産業における衰退の歴史

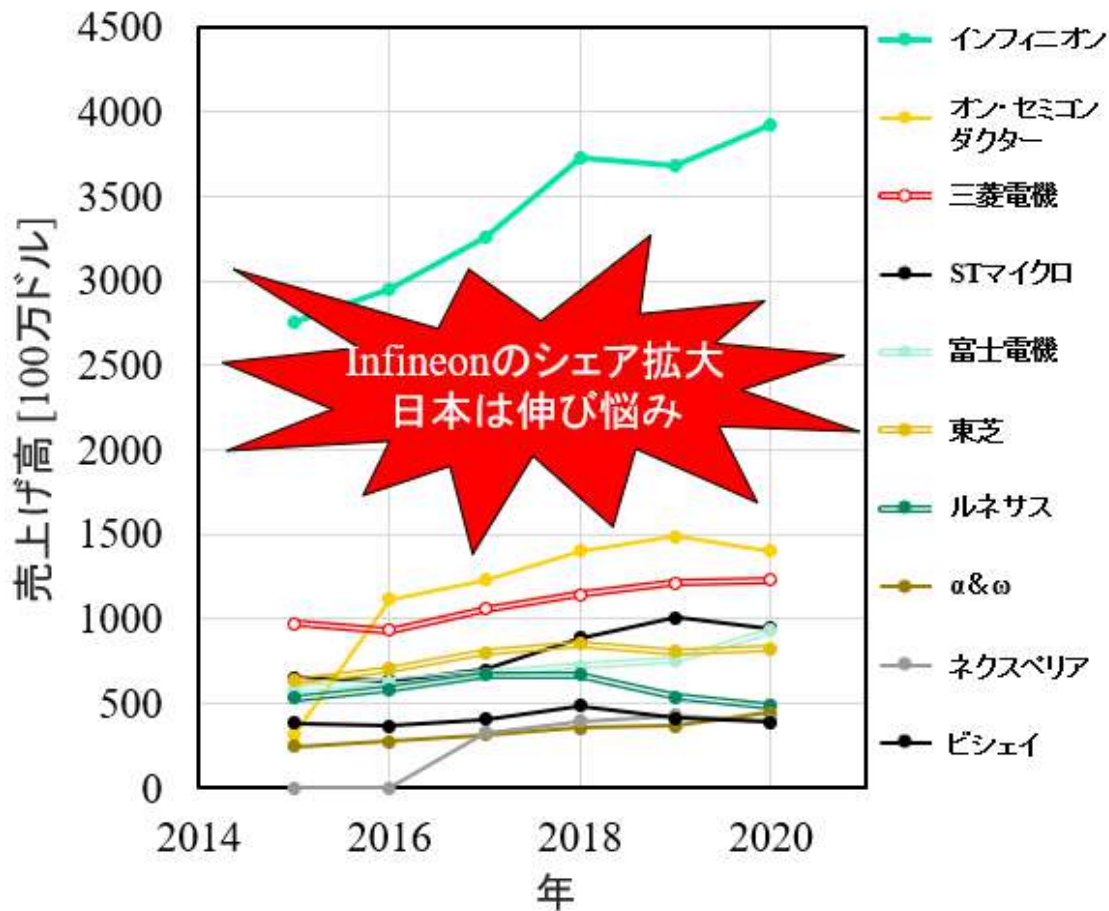
妹尾堅一郎: 技術力で勝る日本が、なぜ事業で負けるのか



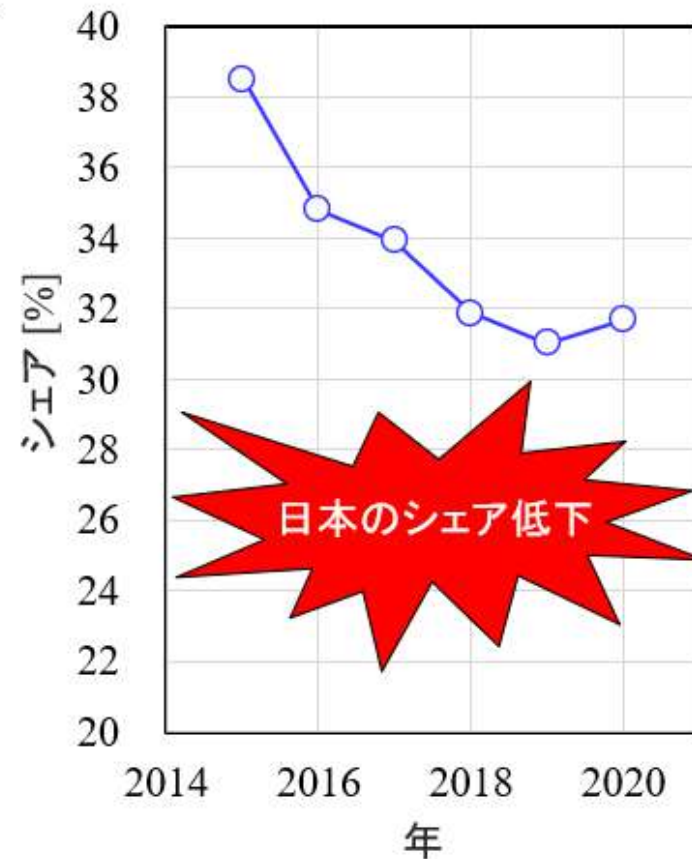
日本におけるSi-LSIサプライチェーンの崩壊



パワーデバイス業界における日本の地位



パワーデバイスメーカーの売上高推移



日本のシェア推移

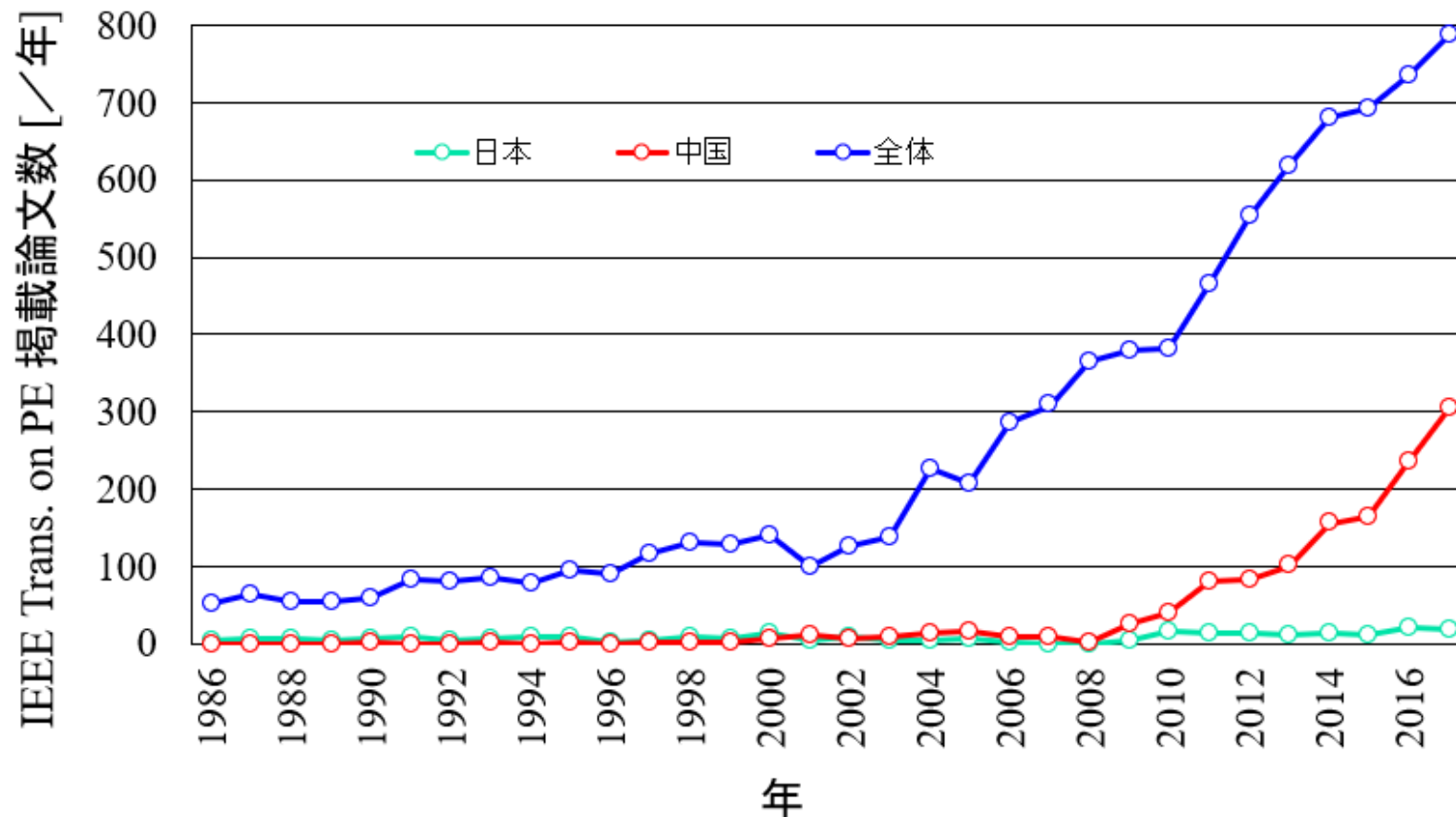
英Omdia社のデータを元に山本が作成

Siパワーデバイスの300mm化

企業名	投資計画等
インフィニオン	ドレスデン300mmライン順調に拡大, 21年にはフルキャパの見通し フィラッハ300mmライン新設, 21年には生産開始
オン・セミ	イースト・フィッシュキル300mmライン買収, MOSFET, IGBT生産
STマイクロ	アグラテ300mmライン新設, 21年には生産開始
デンソー	三重富士通で300mmの専用ライン設置
三菱電機	独自での立ち上げに消極的, 台湾メーカーとの連携模索
富士電機	200mm増強が主体, 300mmラインの導入検討
東芝	200mm増強が優先, 300mmラインの導入検討
アルファ&オメガ	地元政府とのジョイントで300mmラインの導入検討

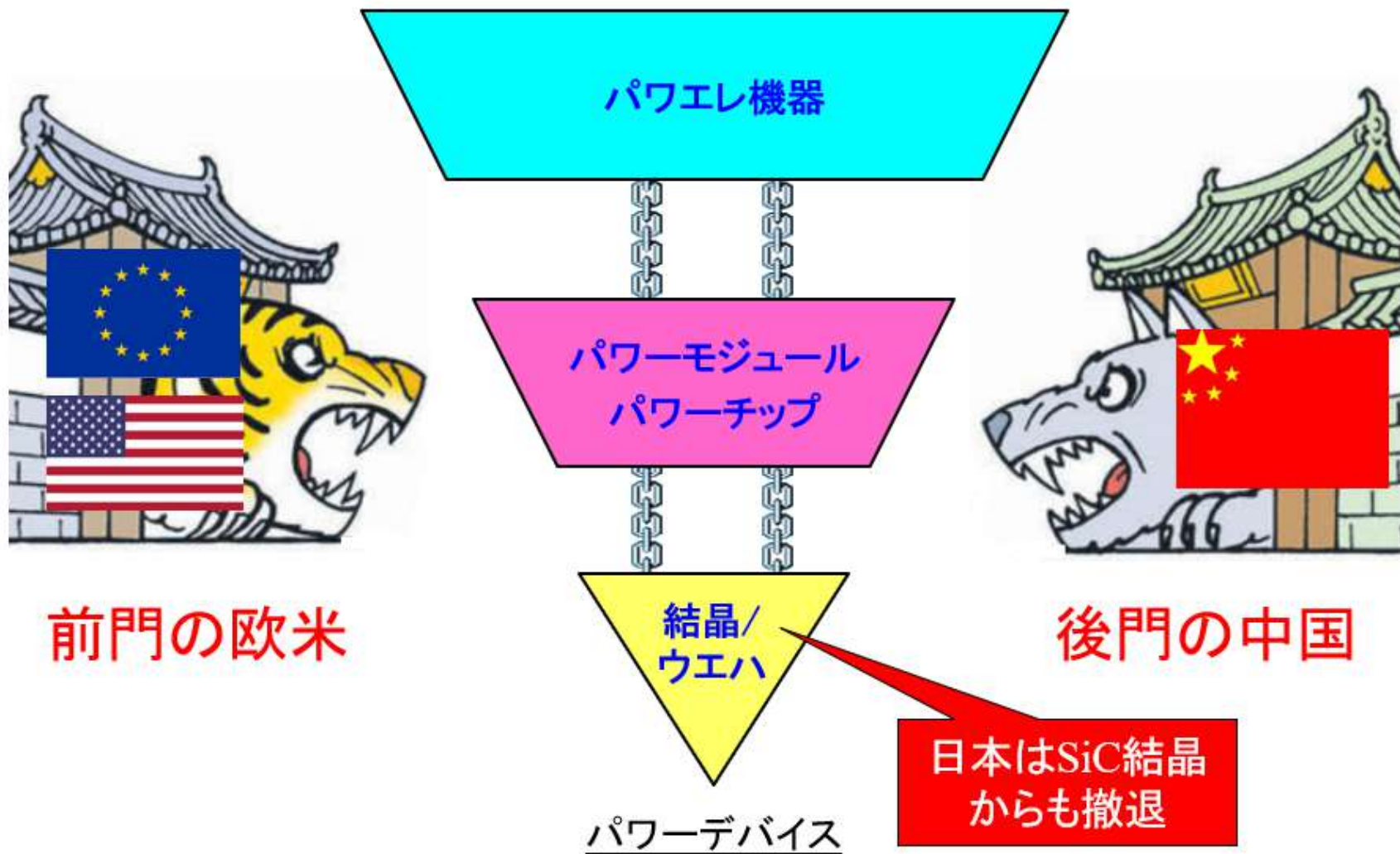
電子デバイス産業新聞、2020年10月15日号の記事を参考に山本が作成

中国の追い上げ



- ・2000年頃から発表件数が増加
- ・2010年頃から中国の発表件数が急激に増加
- ・日本は低め安定

前門の欧米、後門の中国



提言1: デバイスメーカーの再編・独立

- ・大企業の一部門では、迅速な対応ができない
パワーデバイスは、三菱電機、東芝、富士電機等の主力製品ではない
- ・成功事例がある ⇒ TMEIC、SUMCO
ただし、失敗事例(エルピーダ、ルネサス等)もある

提言2: 中国との共存・共栄

- ・大市場の確保
中国は自国完結政策を推進
⇒ 何もしなければ、旨みのある市場を失う
- ・SiC結晶/ウエハの調達
数量が増加した場合、日本国内での調達に不安

- ✓ 車載用Siパワーデバイスとして、RC-IGBTの適用が始まっている。
- ✓ 海外では、電気自動車搭載用として、SiCパワーデバイスが適用され出した。
- ✓ 日本は、電気自動車の普及およびSiCパワーデバイス適用で出遅れている。
- ✓ SiCの使用量が増加した場合、結晶/ウエハ調達が大きな問題となる。
- ✓ SiCパワーデバイスには、ゲート酸化膜耐圧劣化、バイポーラ劣化等信頼性上の不安がある。

- ✓ GaN-HEMTは**高速パワーデバイス**としての適用が進むが、日本のデバイスメーカーのほとんどが撤退した。
- ✓ 縦型GaNデバイスの実用化のためには、**自立基板**の低コストでの安定製造技術の確立が必要である。
- ✓ 酸化ガリウムは低コストで基板が製造可能であり、当面SBDのみであるが性能も良好であり、**日本が主導権**を握っている。
- ✓ 日本はSiCパワーデバイスでは**出遅れ**、Siパワーデバイスのシェアも徐々に落ちてきている。
- ✓ 日本のパワーデバイス業界での地位向上のためには、**メーカ再編**が必要である。