

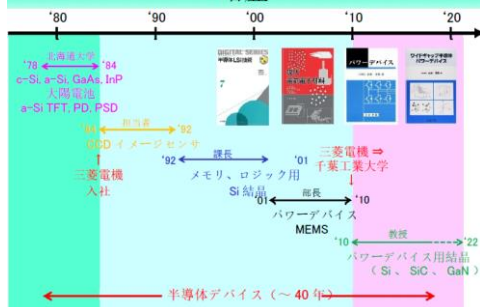
■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

WBG パワーデバイスの技術開発動向

1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向
2. WBG パワーデバイスの優位性
3. WBG パワーデバイスの課題
4. 日本の地位と将来展望

千葉工業大学 山本 秀和
 yamamoto.hidekazu@it-chiba.ac.jp

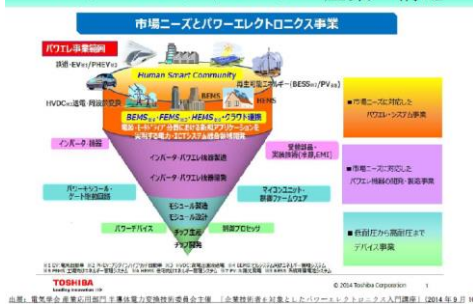
略歴



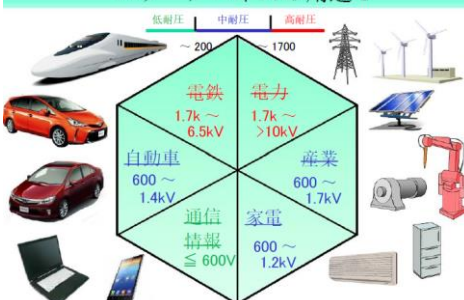
パワエレ / パワーデバイス産業の動向

1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向
 - 1-1. パワエレ産業とパワーデバイス
 - 1-2. パワーデバイスの構造
 - 1-3. パワーデバイスの技術開発動向
2. WBG パワーデバイスの優位性
3. WBG パワーデバイスの課題
4. 日本の地位と将来展望

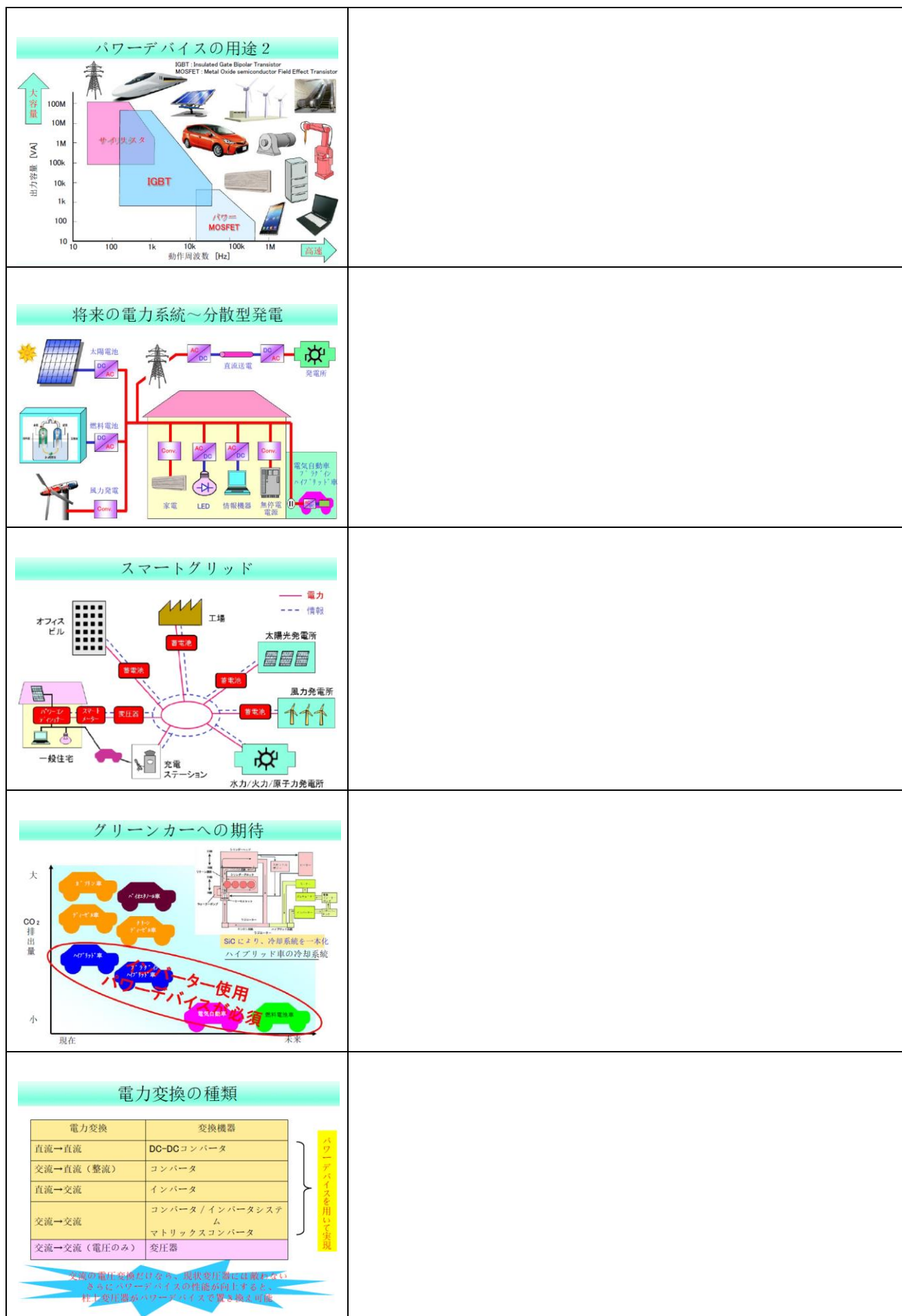
パワーエレクトロニクス産業の構造



パワーデバイスの用途 1



■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

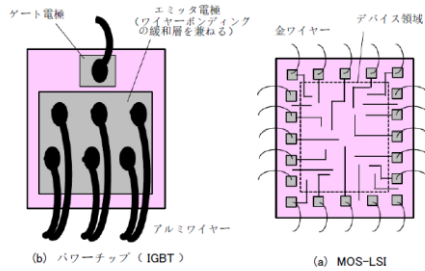


■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

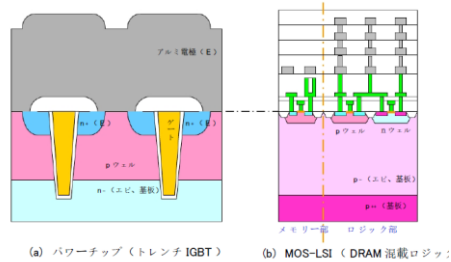
コンバータ / インバータシステム 交流電源 → 整流ダイオード → 平滑コンデンサ → スイッチングデバイス (IGBT (or MOSFET)) → 逆流ダイオード (FWD) → モーター IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor FWD: Free Wheel Diode 同じ数必要	
電力変換とパワーデバイスの損失 損失: オフ損失, オン損失, E_{ON}, E_{OFF}	
パワエレ / パワーデバイス産業の動向 - パワエレ / パワーデバイス産業の動向 1-1. パワエレ産業とパワーデバイス 1-2. パワーデバイスの構造 1-3. パワーデバイスの技術開発動向 - WBG パワーデバイスの優位性 - WBG パワーデバイスの課題 - 日本の地位と将来展望	
パワーデバイスの構造 (LSI との比較) (a) パワーチップ (600V IGBT) (b) MOS-LSI (多層配線)	
パワーチップの耐圧保持 耐圧電圧 V_b [V] vs 不純物濃度 N_o [cm⁻³] 耐圧 [V] vs n-層厚 [μm]	

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

半導体デバイスの電極構造

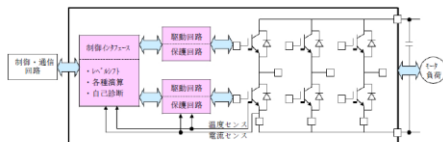


表面構造の比較

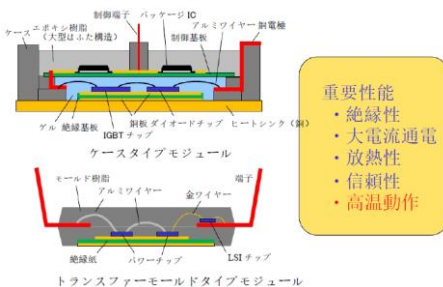


IPM : Intelligent Power Module

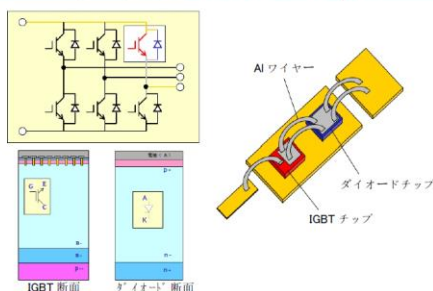
IPMとは、
スイッチング素子、駆動回路、保護回路、
その他の機能を一つのパッケージに組み
込んだモジュール



パワーモジュールの構造

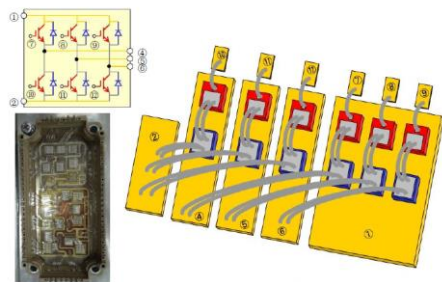


パワーチップのモジュール化 1

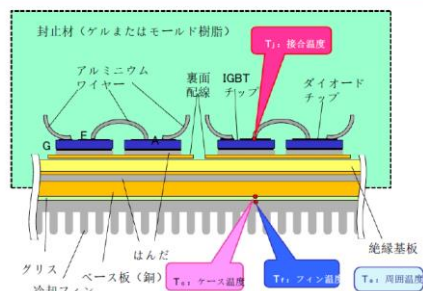


■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

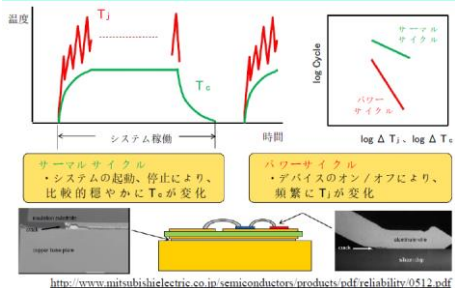
パワーチップのモジュール化2



パワーモジュール構造と各部の温度



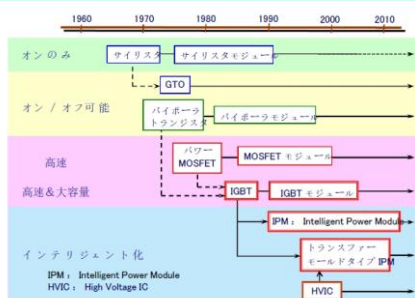
パワーデバイスの動作パターン



パワエレ / パワーデバイス産業の動向

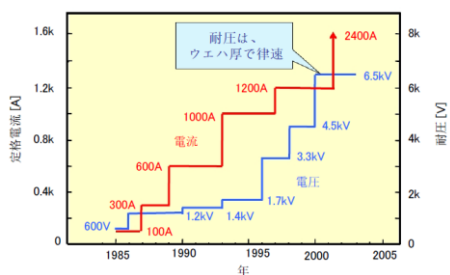
1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向
 - 1-1. パワエレ産業とパワーデバイス
 - 1-2. パワーデバイスの構造
 - 1-3. パワーデバイスの技術開発動向
2. WBG パワーデバイスの優位性
3. WBG パワーデバイスの課題
4. 日本の地位と将来展望

パワーデバイスの進化の歴史



■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

IGBT の大容量化



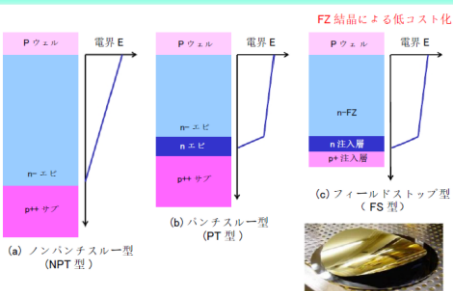
パワーデバイスの開発の柱

- 高性能化: 微細化、構造改良
⇒ サブミクロン化、新構造
- 低コスト化: 低価格ウエハ、大直径化、プロセス安定化
⇒ 大直径 FZ ウエハ + FS 構造
- 多機能化: IGBT と Diode の一体化
⇒ 逆導通 IGBT、逆阻止 IGBT
- 新材料: Si の限界を超える材料
⇒ SiC, GaN (Ga₂O₃, C)

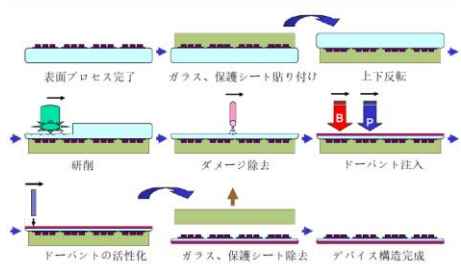
FS: Field Stop



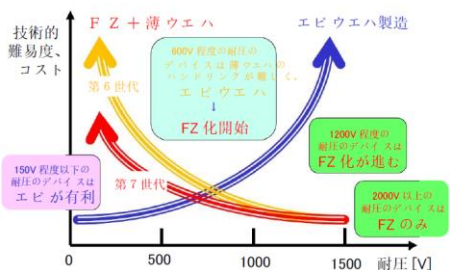
IGBT の縦構造



薄ウエハプロセスフローの概略

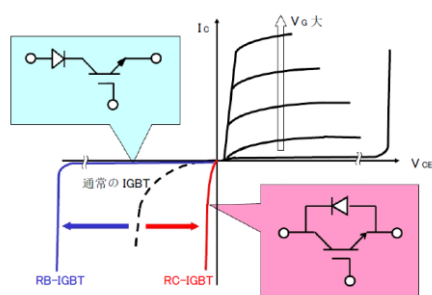


パワーデバイス用ウエハの選定



■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

IGBT の多機能化



WBG パワーデバイスの優位性

1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向
2. WBG パワーデバイスの優位性
 - 2-1. 半導体の物性値
 - 2-2. WBG の優位性
 - 2-3. WBG パワーデバイスのターゲット
3. WBG パワーデバイスの課題
4. 日本の地位と将来展望

半導体の物性値比較

	3C-Si	3C-GaAs	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	2H-GaN	α , β -Ga ₂ O ₃	3C-C
バンドギャップ E _g [eV]	1.1	1.4	2.2	3	3.26	3.39	4.8 ~ 4.9	5.45
バンドタイプ	間接	直接	間接	間接	間接	直接	直接	間接
比誘電率 ϵ	11.8	12.8	9.6	9.7	10	9	10	5.5
電子移動度 μ [cm ² /Vs]	1350	8500	900	370	720	900	300	1900
絶縁破壊電界 E _b [×10V/cm]	0.3	0.4	1.2	2.4	2.8	3.3	4 ~ 8	5 ~ 10
電子飽和速度 v _{sat} [×10cm/s]	10	20	20	20	20	25	-	27
熱伝導率 κ [W/cmK]	1.5	0.5	4.5	4.5	4.5	1.3	-	20.9 ~ 33

ワイドギャップ半導体の優位性

原子半径小							
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
H							He
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr

原子半径小

原子半径小元素で構成された半導体 ⇒ 原子間の結合が強く、ワイドギャップ半導体
 原子間距離 Si: 0.235nm, SiC: 0.188nm, C (ダイヤモンド): 0.154nm
 結合が強い ⇒ 電気的、熱的、機械的、化学的に安定 ⇒ 高圧の耐性

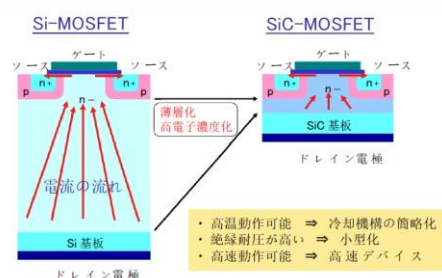
	3C-Si	3C-GaAs	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	2H-GaN	α , β -Ga ₂ O ₃	3C-C
バンドギャップ [eV]	1.1	1.4	2.2	3	3.26	3.39	~5	5.45
絶縁破壊電界 [MV/cm]	0.3	0.4	1.2	2.4	2.8	3.3	4~8	5~10

WBG パワーデバイスの優位性

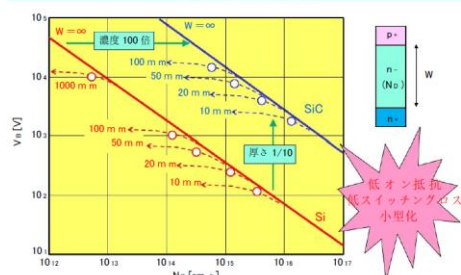
1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向
2. WBG パワーデバイスの優位性
 - 2-1. 半導体の物性値
 - 2-2. WBG の優位性
 - 2-3. WBG パワーデバイスのターゲット
3. WBG パワーデバイスの課題
4. 日本の地位と将来展望

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

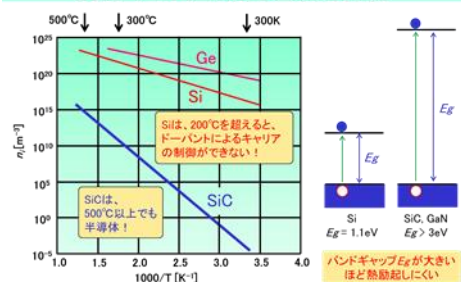
ワイドギャップ半導体への期待



WBG への期待



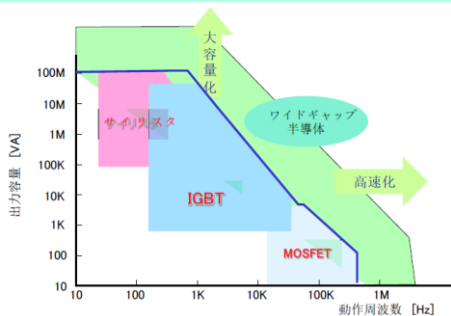
真性キャリア密度の温度依存性



WBG パワーデバイスの優位性

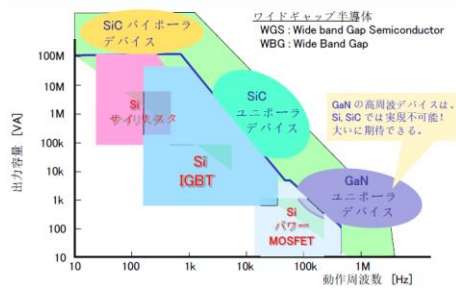
1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向
2. WBG パワーデバイスの優位性
 - 2-1. 半導体の物性値
 - 2-2. WBG の優位性
 - 2-3. WBG パワーデバイスのターゲット
3. WBG パワーデバイスの課題
4. 日本の地位と将来展望

WBG による用途拡大

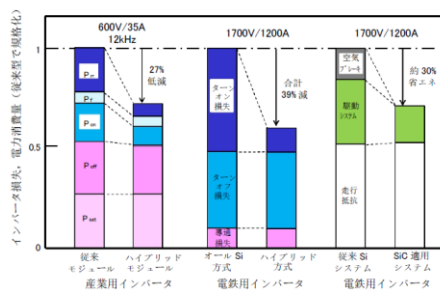


■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

現状のターゲットと技術開発の方向

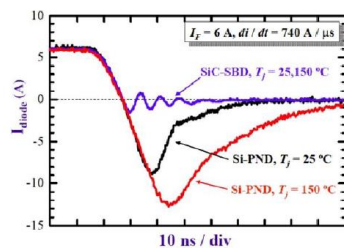


ハイブリッドインバータ

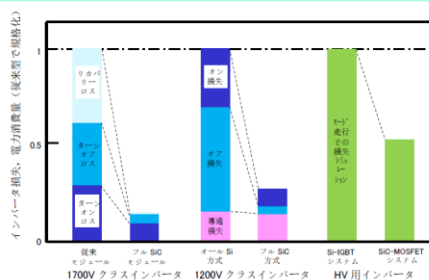


スイッチング特性の比較

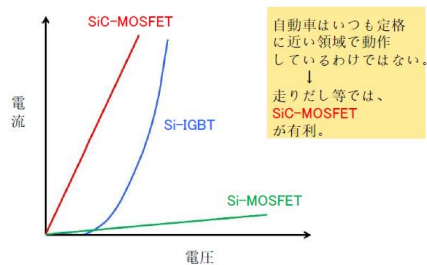
After The Institute of Applied Energy (2006.10)



フル SiC インバータ



低電流域での特性比較



■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

コイル、コンデンサの性能

コイル (インダクタ) の性能

$$\omega \times L$$

ω : 角周波数 ($2\pi f$, f : 周波数)
 L : 材料、形状で定まる値
 $\Rightarrow$ 大きくするには体積、重さが大きくなる

コンデンサ (キャパシタ) の性能

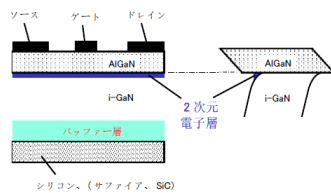
$$\omega \times C$$

C : 材料、形状で定まる値
 $\Rightarrow$ 大きくするには体積、重さが大きくなる

コイルやコンデンサを大きく (重く) することと、周波数を高くすることは同等

高周波数動作により装置を小型化できる

GaN パワーデバイスの特長

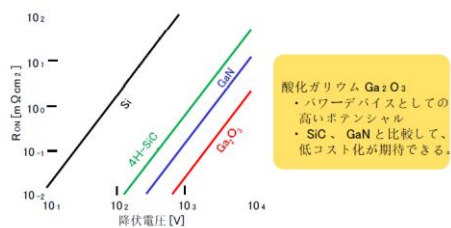


ヘテロ接合 $\Rightarrow$ 分極によるキャリアの生成
 $\Rightarrow$ 格子散乱、不純物散乱が少なく高速動作が可能

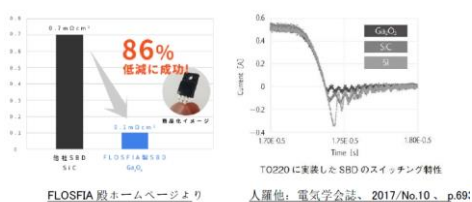
GaN パワーデバイスの実力



酸化ガリウムの優位性



α 酸化ガリウム SBD



■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

SiC パワーデバイスの課題

1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向
2. WBG パワーデバイスの優位性
3. WBG パワーデバイスの課題
 - 3-1. SiC パワーデバイスの課題
 - 3-2. 高温モジュールの課題
 - 3-3. GaN パワーデバイスの課題
4. 日本の地位と将来展望

少量量産から本格量産へ

ユーザーは、

- ・性能に対し、必要以上に金を払わない。
- ・コストメリットがなければ、適用評価はしない

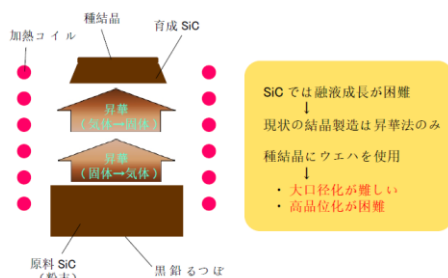
1 にコスト、2 に信頼性、
3、4 がなくて、5 に性能

量産性 (=コスト低減) がなければ、
Si には対抗できない!
⇒ 第 2 の GaAs の道をたどる

SiC パワーデバイスの課題

項目	内容
結晶/ウエハ製造	結晶育成 ・量産性向上要、転位/積層欠陥の低減要
	加工 ・硬いため加工が難しい
	エピ成長 ・高温成長、欠陥制御
チップ特性/製造	エピ成長 ・高温成長、欠陥制御
	イオン注入 ・200~500℃の高温アルミ注入
	活性化熱処理 ・1700℃以上の高温処理
	ゲート酸化 ・チャネル移動度、信頼性
モジュール構造/製造	トレレンチ加工 ・形状制御 (電界集中、被覆性)
	ダイシング ・ダイシング: 硬いため加工が難しい ・高温動作使用 (200~500℃) ・裏面電極、封止材、フィン構造、電流取出し等
周辺部品 (受動部品)	・インダクタ、キャパシタとも高周波で損失大 ・磁性体、誘電体の材料開発から

昇華法による SiC 結晶の製造



SiC パワーデバイスの本格量産に向けて

最大の足かせは結晶コスト!

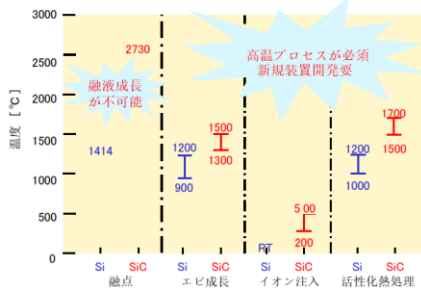


■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

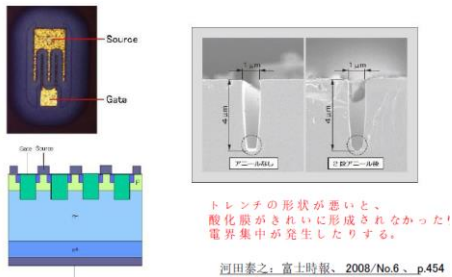
Si vs SiC 150mm 200mm 300mm VS SiC インゴット: 150mm × 直径以下 NEDO 超々大径ベージュ Si インゴット: 300mm × ~1m 生産性が大きく劣る	
昇華法 SiC の限界 CEATEC2017 ディスコンダース 1 インゴットからの取れ数 20 枚程度 KABRA プロセスは、 加工のブレークスルー になり得る	
種結晶の高品質化 c 面 a 面または m 面 a 面または m 面成長 c 面成長 m 面または a 面成長 RAF プロセス 高品質の結晶を作成できる可能性 はあるが、ともに量産には向かない 種結晶 単結晶 SiC 誘導コイル Si 融液 黒鉛のつぼ 断熱材 溶液法	
昇華法以外の挑戦 種結晶 単結晶 SiC 誘導コイル SiH₄, C₂H₆ 断熱材 結晶成長の量産機としては、 150mmφで、50cm ~ 1m の結晶育成が要求される ガス成長法では、原料の連続供給 が可能 ↓ 引き上げ機構の付加により、 長尺結晶の製造が可能 長時間高温に耐えられる装置開発 が鍵	
MOSFET の製造プロセス～トレンチゲート n+ ドレイン p+ ドレイン n+ ドレイン p+ コントラクト n+ ソース n+ ドレイン n+ ドレイン トレンチゲート ゲート酸化膜 n+ ドレイン ゲート電極 n+ ドレイン n+ ドレイン ソース電極 n+ ドレイン n+ ドレイン	

A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

SiC ウェハプロセスにおける高温処理



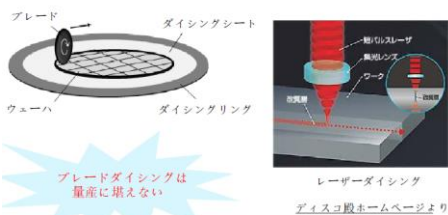
トレンチ加工



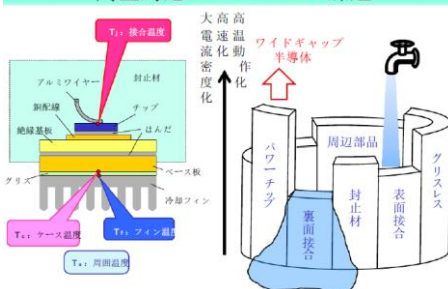
高温モジュールの課題

1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向
2. WBG パワーデバイスの優位性
3. WBG パワーデバイスの課題
 - 3-1. SiC パワーデバイスの課題
 - 3-2. 高温モジュールの課題
 - 3-3. GaN パワーデバイスの課題
4. 日本の地位と将来展望

ダイシング



高温対応モジュールの課題



■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

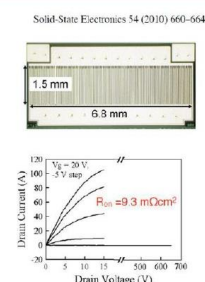
パワーモジュールの開発 高品位結晶供給可能メーカーは限られている 要素技術の発掘が鍵	
表面接合 ワイヤーボンディング リボンボンディング DLB: Direct beam Lead Bonding ② 受電機殿 めっき@富士電機殿&デンソー殿	
めっき技術 放熱技術 片面冷却 → 両面冷却へ 藤井他, 富士時報, 2009/No.6, p.362	
大電流通電 CEATEC2011 FUPET 殿	
裏面接合 はんだは 250℃程度が限界? → 金属ナノ粒子による接合の開発加速 自己凝集防止層 加重 加熱処理 (~250℃)	

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

封止材 東レ・ダウコーニング製、リリース資料 2010/02/10	
GaN パワーデバイスの課題 1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向 2. WBG パワーデバイスの優位性 3. WBG パワーデバイスの課題 3-1. SiC パワーデバイスの課題 3-2. 高温モジュールの課題 3-3. GaN パワーデバイスの課題 4. 日本の地位と将来展望	
ノーマリオフ化 ノーマリオン GaN-HEMT ノーマリオフ Si-MOSFET 最終形態の信頼性?	
電流コラプスの抑制 Current collapse ratio $L_{fp}=1\mu m$ $L_{fp}=3\mu m$ $L_{gd}=15\mu m$ Buffer layer Si Sub. Nishikida Shingo, et al., "High power AlGaN/GaN HEMTs on Si substrates" DPEC 2010	
コイル（インダクタ）の高周波化 鉄心 コイル コイルに電流が流れると磁石になる 磁束密度 B 外部磁界 H 保磁力 残留磁化 ヒステリシス損失 周波数が高い程損失が増大	

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

大容量化



現行の大容量 GaN パワーデバイス

横型デバイスでは、大容量化により、電極面積が拡大

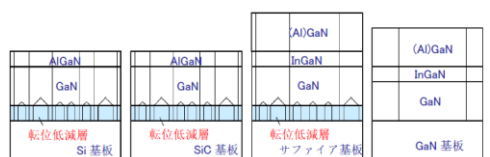
大容量化のためには、縦型デバイスが必須

GaN の自立基板が必須

GaN の結晶育成は、SiC 以上に難しい

GaN 中欠陥の基板依存性と適用デバイス

10s ~ 10s cm⁻² 10s ~ 10s cm⁻² ~ 10s cm⁻² 10s ~ 10s cm⁻²



パワーデバイス
高周波デバイス

高周波デバイス

LED (発光ダイオード)
LD (レーザーダイオード)
(パワーデバイス)

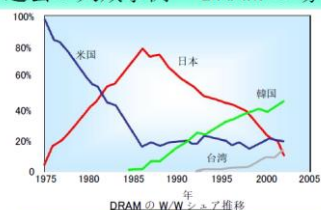
GaN 結晶製造法

製法	概要	特徴・課題
HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) 法	- Clガスと金属Gaを高温で反応 - サファイア、シリコン等の基板上で成長 - 温度: 1000°C - 気圧: 1気圧	- GaN基板作成の主流技術 - 多数枚成長困難 - 厚膜成長困難 - 大量生産に向き
Naフラックス法	- Ga-Na混合融液に窒素を溶解させ、GaN単結晶を成長 - 温度: 500~800°C - 気圧: 50~100気圧	- 高品質 - 低コストが期待できる
アモルサーマル結晶成長法	- 超臨界状態のアモニアにGaNを溶解させ、GaN単結晶を成長 - 温度: 300~500°C - 気圧: 1000~3000気圧	- 高品質 - 原理的に大型化可能 - 複数枚成長可能

日本の地位と 将来展望

1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向
2. WBG パワーデバイスの優位性
3. WBG パワーデバイスの課題
4. 日本の地位と将来展望

過去の失敗事例 ~ DRAM の場合

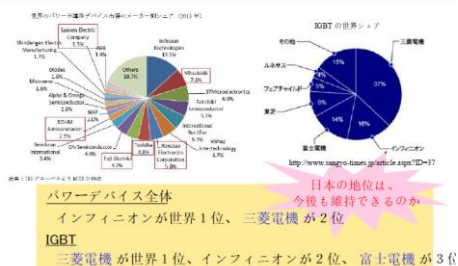


衰退の原因

- ・技術流出 (韓国、台湾を甘く見ていた)
- ・装置産業化 (以前はデバイスメーカーが装置開発)
- ・過剰な信頼性 (DRAM用にも10年保証)
- ・決断の遅さ (経営の問題)

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

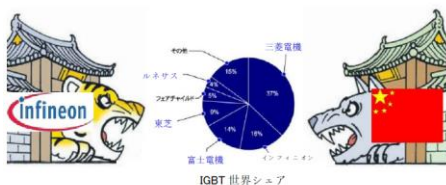
最近のパワーデバイスの世界シェア



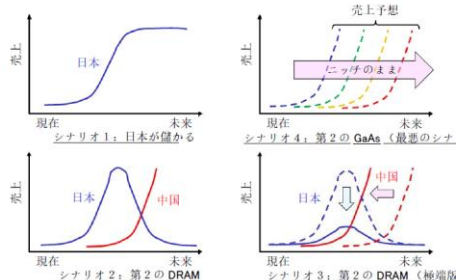
パワーデバイス業界の海外動向



前門のインフィニオン後門の中国



SiC パワーデバイスのシナリオ



まとめ

- Si パワーデバイス
 パワーデバイスは パワエレ産業を根拠から支えている。
 当面、主流は Si パワーデバイス (MOSFET、IGBT)
- ワイドギャップ半導体 (WGS) パワーデバイス
 WGS はパワーデバイス用として優位な物性値を有する。
 ⇒ WGS パワーデバイスへの期待大、ただし 課題が多い。
- WGS パワーデバイスの課題
 SiC: 結晶/ウエハ製造、高温処理、モジュール化
 GaN: ノーマリオフ、コラプス改善、縦型、受動部品
- パワーデバイス産業の展望
 今後、「前門のインフィニオン後門の中国」の中での
 苦しい戦いが予想される。

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師