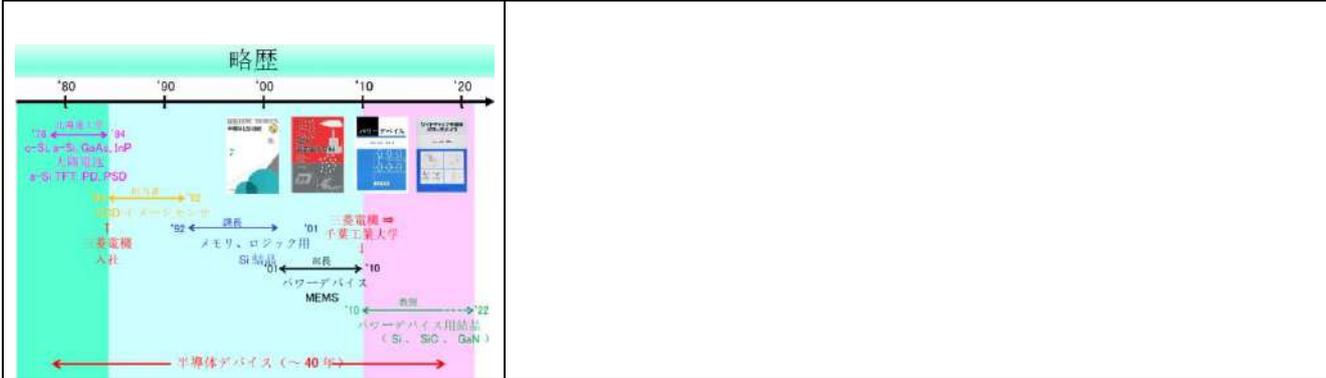


■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

### WBG パワーデバイスの技術開発動向

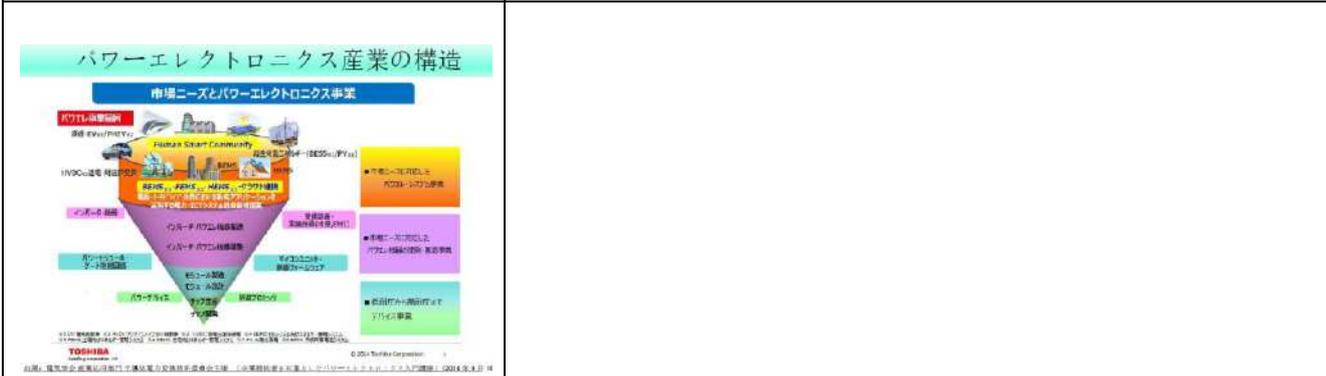
1. パワエレ/パワーデバイス産業の動向
2. WBG パワーデバイスの優位性
3. WBG パワーデバイスの課題
4. 日本の地位と将来展望

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



### 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



■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

### パワーデバイスの用途 2

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor  
 MOSFET: Metal Oxide semiconductor Field Effect Transistor

### 将来の電力系統～分散型発電

### スマートグリッド

### グリーンカーへの期待

SiCにより、冷却システム一本化  
 ハイブリッド車の冷却系統

### 電力変換の種類

電力変換	変換機器
直流→直流	DC-DCコンバータ
交流→直流(整流)	コンバータ
直流→交流	インバータ
交流→交流	コンバータ/インバータシステム
交流→交流(電圧のみ)	変圧器

パワーデバイスを活用して実現

交流電圧変動が大きい場合、現状電圧調整は難しい  
 交流電圧変動が大きい場合、現状電圧調整は難しい  
 交流電圧変動が大きい場合、現状電圧調整は難しい

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<p>コンバータ/インバータシステム</p> <p>交流電源 → コンバータ → 直流 → インバータ → 交流</p> <p>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)), 電流ダイオード (FWD), モーター</p> <p>IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor          FWD: Free Wheel Diode</p> <p>同じ数必要</p>	
<p>電力変換とパワーデバイスの損失</p> <p>V, I vs t</p> <p>オン電圧, 離れ電流</p> <p>損失 vs t</p> <p>Eon, Eoff, オン損失</p>	
<p>パワエレ/パワーデバイス産業の動向</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. パワエレ/パワーデバイス産業の動向             <ol style="list-style-type: none"> <li>1-1. パワエレ産業とパワーデバイス</li> <li>1-2. パワーデバイスの構造</li> <li>1-3. パワーデバイスの技術開発動向</li> </ol> </li> <li>2. WBG パワーデバイスの優位性</li> <li>3. WBG パワーデバイスの課題</li> <li>4. 日本の地位と将来展望</li> </ol>	
<p>パワーデバイスの構造 (LSI との比較)</p> <p>深さ (μm)</p> <p>(a) パワーチップ (600V IGBT)</p> <p>(b) MOS-LSI (多層配線)</p>	
<p>パワーチップの耐圧保持</p> <p>耐圧電圧 <math>V_{BR}</math> [V]</p> <p>不純物濃度 <math>N_c</math> [<math>\text{cm}^{-3}</math>]</p> <p>耐圧 [V]</p>	

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<p style="text-align: center;"><b>半導体デバイスの電極構造</b></p> <p>(a) MOS-LSI (b) パワーチップ (IGBT)</p>	
<p style="text-align: center;"><b>表面構造の比較</b></p> <p>(a) パワーチップ (トレンチ IGBT) (b) MOS-LSI (DRAM 縦積型)</p>	
<p style="text-align: center;"><b>IPM : Intelligent Power Module</b></p> <p>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</p>	
<p style="text-align: center;"><b>パワーモジュールの構造</b></p> <p>重要性能          ・絶縁性          ・大電流通電          ・放熱性          ・信頼性          ・高温動作</p>	
<p style="text-align: center;"><b>パワーチップのモジュール化 1</b></p> <p>IGBT 断面 ダイオード 断面</p>	

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<p>パワーチップのモジュール化2</p>	
<p>パワーモジュール構造と各部の温度</p>	
<p>パワーデバイスの動作パターン</p> <p>http://www.mitsubishielectric.co.jp/semiconductors/products/pdf/reliabilty/0512.pdf</p>	
<p>パワエレ / パワーデバイス産業の動向</p> <p>1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1-1. パワエレ産業とパワーデバイス</li> <li>1-2. パワーデバイスの構造</li> <li>1-3. パワーデバイスの技術開発動向</li> </ul> <p>2. WBG パワーデバイスの優位性</p> <p>3. WBG パワーデバイスの課題</p> <p>4. 日本の地位と将来展望</p>	
<p>パワーデバイスの進化の歴史</p> <p>IPM: Intelligent Power Module      HVIC: High Voltage IC</p>	

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<h3 style="text-align: center;">IGBT の大容量化</h3>	
<h3 style="text-align: center;">パワーデバイスの開発の柱</h3> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 高性能化: 微細化、構造改良 ⇒ サブミクロン化、新構造</li> <li>■ 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</li> <li>■ 多機能化: IGBT と Diode の一体化 ⇒ 逆導通 IGBT、逆阻止 IGBT</li> <li>■ 新材料: Si の限界を超える材料 ⇒ SiC, GaN (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C)</li> </ul> <p style="text-align: center;">FS: Field Stop</p>	
<h3 style="text-align: center;">IGBT の縦構造</h3>	
<h3 style="text-align: center;">薄ウエハプロセスフローの概略</h3>	
<h3 style="text-align: center;">パワーデバイス用ウエハの選定</h3>	

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<p style="text-align: center;"><b>IGBT の多機能化</b></p>																																																																									
<p style="text-align: center;"><b>WBG パワーデバイスの優位性</b></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #fff9c4;"> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向</li> <li>2. WBG パワーデバイスの優位性                     <ol style="list-style-type: none"> <li>2-1. 半導体の物性値</li> <li>2-2. WBG の優位性</li> <li>2-3. WBG パワーデバイスのターゲット</li> </ol> </li> <li>3. WBG パワーデバイスの課題</li> <li>4. 日本の地位と将来展望</li> </ol> </div>																																																																									
<p style="text-align: center;"><b>半導体の物性値比較</b></p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>3C-Si</th> <th>3C-GeAs</th> <th>3C-SiC</th> <th>4H-SiC</th> <th>4H-SiC</th> <th>2H-GaN</th> <th>α,β-GaN</th> <th>3C-G</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>バンドギャップ E<sub>g</sub>[eV]</td> <td>1.1</td> <td>1.4</td> <td>2.2</td> <td>3</td> <td>3.26</td> <td>3.39</td> <td>4.8 ~4.9</td> <td>5.45</td> </tr> <tr> <td>バンドタイプ</td> <td>間接</td> <td>直接</td> <td>間接</td> <td>間接</td> <td>間接</td> <td>直接</td> <td>直接 間接</td> <td>間接</td> </tr> <tr> <td>比誘電率 ε<sub>r</sub></td> <td>11.8</td> <td>12.8</td> <td>9.6</td> <td>9.7</td> <td>10</td> <td>9</td> <td>10</td> <td>5.5</td> </tr> <tr> <td>電子移動度 μ<sub>n</sub>[cm<sup>2</sup>/Vs]</td> <td>1350</td> <td>8500</td> <td>900</td> <td>370</td> <td>720</td> <td>900</td> <td>300</td> <td>1900</td> </tr> <tr> <td>絶縁破壊電界 E<sub>b</sub>[×10V/cm]</td> <td>0.3</td> <td>0.4</td> <td>1.2</td> <td>2.4</td> <td>2.8</td> <td>3.3</td> <td>4 ~8</td> <td>5 ~10</td> </tr> <tr> <td>電子飽和速度 v<sub>sat</sub>[×10cm/s]</td> <td>10</td> <td>20</td> <td>20</td> <td>20</td> <td>20</td> <td>25</td> <td>-</td> <td>27</td> </tr> <tr> <td>熱伝導率 κ[W/cmK]</td> <td>1.5</td> <td>0.5</td> <td>4.5</td> <td>4.5</td> <td>4.5</td> <td>1.3</td> <td>-</td> <td>20.8 33</td> </tr> </tbody> </table>		3C-Si	3C-GeAs	3C-SiC	4H-SiC	4H-SiC	2H-GaN	α,β-GaN	3C-G	バンドギャップ E <sub>g</sub> [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	間接	比誘電率 ε <sub>r</sub>	11.8	12.8	9.6	9.7	10	9	10	5.5	電子移動度 μ <sub>n</sub> [cm <sup>2</sup> /Vs]	1350	8500	900	370	720	900	300	1900	絶縁破壊電界 E <sub>b</sub> [×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 <sub>sat</sub> [×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	-	20.8 33	
	3C-Si	3C-GeAs	3C-SiC	4H-SiC	4H-SiC	2H-GaN	α,β-GaN	3C-G																																																																	
バンドギャップ E <sub>g</sub> [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	間接																																																																	
比誘電率 ε <sub>r</sub>	11.8	12.8	9.6	9.7	10	9	10	5.5																																																																	
電子移動度 μ <sub>n</sub> [cm <sup>2</sup> /Vs]	1350	8500	900	370	720	900	300	1900																																																																	
絶縁破壊電界 E <sub>b</sub> [×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 <sub>sat</sub> [×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	-	20.8 33																																																																	
<p style="text-align: center;"><b>ワイドギャップ半導体の優位性</b></p> <div style="text-align: center;"> <p>原子半径小</p> <table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td>I</td><td>II</td><td>III</td><td>IV</td><td>V</td><td>VI</td><td>VII</td><td>VIII</td></tr> <tr><td>H</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>He</td></tr> <tr><td>Li</td><td>Be</td><td>B</td><td>C</td><td>N</td><td>O</td><td>F</td><td>Ne</td></tr> <tr><td>Na</td><td>Mg</td><td>Al</td><td>Si</td><td>P</td><td>S</td><td>Cl</td><td>Ar</td></tr> <tr><td>K</td><td>Ca</td><td>Ga</td><td>Ge</td><td>As</td><td>Se</td><td>Br</td><td>Kr</td></tr> </table> <p>原子半径小</p> </div> <p>原子半径小元素で構成された半導体 ⇒ 原子間の結合が強い、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      結合強い ⇒ 電気的、熱的、機械的、化学的に安定 ⇒ 高圧の耐</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>3C-Si</th> <th>3C-GeAs</th> <th>3C-SiC</th> <th>4H-SiC</th> <th>4H-SiC</th> <th>2H-GaN</th> <th>α,β-GaN</th> <th>3C-G</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>バンドギャップ[eV]</td> <td>1.1</td> <td>1.4</td> <td>2.2</td> <td>3</td> <td>3.26</td> <td>3.39</td> <td>~5</td> <td>5.45</td> </tr> <tr> <td>絶縁破壊電界[MV/cm]</td> <td>0.3</td> <td>0.4</td> <td>1.2</td> <td>2.4</td> <td>2.8</td> <td>3.3</td> <td>4~8</td> <td>5~10</td> </tr> </tbody> </table>	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		3C-Si	3C-GeAs	3C-SiC	4H-SiC	4H-SiC	2H-GaN	α,β-GaN	3C-G	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						
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																																																																		
	3C-Si	3C-GeAs	3C-SiC	4H-SiC	4H-SiC	2H-GaN	α,β-GaN	3C-G																																																																	
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																																																																	
<p style="text-align: center;"><b>WBG パワーデバイスの優位性</b></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #fff9c4;"> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. パワエレ / パワーデバイス産業の動向</li> <li>2. WBG パワーデバイスの優位性                     <ol style="list-style-type: none"> <li>2-1. 半導体の物性値</li> <li>2-2. WBG の優位性</li> <li>2-3. WBG パワーデバイスのターゲット</li> </ol> </li> <li>3. WBG パワーデバイスの課題</li> <li>4. 日本の地位と将来展望</li> </ol> </div>																																																																									

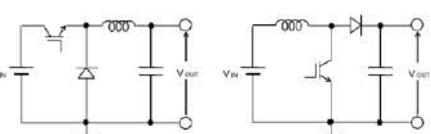
■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<p><b>ワイドギャップ半導体への期待</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>Si-MOSFET</b></p> <p>ドレイン電極</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>SiC-MOSFET</b></p> <p>ドレイン電極</p> </div> </div> <div style="margin-top: 10px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高温動作可能 ⇒ 冷却機構の省略化</li> <li>・絶縁耐圧が高い ⇒ 小型化</li> <li>・高速動作可能 ⇒ 高速デバイス</li> </ul> </div>	
<p><b>WBG への期待</b></p>	
<p><b>真性キャリア密度の温度依存性</b></p> <div style="margin-top: 10px;"> <p>Siは、200℃を超えると、ドーパントによるキャリアの制御ができない!</p> <p>SiCは、500℃以上でも半導体!</p> </div> <div style="margin-top: 10px;"> <p>バンドギャップEgが大きいほど熱励起にくい</p> <p>Si: Eg = 1.1eV, SiC, GaN: Eg &gt; 3eV</p> </div>	
<p><b>WBG パワーデバイスの優位性</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. パワエレノパワーデバイス産業の動向</li> <li>2. WBG パワーデバイスの優位性             <ol style="list-style-type: none"> <li>2-1. 半導体の物性値</li> <li>2-2. WBG の優位性</li> <li>2-3. WBG パワーデバイスのターゲット</li> </ol> </li> <li>3. WBG パワーデバイスの課題</li> <li>4. 日本の地位と将来展望</li> </ol>	
<p><b>WBG による用途拡大</b></p>	

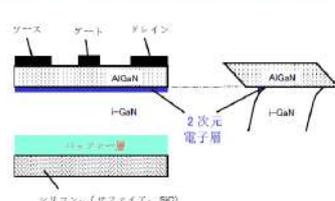
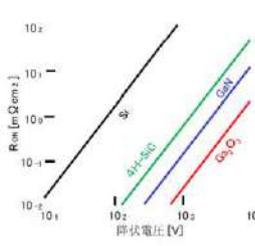
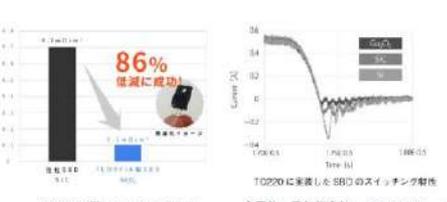
■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<h3>現状のターゲットと技術開発の方向</h3> <p>ワイドギャップ半導体          WGS: Wide band Gap Semiconductor          WBG: Wide Band Gap</p>	
<h3>ハイブリッドインバータ</h3> <p>インバータ損失, 電力消費量 (従来の形式で規格化)</p>	
<h3>スイッチング特性の比較</h3> <p>After The Institute of Applied Energy (2006, 10)</p> <p><math>I_g = 6 \text{ A}, di/dt = 740 \text{ A}/\mu\text{s}</math></p> <p>SiC-SBD, <math>T_j = 25, 150 \text{ }^\circ\text{C}</math>          Si-PND, <math>T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}</math>          Si-PND, <math>T_j = 150 \text{ }^\circ\text{C}</math></p> <p>10 ns / div</p>	
<h3>フル SiC インバータ</h3> <p>インバータ損失, 電力消費量 (従来の形式で規格化)</p>	
<h3>低電流域での特性比較</h3> <p>自動車はいつも定格に近い領域で動作しているわけではない。          ↓          走りだし等では、SiC-MOSFET が有利。</p>	

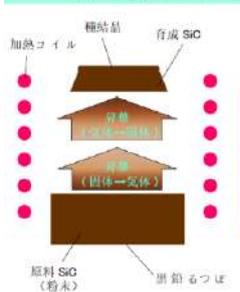
■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<p><b>三菱電機のフル SiC インバータ</b></p> <p>2015年6月22日 三菱電機ニュースリリース</p>  <p>小田急電鉄1000形リニューアル車</p> <p>フルSiC適用VVVFインバーター装置</p> <p><b>実証結果</b> (秋葉原駅16年1月17日～6月8日に行った営業運転区間における実運転の平均値)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・加速時の力行電力量が約12%減少</li> <li>・電車の走行に使用した電力量に対する、減速時の電力回生ブレーキで制御に供した回生電力量の比率である電力回生率が従来システムの31.1%から32.1%に向上</li> <li>・全体として約40%の省エネ効果を実証</li> </ul>	
<p><b>WBG パワーデバイスの優位性</b></p> <p>旭島SiC応用技術(株)・ホームページ</p> <p>GEATEC2014 NEDO デモンストレーション</p> <p>加速部応用(真空管⇔半導体)</p> <p>GaN パワーコンディショナ 安川電機</p> <p>小型化</p> <p>モータードライブ車のパワーユニット</p> <p>フルSiC適用VVVFインバーター装置 三菱電機ニュースリリース</p> <p>宇宙空間ではフィンが役に立たない</p> <p>試作品の性能はSiを凌駕する</p>	
<p><b>一例～自動車用途</b></p> <p>旭島実証: 第11回PDEA パワーデバイスセミナー</p> <p>ホンダ燃料電池車 CLARITY DC-DC コンバータに SiC を適用</p> <p>ハイブリッド車に SiC が適用できるかをシミュレーション</p> <p>⇒歩留まりが Si と同じで価格が 1.5 倍 (夢のような状況) なら、2030 年に適用可能 (⇒事実上当面使えない)</p> <p>SiC を使いきれずエンジンルームで放棄の多い</p> <p>廃棄(空気をこの方向からとる見えない)</p> <p>エンジン冷却システム</p> <p>ヒートポンプシステム</p> <p>冷却システム</p> <p>エンジン</p> <p>燃料電池</p> <p>DC-DCコンバータ</p>	
<p><b>AC アダプター</b></p> <p>壊れて大きいのはコイルが原因</p> 	
<p><b>DC-DC コンバータ</b></p>  <p>降圧チャップマン回路 (V<sub>in</sub> &gt; V<sub>out</sub>)</p> <p>昇圧チャップマン回路 (V<sub>in</sub> &lt; V<sub>out</sub>)</p> <p>コイルにエネルギーを蓄えることによって、直流の降圧も昇圧も可能</p>	

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<p><b>コイル、コンデンサの性能</b></p> <p>コイル (インダクタ) の性能</p> $\omega \times L$ <p><math>\omega</math>: 角周波数 (<math>2\pi f</math>, <math>f</math>: 周波数)  <math>L</math>: 材料、形状で異なる  <math>\Rightarrow</math> 大きくするには体積、重さが大きくなる</p> <p>コンデンサ (キャパシタ) の性能</p> $\omega \times C$ <p><math>C</math>: 材料、形状で異なる  <math>\Rightarrow</math> 大きくするには体積、重さが大きくなる</p> <p>コイルやコンデンサを大きく (重く) すること、周波数を高くすることは同等</p> <p>高周波数動作により装置を小型化できる</p>	
<p><b>GaN パワーデバイスの特長</b></p>  <p>ヘテロ接合 <math>\Rightarrow</math> 分極によるキャリアの生成  <math>\Rightarrow</math> 格子散乱、不純物散乱が少なく高速動作が可能</p>	
<p><b>GaN パワーデバイスの実力</b></p>  <p>トランスフォーム・ジャンクション</p> <p>山崎電機工業</p>	
<p><b>酸化ガリウムの優位性</b></p>  <p>酸化ガリウム <math>Ga_2O_3</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・パワーデバイスとしての高いポテンシャル</li> <li>・SiC、GaNと比較して、低コスト化が期待できる。</li> </ul>	
<p><b><math>\alpha</math> 酸化ガリウム SBD</b></p>  <p>86% 低減に成功!</p> <p>T0220 に実装した SBD のスイッチング特性</p> <p>FLOSFIA 総ホームページより          人権他、電気学会誌、2017/No.10、p.69</p>	

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<p style="text-align: center;"><b>SiC パワーデバイスの課題</b></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. パワエレ/パワーデバイス産業の動向</li> <li>2. WBG パワーデバイスの優位性</li> <li>3. WBG パワーデバイスの課題                         <ol style="list-style-type: none"> <li>3-1. SiC パワーデバイスの課題</li> <li>3-2. 高温モジュールの課題</li> <li>3-3. GaN パワーデバイスの課題</li> </ol> </li> <li>4. 日本の地位と将来展望</li> </ol> </div>																										
<p style="text-align: center;"><b>少量量産から本格量産へ</b></p> <p>ユーザーは、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・性能に対し、必要以上に金を払わない。</li> <li>・コストメリットがなければ、適用評価はしない</li> </ul> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">1 にコスト、2 に信頼性、 3、4 がなくて、5 に性能</p> <p style="text-align: center;">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</p>																										
<p style="text-align: center;"><b>SiC パワーデバイスの課題</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">項目</th> <th style="text-align: left;">内容</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">結晶/ウエハ製造</td> <td>結晶育成</td> <td>・量産性向上要、転位/積層欠陥の低減要</td> </tr> <tr> <td>加工</td> <td>・磨いため加工が難しい</td> </tr> <tr> <td rowspan="5">チップ特性/製造</td> <td>エピ成長</td> <td>・高温成長、欠陥制御</td> </tr> <tr> <td>エピ成長</td> <td>・高温成長、欠陥制御</td> </tr> <tr> <td>イオン注入</td> <td>・200~500°Cの高温アルミ注入</td> </tr> <tr> <td>活性化熱処理</td> <td>・1700°C以上の高温処理</td> </tr> <tr> <td>ゲート酸化</td> <td>・チャネル移動度、信頼性</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">モジュール構造/製造</td> <td>トレッチ加工</td> <td>・形状制御(電界集中、被覆性)</td> </tr> <tr> <td>モジュール構造/製造</td> <td>・ダイシング: 磨いため加工が難しい ・高温動作使用(200~500°C) ・裏面電極、封止材、フロン構造、電流取出し等</td> </tr> <tr> <td>周辺部品(受動部品)</td> <td>・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</td> </tr> </tbody> </table>	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	・磨いため加工が難しい	チップ特性/製造	エピ成長	・高温成長、欠陥制御	エピ成長	・高温成長、欠陥制御	イオン注入	・200~500°Cの高温アルミ注入	活性化熱処理	・1700°C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	トレッチ加工	・形状制御(電界集中、被覆性)	モジュール構造/製造	・ダイシング: 磨いため加工が難しい ・高温動作使用(200~500°C) ・裏面電極、封止材、フロン構造、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	
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	・磨いため加工が難しい																								
チップ特性/製造	エピ成長	・高温成長、欠陥制御																								
	エピ成長	・高温成長、欠陥制御																								
	イオン注入	・200~500°Cの高温アルミ注入																								
	活性化熱処理	・1700°C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	トレッチ加工	・形状制御(電界集中、被覆性)																								
	モジュール構造/製造	・ダイシング: 磨いため加工が難しい ・高温動作使用(200~500°C) ・裏面電極、封止材、フロン構造、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																									
<p style="text-align: center;"><b>昇華法による SiC 結晶の製造</b></p>  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p>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 ↓ ・大口転化が難しい ・高品質化が困難</p> </div>																										
<p style="text-align: center;"><b>SiC パワーデバイスの本格量産に向けて</b></p> <p style="text-align: center; color: red; font-weight: bold;">最大の足かせは結晶コスト!</p> <p style="text-align: center; font-size: small;">半導体産業新聞 2014年12月3日</p>  <p style="font-size: x-small;">生産性が低いSiC単結晶ウエハ「S」に代換できるのはコスト削減のみ</p>																										





■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<p>パワーモジュールの開発</p> <p>高品位結晶供給可能メーカーは限られている</p> <p>要素技術の発掘が鍵</p>	
<p>表面接合</p> <p>DLB: Direct beam Lead Bonding ② 2-Beam照射</p> <p>高電圧省電化 信頼性向上 両面冷却</p> <p>富士通半導体技術開発センター</p>	
<p>めっき技術</p> <p>放熱技術 片面冷却 → 両面冷却へ</p> <p>藤井他, 富士通誌, 2009, No.6, p.362</p>	
<p>大電流通電</p> <p>GEATEQ2011 FUPET 社</p> <p>セラミック</p> <p>電圧 電流</p> <p>温度 (°C)</p> <p>Time (μs)</p>	
<p>裏面接合</p> <p>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</p> <p>自己融集防止層 金属ナノ粒子 チップ 銅板 加重</p> <p>ナノサイズ 粒子径</p> <p>銅ナノペース 塗布 または印刷</p> <p>加熱処理 (~250℃)</p>	

■ 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・ダウコーニング社、リソース資料 2010/02/14

### 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

### 電流コラプスの抑制

Market Boost: GaN High power MOS/GaN (FET) on Si Laboratories (DEC 2011)

### コイル (インダクタ) の高周波化

コイルに電流が流れると磁石になる。  
コイルに電流を流し、鉄心を磁化する事により、エネルギー(電流を流し続ける能力)を蓄える。  
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 ~ 10μs cm<sup>-2</sup>

AlGaIn  
GaN  
緩位低減層  
Si 基板

10s ~ 10μs cm<sup>-2</sup>

AlGaIn  
GaN  
緩位低減層  
SiC 基板

10s ~ 10μs cm<sup>-2</sup>

AlGaIn  
GaN  
緩位低減層  
サファイア基板

10s ~ 10μs cm<sup>-2</sup>

(AlGaIn)  
InGaIn  
GaN  
GaN 基板

パワーデバイス 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	<ul style="list-style-type: none"> <li>Clガスと金属Gaを高圧で反応</li> <li>サファイア、シリコン等の基板上で成長</li> <li>温度: 1000°C</li> <li>気圧: 1気圧</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GaN基板作成の主流技術</li> <li>多数粒成長困難</li> <li>界面成長困難</li> <li>大量生産に向き</li> </ul>
Naフラックス法	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ga-Na融合液に窒素を溶解させ、GaN単結晶を成長</li> <li>温度: 500~800°C</li> <li>気圧: 50~100気圧</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高品質</li> <li>製造コストが期待できる</li> </ul>
アモルファム結晶成長法	<ul style="list-style-type: none"> <li>超臨界状態のアモニアとGaNを溶解させ、GaN単結晶を成長</li> <li>温度: 300~500°C</li> <li>気圧: 1000~3000気圧</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高品質</li> <li>短周期的に大量化可能</li> <li>複数粒成長可能</li> </ul>

---

### 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

DRAMのW/Wシェア推移

**衰退の原因**

- ・技術理由 (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)

横浜パワーエレクトロニクスカレッジ

17

アドバンスト・コース

■ A1 【WBG パワーデバイスの技術開発動向】 山本講師

<p><b>最近のパワーデバイスの世界シェア</b></p> <p>パワーデバイス全体          インフィニオンが世界1位、三菱電機が2位</p> <p>IGBT          三菱電機が世界1位、インフィニオンが2位、富士電機が3位</p> <p>日本の地位は、今後も維持できるのか</p>	
<p><b>パワーデバイス業界の海外動向</b></p> <p>日本メーカーは、300mm 化を着手!</p> <p>日本"国"は、SiC、GaNには支援しているがパワーエレクトロニクスを支える肝心のSiには支援なし!</p>	
<p><b>前門のインフィニオン後門の中国</b></p> <p>前門のインフィニオン後門の中国</p>	
<p><b>SiC パワーデバイスのシナリオ</b></p> <p>シナリオ1: 日本が優勢</p> <p>シナリオ2: 第2の DRAM</p> <p>シナリオ3: 第2の DRAM (極端版)</p> <p>シナリオ4: 第2の GaN (最悪のシナリオ)</p>	
<p><b>まとめ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Si パワーデバイス              パワーデバイスはパワーエレクトロニクス産業を根底から支えている。当面、主流は Si パワーデバイス (MOSFET、IGBT)</li> <li>▶ 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れた物性値を有する。              ⇒ WGS パワーデバイスへの期待大、ただし課題が多い。</li> <li>▶ 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</li> <li>▶ 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。</li> </ul>	