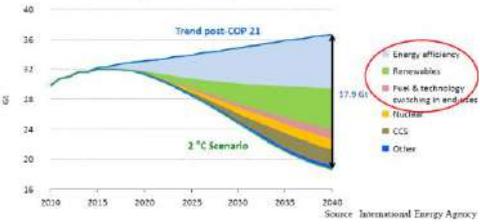


■ A12 【WBG パワーデバイス・事業展開への課題】 高橋講師

<h2 style="text-align: center;">WBGデバイスと技術課題</h2> <p style="text-align: center;">東北大学 高橋良和</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 1. 背景 <ol style="list-style-type: none"> 1.1 パワエレに対する社会ニーズ 1.2 Siパワーデバイスの限界 1.3 SiC、GaNパワーデバイスへの期待と課題 2. GaN on Siデバイスの基盤技術と要求特性 (WBGデバイスの1例) <ol style="list-style-type: none"> 2.1 ノーマリーオフ化 2.2 低オン抵抗化 3. GaN on Siデバイスの実測結果 4. パワーモジュールの重要性 5. GaN on Siデバイスを用いたDC-DCコンバータの開発例 6. 最近のパワーデバイス、モジュールの状況 7. まとめ 	
<p style="text-align: center;">今後電力の消費は世界のすべての地域に拡大</p>  <p style="text-align: right; font-size: small;">Credit: NASA</p>	
<p style="text-align: center;">脱炭素化世界の実現にはパワエレ技術の向上が必須</p> <p style="font-size: x-small;">UN CLIMATE PRESS RELEASE / 15 DEC 2023 New Era of Global Climate Action To Begin Under Paris Climate Change Agreement</p>  <p>COP24</p>	
<p>地球温暖化対策はエネルギー効率向上、再生可能エネルギー拡大などが重要</p> <p style="background-color: #0070C0; color: white; padding: 2px;">CO₂削減にはパワエレ技術の向上がキー</p> <p style="font-size: x-small;">CO₂ emissions in a post COP 21 world</p>  <p style="font-size: x-small;">Source: International Energy Agency</p>	

■ A12 【WBG パワーデバイス・事業展開への課題】 高橋講師

<p>パワーエレクトロニクスはエネルギー問題のキーテクノロジー</p> <p>省エネ、CO2削減、パワーマネージメントは様々な電力容量帯で取り組まれている</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 1. 背景 <ol style="list-style-type: none"> 1.1 パワーエレクトロニクスに対する社会ニーズ 1.2 Siパワーデバイスの限界 1.3 SiC、GaNパワーデバイスへの期待と課題 2. GaN on Siデバイスの基礎技術と要求特性 (WBGデバイスの1例) <ol style="list-style-type: none"> 2.1 ノーマリーオフ化 2.2 低オン抵抗化 3. GaN on Siデバイスの実測結果 4. パワーモジュールの重要性 5. GaN on Siデバイスを用いたDC-DCコンバータの開発例 6. 最近のパワーデバイス、モジュールの状況 7. まとめ 	
<p>Siデバイスの適用範囲と限界</p>	
<p>Siデバイスでは損失が大きく高周波化のメリットが享受できない</p> <p>Si-IGBTの場合</p> <ul style="list-style-type: none"> 高周波化の利点: 電流リップルを減少 (高品質な電流波形) トランス、リアクトル、コンデンサの小型化 静寂性 高周波化の欠点: スイッチング損失の増加 (デバイス温度の上昇) 装置効率の低下 	
<p>Si-IGBTの高周波化の限界</p> <p>周波数を上げ綺麗な波形にしようするとチップ温度が上昇</p>	

■ A12 【WBG パワーデバイス・事業展開への課題】 高橋講師

<ol style="list-style-type: none"> 1. 背景 <ol style="list-style-type: none"> 1.1 パワエレに対する社会ニーズ 1.2 Siパワーデバイスの限界 1.3 SiC, GaNパワーデバイスへの期待と課題 2. GaN on Siデバイスの基礎技術と要求特性 (WBGデバイスの1例) <ol style="list-style-type: none"> 2.1 ノーマリーオフ化 2.2 低オン抵抗化 3. GaN on Siデバイスの実測結果 4. パワーモジュールの重要性 5. GaN on Siデバイスを用いたDC-DCコンバータの開発例 6. 最近のパワーデバイス、モジュールの状況 7. まとめ 	
---	--

<p style="text-align: center;">WBG デバイスへの期待</p> <p>SiC, GaNは絶縁層の電圧降下が3MV/cmとSiに比べて一桁高い値を示す。 ⇒ベース層を薄く出来る⇒オン抵抗を小さく出来る バンドギャップが広い ⇒ 高温で動作可能</p> <p style="text-align: center;">代表的半導体諸品の数値比較</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Si</th> <th>4H-SiC</th> <th>GaN</th> <th>ダイヤモンド</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>バンドギャップ (eV)</td> <td>1.12</td> <td>3.26</td> <td>3.39</td> <td>5.47</td> </tr> <tr> <td>電子移動度 (cm²/Vs)</td> <td>1500</td> <td>1000</td> <td>900</td> <td>2200</td> </tr> <tr> <td>正孔移動度 (cm²/Vs)</td> <td>500</td> <td>120</td> <td>150</td> <td>1600</td> </tr> <tr> <td>リットル移動度 (cm²/Vs)</td> <td>500</td> <td>140</td> <td>1500</td> <td>3600</td> </tr> <tr> <td>最大電界強度 (MV/cm)</td> <td>0.3</td> <td>3.0</td> <td>3.3</td> <td>10.0</td> </tr> <tr> <td>最大電界強度比</td> <td>1</td> <td>10</td> <td>11</td> <td>33</td> </tr> <tr> <td>熱伝導率 (W/cmK)</td> <td>1.5</td> <td>4.9</td> <td>2.0</td> <td>20.0</td> </tr> <tr> <td>熱伝導率Si比</td> <td>1</td> <td>3.3</td> <td>1.3</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>飽和速度 (cm/s)</td> <td>1.0E7</td> <td>2.2E7</td> <td>2.7E7</td> <td>2.7E7</td> </tr> <tr> <td>誘電率</td> <td>11.8</td> <td>9.7</td> <td>9.0</td> <td>5.5</td> </tr> </tbody> </table>		Si	4H-SiC	GaN	ダイヤモンド	バンドギャップ (eV)	1.12	3.26	3.39	5.47	電子移動度 (cm ² /Vs)	1500	1000	900	2200	正孔移動度 (cm ² /Vs)	500	120	150	1600	リットル移動度 (cm ² /Vs)	500	140	1500	3600	最大電界強度 (MV/cm)	0.3	3.0	3.3	10.0	最大電界強度比	1	10	11	33	熱伝導率 (W/cmK)	1.5	4.9	2.0	20.0	熱伝導率Si比	1	3.3	1.3	13	飽和速度 (cm/s)	1.0E7	2.2E7	2.7E7	2.7E7	誘電率	11.8	9.7	9.0	5.5	
	Si	4H-SiC	GaN	ダイヤモンド																																																				
バンドギャップ (eV)	1.12	3.26	3.39	5.47																																																				
電子移動度 (cm ² /Vs)	1500	1000	900	2200																																																				
正孔移動度 (cm ² /Vs)	500	120	150	1600																																																				
リットル移動度 (cm ² /Vs)	500	140	1500	3600																																																				
最大電界強度 (MV/cm)	0.3	3.0	3.3	10.0																																																				
最大電界強度比	1	10	11	33																																																				
熱伝導率 (W/cmK)	1.5	4.9	2.0	20.0																																																				
熱伝導率Si比	1	3.3	1.3	13																																																				
飽和速度 (cm/s)	1.0E7	2.2E7	2.7E7	2.7E7																																																				
誘電率	11.8	9.7	9.0	5.5																																																				

<p style="text-align: center;">主要WBGデバイスの周波数と耐圧の関係</p> <p>縦型構造: 高耐圧向き、高周波用途には難有り 横型構造: 高周波向き、高耐圧用途には難有り</p>	
---	--

<p style="text-align: center;">最新デバイスの最適アプリケーション例</p> <p>600V, 1200V, 1700V, 3300V, ~15kV</p> <p>Low loss High voltage, Low loss High frequency</p>	
--	--

<p style="text-align: center;">高周波化のメリット: トランス、リアクトルの小型化</p> <p>理想的な磁性体なら高周波化が進めば小型化が進む 実際は磁気特性の飽和により小型化が進まず</p>	
--	--

■ A12 【WBG パワーデバイス・事業展開への課題】 高橋講師

<p>トランス用コア材料の比較例</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Mg-Zn系フェライト</p> <p>1MHzを超えるとインダクタンスとして機能しない</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Ni-Zn系フェライト</p> <p>数10MHzまでインダクタンスとして機能、ただし値は小さい</p> </div> </div> <p style="text-align: center; color: blue; font-weight: bold;">→</p> <p style="text-align: center;">材料選定含めた研究・開発が重要</p>													
<p>高周波駆動には熱抵抗・放熱性の大幅な改善が重要</p> <p>GaN-on-Siデバイスの駆動周波数とデバイス温度の関係</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>20KHz</td> <td>40KHz</td> <td>100KHz</td> <td>200KHz</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ΔT 6.9 degree</td> <td>8.4 degree</td> <td>12.3 degree</td> <td>16.9 degree</td> </tr> </table> <p style="background-color: blue; color: white; padding: 5px;">GaN-on-Siデバイスは高周波駆動に於いてもデバイス温度の上昇は小さいがさらなる高周波化のためにはパワーモジュールによる低熱抵抗化・高放熱化が重要</p> <p style="text-align: right; font-size: small;">© 2011 Toshiba Electronics (Europe) Ltd.</p>	20KHz	40KHz	100KHz	200KHz					ΔT 6.9 degree	8.4 degree	12.3 degree	16.9 degree	
20KHz	40KHz	100KHz	200KHz										
ΔT 6.9 degree	8.4 degree	12.3 degree	16.9 degree										
<p>高周波駆動には熱抵抗・放熱性の大幅な改善が重要</p> <p style="text-align: right; color: red; font-weight: bold;">R_{θJT}: High</p> <p style="text-align: center;"> $T = R_{\theta JT} \times P + T_a$ </p>													
<p>高周波駆動には熱抵抗・放熱性の大幅な改善が重要</p> <p style="text-align: right; color: blue; font-weight: bold;">R_{θJT}: Small</p> <p style="text-align: center;"> $T = R_{\theta JT} \times P + T_a$ </p>													
<p>GaNデバイス適用のアプリケーション市場は急激に拡大</p> <p style="text-align: center; color: red; font-weight: bold;">アプリケーションの拡大</p>													

■ A12 【WBG パワーデバイス・事業展開への課題】 高橋講師

<p style="text-align: center;">GaN-on-Si, SiC, Siの物性比較</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 1. 背景 <ol style="list-style-type: none"> 1.1 パワエレに対する社会ニーズ 1.2 Siパワーデバイスの限界 1.3 SiC、GaNパワーデバイスへの期待と課題 2. GaN on Siデバイスの基盤技術と要求特性 (WBGデバイスの1例) <ol style="list-style-type: none"> 2.1 ノーマリーオフ化 2.2 低オン抵抗化 3. GaN on Siデバイスの実測結果 4. パワーモジュールの重要性 5. GaN on Siデバイスを用いたDC-DCコンバータの開発例 6. 最近のパワーデバイス、モジュールの状況 7. まとめ 	
<p style="text-align: center;">WBGデバイス開発のポイント</p> <p>必要とされる特性</p> <div style="text-align: center;"> <p>トレードオフ関係</p> <p>低オン電圧 (オン抵抗) ↔ ノーマリーオフ特性</p> </div> <p style="text-align: center;">ポイント: 上記2特性を同時に向上</p>	
<p style="text-align: center;">パワーデバイスの重要な特性: ノーマリーオフ特性</p> <p>ノーマリーオフデバイス: オフ時にゲート逆バイアスをかけなくてもノイズなどで誤オンしないため安全に使用できる。</p> <p>現在のほぼすべてのパワエレ機器はノーマリーオフデバイスをベースに設計されている。</p> <p>↓</p> <p>しかしながら、酸化膜 (SiO₂) を作れない(MOS構造ができない) GaNデバイスにとってノーマリーオフ特性の確保は大きな課題</p>	
<p style="text-align: center;">典型的なGaNパワーデバイスの構造(ノーマリーオン)</p> <p>HEMT: 高電子移動度トランジスタ High Electron Mobility Transistorの略 Si基板上にGaNを成長させて素子を作る→コストが高い、構造</p> <p>ノーマリーオン構造</p> <p>1) $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$程度の高濃度電子が発生する 2) アンダー層GaN層を流れるので移動度が高い</p>	

■ A12 【WBG パワーデバイス・事業展開への課題】 高橋講師

<p>ノーマリーオンデバイスとノーマリーオフデバイスの構造の違いの例</p> <p>従来のAlGaN/GaN デバイス構造</p> <p>ノーマリーオフデバイス構造</p>	
<p>ノーマリーオフデバイスのエネルギーバンド構造例</p> <p>ゲートがOVでチャネルが空乏化 ⇒ ノーマリーオフ</p> <p>エネルギーバンド構造 (ゲートバイアス OV時)</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 背景 <ol style="list-style-type: none"> 1.1 パワエレに対する社会ニーズ 1.2 Siパワーデバイスの限界 1.3 SiC、GaNパワーデバイスへの期待と課題 GaN on Siデバイスの基礎技術と要求特性 (WBGデバイスの1例) <ol style="list-style-type: none"> 2.1 ノーマリーオフ化 2.2 低オン抵抗化 GaN on Siデバイスの実測結果 パワーモジュールの重要性 GaN on Siデバイスを用いたDC-DCコンバータの開発例 最近のパワーデバイス、モジュールの状況 まとめ 	
<p>ホール注入による低オン抵抗化例</p> <p>ゲート電圧が正、pn接合の順方向オン電圧Vf以下の場合、通常のFET動作</p> <p>ゲート電圧がpn接合の順方向オン電圧Vfを上回るとゲートからホール注入、電子も発生。ホールの移動度 << 電子の移動度のため電子の移動が主になりオン抵抗が劇的に低下</p> <p>低オン抵抗化</p> <p>ゲートからホールが注入</p> <p>電子発生</p> <p>ドレイン電流増大</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 背景 <ol style="list-style-type: none"> 1.1 パワエレに対する社会ニーズ 1.2 Siパワーデバイスの限界 1.3 SiC、GaNパワーデバイスへの期待と課題 GaN on Siデバイスの基礎技術と要求特性 (WBGデバイスの1例) <ol style="list-style-type: none"> 2.1 ノーマリーオフ化 2.2 低オン抵抗化 GaN on Siデバイスの実測結果 パワーモジュールの重要性 GaN on Siデバイスを用いたDC-DCコンバータの開発例 最近のパワーデバイス、モジュールの状況 まとめ 	

■ A12 【WBG パワーデバイス・事業展開への課題】 高橋講師

<p>デバイスからシステムまで</p>	
<p>代表的なパワーデバイスのオン抵抗特性</p>	
<p>代表的なパワーデバイスのスイッチング損失特性</p>	
<p>代表的なパワーデバイスのターンオン波形</p> <p>高速ではあるが反面、振動性でもある⇒対策が必要</p>	
<p>代表的なパワーデバイスのターンオフ波形</p> <p>高速ではあるが反面、振動性でもある⇒対策が必要</p>	

■ A12 【WBG パワーデバイス・事業展開への課題】 高橋講師

<ol style="list-style-type: none"> 1. 背景 <ol style="list-style-type: none"> 1.1 パワエレに対する社会ニーズ 1.2 Siパワーデバイスの限界 1.3 SiC、GaNパワーデバイスへの期待と課題 2. GaN on Siデバイスの基礎技術と要求特性 (WBGデバイスの1例) <ol style="list-style-type: none"> 2.1 ノーマリーオフ化 2.2 低オン抵抗化 3. GaN on Siデバイスの実測結果 4. パワーモジュールの重要性 5. GaN on Siデバイスを用いたDC-DCコンバータの開発例 6. 最近のパワーデバイス、モジュールの状況 7. まとめ 	
<p style="text-align: center;">デバイスからシステムまで</p>	
<p style="text-align: center;">先端パワーモジュールのコンセプト</p> <p style="text-align: center;">Contribute Power Electronics Application</p>	
<p style="text-align: center;">パワーモジュール高パワー密度化研究例</p> <p>◆ Interconnections must be updated to increase Power density</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> </div> <p style="text-align: center;">Small Power density to handle Large</p> <p>GaN-on-Si Device's interconnection should be like a Cu lead frame</p>	
<p style="text-align: center;">ワイヤボンディングとリードフレーム構造での温度観察例</p> <p style="text-align: center;">Temperature distribution of the chip surfaces</p>	

■ A12 【WBG パワーデバイス・事業展開への課題】 高橋講師

<p>低インダクタンス化の効果</p> <p>スライク電圧抑制</p> <p>電圧・電流振動抑制</p> <p>スイッチング損失低減</p> <p>低インダクタンス化はスライク電圧、電圧・電流振動の抑制、スイッチング損失の低減に有効</p>							
<p>モジュール化による内部インダクタンスを大幅に低減</p> <p>低インダクタンス設計</p> <p>内部インダクタンスが小さく出来るパワーモジュール</p> <p>パワーモジュール化によりインダクタンスを@70%低減可能</p>							
<p>インバータにおける短絡耐量の必要性</p> <p>短絡によるモーター、デバイスなどの保護が重要</p> <p>一般的なインバータ（モータードライブ）における短絡現象</p> <p>短絡現象の分類</p> <table border="1"> <tr> <td>1. Inverter shoot-through</td> <td>Incorrect turn-on on both devices</td> </tr> <tr> <td>2. Phase-to-phase short-circuit</td> <td>Insulation breakdown in Motor between windings</td> </tr> <tr> <td>3. Phase-to-earth short circuit</td> <td>Insulation break down between motor winding and motor casing</td> </tr> </table>	1. Inverter shoot-through	Incorrect turn-on on both devices	2. Phase-to-phase short-circuit	Insulation breakdown in Motor between windings	3. Phase-to-earth short circuit	Insulation break down between motor winding and motor casing	
1. Inverter shoot-through	Incorrect turn-on on both devices						
2. Phase-to-phase short-circuit	Insulation breakdown in Motor between windings						
3. Phase-to-earth short circuit	Insulation break down between motor winding and motor casing						
<ol style="list-style-type: none"> 背景 <ol style="list-style-type: none"> 1.1 パワエレに対する社会ニーズ 1.2 Siパワーデバイスの限界 1.3 SiC、GaNパワーデバイスへの期待と課題 GaN on Siデバイスの基盤技術と要求特性（WBGデバイスの1例） <ol style="list-style-type: none"> 2.1 ノーマリーオフ化 2.2 低オン抵抗化 GaN on Siデバイスの実測結果 パワーモジュールの重要性 GaN on Siデバイスを用いたDC-DCコンバータの開発例 最近のパワーデバイス、モジュールの状況 まとめ 							
<p>デバイスからシステムまで</p> <p>③システム化技術 (DC-DCコンバータ)</p> <p>Ultra low loss High frequency Low cost</p>							

■ A12 【WBG パワーデバイス・事業展開への課題】 高橋講師

<p>システム化技術：DC-DCコンバータ開発の背景</p> <p>車載電気・電子システムの現在および将来の課題</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 高電圧システム採用による大型化 ② 電子化が進むことによる電力損失の増加 ③ 様々な電子部品搭載によるEMI問題の複雑化 <p>→ 最適WBGデバイスの適用</p> <p><small>Collaborative research with Isdion corporation</small></p>	
<p>DC-DCコンバータ (DDC) の現状と今後</p> <p>自動運転に伴い、DC-DCコンバータのハイパワー化、小型化が強く求められる</p> <p>■ 現状</p> <p>HVバッテリー 120V-120V</p> <p>DCDC</p> <p>120V-120V</p> <p>ACU control</p> <p>Charging equipment control</p> <p>Accessories</p> <p>Car operation</p> <p>Power supply to sensor/ actuator</p> <p>200A以上の大電流化</p> <p>トランスインダクタンス特性確保</p> <p>将来：自動運転には冗長性を持った2つのDDCシステムが必要 さらに、それぞれのDDCの扱える電流を大きくする必要がある</p>	
<p>GaN-on-Siデバイスを適用した高性能DC-DCコンバータへの期待</p> <p>① パッケージ部品 (トランス、インダクタコンデンサ) の小型化</p> <p>② 高周波スイッチングでも損失を小さく抑える (高効率)</p> <p>③ EMI 問題の解決</p> <p>1) AMラジオノイズが1MHz駆動時には解決</p> <p>2) 100MHz帯ノイズにはスイッチング時のリンキングを抑制することで回避可能 (低インダクタンス化)</p> <p><small>Collaborative research with Isdion corporation</small></p>	
<p>1. 背景</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.1 パワエレに対する社会ニーズ 1.2 Siパワーデバイスの限界 1.3 SiC、GaNパワーデバイスへの期待と課題 <p>2. GaN on Siデバイスの基盤技術と要求特性 (WBGデバイスの1例)</p> <ol style="list-style-type: none"> 2.1 ノーマリーオフ化 2.2 低オン抵抗化 <p>3. GaN on Siデバイスの実測結果</p> <p>4. パワーモジュールの重要性</p> <p>5. GaN on Siデバイスを用いたDC-DCコンバータの開発例</p> <p>6. 最近のパワーデバイス、モジュールの状況 (当日発表)</p> <p>7. まとめ</p>	
<p>1. 背景</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.1 パワエレに対する社会ニーズ 1.2 Siパワーデバイスの限界 1.3 SiC、GaNパワーデバイスへの期待と課題 <p>2. GaN on Siデバイスの基盤技術と要求特性 (WBGデバイスの1例)</p> <ol style="list-style-type: none"> 2.1 ノーマリーオフ化 2.2 低オン抵抗化 <p>3. GaN on Siデバイスの実測結果</p> <p>4. パワーモジュールの重要性</p> <p>5. GaN on Siデバイスを用いたDC-DCコンバータの開発例</p> <p>6. 最近のパワーデバイス、モジュールの状況</p> <p>7. まとめ</p>	

■ A12 【WBG パワーデバイス・事業展開への課題】 高橋講師

<p style="text-align: center;">パワーエレクトロニクス技術の今後</p>	
<p style="text-align: center;">パワーエレクトロニクスは今後益々進化する</p>	
<p>日本のパワエレ技術向上のため、がんばってください!!</p> <p style="text-align: right; font-size: small;">Photo by Y.Takahashi Nurnberg</p>	