

■ A2 【車載用パワーモジュール】 富永講師

大電流パワーモジュールの実装技術

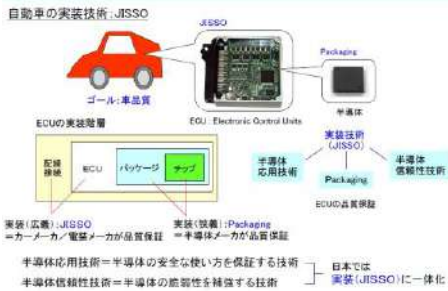


YNU 横浜国立大学  
先端パワーエレクトロニクス技術体系  
教育講座 アドバンストコース  
富永 保  
TAMOTSU TOMINAGA  
tominagatomot@hotmail.co.jp

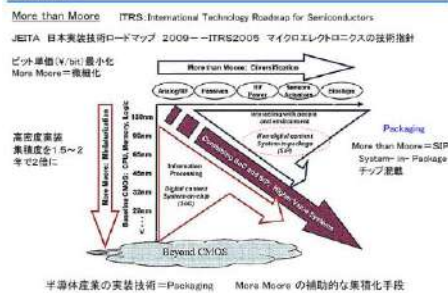
アジェンダ

1. 実装技術  
More than Moore JISSO Packaging SMT パワーモジュール実装
2. 実装と信頼性  
電子信頼性 半導体品質保証 半導体故障 半導体故障解析と実装  
テストカバレッジ スクリーニング
3. パワーデバイス応用技術  
パワーデバイス パワーMOS スwitching損失 IGBT FWD 並列接続  
モータ駆動 電動車 SiC/MOS
4. パワーモジュールパッケージング技術  
モジュール設計 パワーモジュール性能 熱伝導性能 熱容量 高圧化  
高温信頼性 端子接続 ワイヤボンド チップ接合 封止 伝熱シート
5. 品質保証  
ベアチップ実装 モジュール寿命試験 接合寿命 サイクル熱ストレス  
動作寿命試験 PCT 強度試験
6. まとめ

1. 実装技術



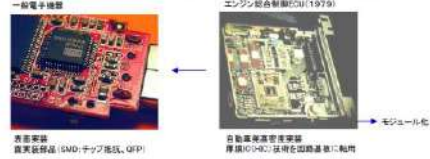

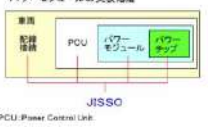

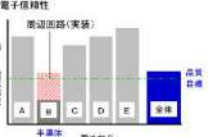
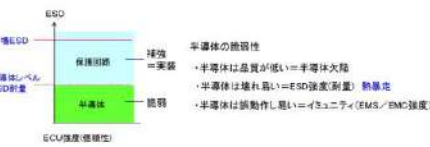
1. 実装技術



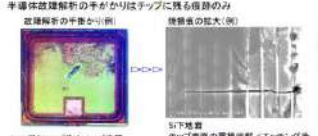
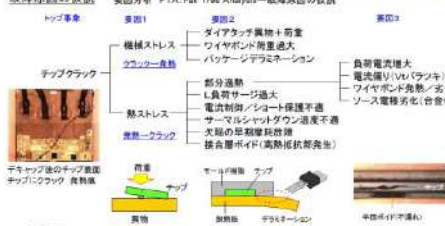

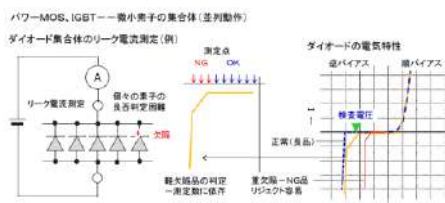
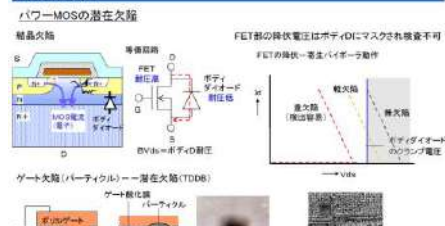
1. 実装技術



■ A2 【車載用パワーモジュール】 富永講師

|   |  |
|---|--|
| <p><b>1. 実装技術</b></p> <p>SMT<br/>Surface Mount Technology (表面実装) → 日本では面実装<br/>高密度実装技術<br/>⇒Packagingに依存</p> <p>Mounter: 実装機(チップ部品搭載機) Packing density: 実装密度 Mounted board: 実装基板<br/>一般電子機器 エンジン統合制御ECU(1979)</p>  <p>表面実装 露出部品(SMD:チップ抵抗, QFP)<br/>背面実装: 半田塗布性に大きなインパクト</p> <p>実装=Package → 実装=JISSOに波及<br/>Package料の信頼性に係る技術に拡大 1980年代日本を中心に発展・定着</p>  |  |
| <p><b>1. 実装技術</b></p> <p>実装技術の分化</p> <p>一般電子機器/携帯機器<br/>高密度実装=軽・薄・短・小/実装密度に付加価値<br/>実装=高密度実装<br/>モノ作り(加工精度、工稼働力)に比重<br/>半導体=ブロックボックスで設計可能=サイズ、形状優先<br/>機械系の信頼性</p> <p>車載電子機器(ECU)<br/>商品競争力=品質 → 形状/実装密度にほとんど依存しない<br/>実装=半導体の品質保証<br/>半導体応用技術=車載環境での使い方に比重<br/>半導体を補強=全ての半導体故障に寄り<br/>電子系の信頼性</p> <p>車の品質は実装技術に依存=機器系実装とは異文化形成<br/>JISSO Packaging</p>    |  |
| <p><b>1. 実装技術</b></p> <p>パワーモジュール実装</p> <p>パワーモジュールの設計<br/>・パワー半導体を駆動する専用アクチュエータは電子制御システムの本(性能、精度)<br/>・パワー半導体の使い方(T<sub>max</sub>、使用環境(ΔT))に品質に直結=全て実装に責任</p> <p>品質保証=信頼性試験 カーマーカの独自仕様 チップ上実装で評価</p> <p>パワーモジュール実装の特徴</p> <p>パワーモジュールの実装段階</p>  <p>PCU: Power Control Unit<br/>JISSO</p> <p>パワー半導体(チップ)=アクチュエータ専用部品<br/>=マイクロエレクトロニクス(AECQ)に対応<br/>パワーモジュール=専用部品<br/>=マイクロエレクトロニクスのPackagingに対応する<br/>パワー実装が必要<br/>パワーモジュールはアプリケーション(車両)毎に<br/>信頼性試験必要</p>        |  |
| <p><b>2 実装と信頼性</b></p> <p>電子機器の信頼性</p> <p>電子機器(ECU)の信頼性=半導体と周辺回路/実装が分担して車載ストレスに対応<br/>半導体の使い方は半導体の脆弱性を実装で補強して使う</p> <p>機械系信頼性</p>  <p>電子信頼性</p>  <p>機械系設計<br/>一定の安全マージンを見込み設計<br/>信頼性設計=マージン適正化<br/>構造等実装設計、信頼検査可<br/>故障解析結果=ストレスとマージンに帰結</p> <p>電子設計<br/>半導体=市場ストレスに対し強度不足(ESD耐量など)<br/>信頼性設計=保護回路付加(実装でストレス分散)<br/>半導体/周辺回路構成要素部大、個々の検査不能<br/>故障解析複雑=半導体vs周辺回路(実装)が(管理)相反</p> |  |
| <p><b>2. 実装と信頼性</b></p> <p>半導体の信頼性</p> <p>実装技術=半導体の脆弱性を補強する技術=半導体の信頼性は実装技術に依存<br/>半導体故障は=実装の失敗 チップの脆弱性を実装で補強できなかった場合に発生</p> <p>実装開発=新しい半導体の脆弱性把握<br/>実装が全ての電子品質(故障)に関与=車載環境で半導体の脆弱性を最小限(コスト)で補充</p>  <p>ESD<br/>半導体脆弱性<br/>保護回路<br/>=実装<br/>半導体は品質が低い=半導体欠陥<br/>半導体は壊れやすい=ESD耐量(耐量) 耐量不足<br/>半導体は振動耐性悪い=イミュニティ(EMS/EMC強度)</p> <p>半導体脆弱性<br/>ESD耐量<br/>半導体脆弱性<br/>ESD耐量<br/>半導体脆弱性<br/>ESD耐量</p>  |  |

A2 【車載用パワーモジュール】 富永講師

|   |  |
|---|--|
| <p><b>2. 実装と信頼性</b></p> <p><b>半導体故障解析</b><br/>JISSO=半導体故障解析—半導体の信頼性は実装技術に依存 使い方が大事</p> <p>半導体故障解析のハードル<br/>チップの痕跡だけでは故障原因の解明困難 チップ強度不足 vs 使い方の間違ひ!</p> <p>半導体故障解析 故障状況から原因推定(仮説) + 再現実験で確定 + 実装の適正化</p> <p>半導体故障解析の手がかりはチップに落ちる痕跡のみ</p> <p>故障解析の手がかり所</p>  <p>表面観察(破壊前)の提示<br/>過剰電流の電流経路を確認<br/>発生素子が動かし難い<br/>過電流の発生原因は推定に留まる<br/>発生素子が動作するトリガを推定<br/>=復旧/再現</p> <p>PKIチップ後のチップ表面<br/>過熱した部分の腐蝕が深くなり、除去<br/>できない=一体構造<br/>チップ内の発熱エリアを特定できる</p> <p>S/D構造<br/>チップ表面の電極接続/エンチャング後<br/>過熱した電流経路を観察できる<br/>観察からの推定<br/>パワーMOS構造の発生素子動かし難い!</p>                   |  |
| <p><b>2. 実装と信頼性</b></p> <p><b>故障原因の仮説</b> 要因分析 FTA: Fail Tree Analysis→故障原因の仮説</p> <p>トピック事例</p>  <p>要因1: 機械ストレス → チップクラック</p> <p>要因2: ダイアタッチ異常 + 荷重<br/>ワイヤボンド荷重過大<br/>パッケージ浮上/ネジシヨン → 部分過熱<br/>L負荷サーージ過大 → L負荷サーージ過大<br/>電流制御/シールド保護不備<br/>サーマルシャットダウン温度不備<br/>次層の足取摩耗<br/>接合層ボイド(高熱抵抗層発生)</p> <p>要因3: 負荷電流増大<br/>電流経路の狭小化(ラフキ)<br/>ワイヤボンド発熱/劣化<br/>ソース電極劣化(酸化)</p> <p>チップクラック</p> <p>熱ストレス</p> <p>熱熱-ヒューズ</p> <p>モジュール/チップ</p> <p>チップクラック</p> <p>チミステーション</p> <p>半導体不作(浮上)</p> <p>仮説例<br/>工場裏家でクラック発生 → 過熱/換熱 → 動作時の異常発熱 → チップクラック → 再現実験→FTAでも不明でない!</p> |  |
| <p><b>2. 実装と信頼性</b></p> <p><b>プロセス親和性</b><br/>実装のプロセス親和性<br/>実装のソース技術多様 → 開発の目的を見据えるコンセプト(自利き)必要 ← 俯瞰的視野<br/>Package(高密度実装)とJISSO(車載実装)の違い<br/>車載=品質優先+換装(検査/交換)を重視した実装構造</p>  <p>SIP (multi chip) → ベアチップ実装(チップ オン ボード)<br/>検査のための外部引出し端子を加えると<br/>→ 検査済みCSP(Chip Size Package)の方が有利</p> <p>SIP (chip stack) → チップスタック型/ベアチップ実装<br/>検査のための外部引出し端子(テスト端子)を加えると<br/>→ 構造成立しない!</p> <p>POP (package stack) → パッケージスタック実装<br/>チップ間にパッケージ<br/>=コスト削減要否なし!</p> <p>ベアチップ実装 / パッケージ省略によるコスト削減 → 検査半低下</p> <p>テスト設計<br/>SIGA-端子接続保証必要<br/>チップ間にテスト端子必要</p>         |  |
| <p><b>2. 実装と信頼性</b></p> <p><b>テストカバレッジ(検査率)</b><br/>半導体品質保証の課題=テストカバレッジ<br/>半導体特性検査 多数の素子の集合体として検査 個々の素子の種欠陥検査困難<br/>種欠陥(特性変化)小検出には測定精度(テストカバレッジ)向上必要 → 測定数増大</p> <p>パワーMOS、IGBT → 微小素子の集合体(並列動作)</p> <p>ダイオード集合体のリーク電流測定(例)</p>  <p>測定点 NO OK</p> <p>ダイオードの電流特性</p> <p>正偏バイアス 逆偏バイアス</p> <p>リーク電流測定 個々の素子の良否判定困難</p> <p>種欠陥品の検出 → 測定回数増加</p> <p>種欠陥-HIGH品質<br/>リバウンク等発生</p> <p>種欠陥<br/>(種出検査)</p> <p>種欠陥<br/>(種出検査)</p> <p>種欠陥<br/>(種出検査)</p>   |  |
| <p><b>2. 実装と信頼性</b></p> <p><b>パワーMOSの潜在欠陥</b></p> <p>結晶欠陥</p>  <p>FET部の降伏電圧はポトイニにマスクされ検査不可</p> <p>FETの降伏電圧はバイポーラ動作</p> <p>ゲート欠陥(パーティクル) → 潜在欠陥(TDDB)</p> <p>ゲート酸化膜</p> <p>TDD: Time Dependent Dielectric Breakdown</p> <p>MOSが一定電圧動作後ゲートが絶縁破壊</p> <p>パワーMOS検査手順<br/>一群FETがバイポーラ動作し無負荷(種出)</p>  |  |

■ A2 【車載用パワーモジュール】 富永講師

### 2. 実装と信頼性

#### パワーモジュールの検査

電源  
入力  
出力  
GND

インバータパワーモジュールの基本回路  
高周波回路(サブ実装後検査するテスト端子追加)

パワーモジュールの高品質保証—ベアチップ実装後にチップ検査必要  
テストパターンの向上には種々の素子を直列検査—専用テスト端子必要 検査後パワー回路完成必要

パワーアップの直列接続  
直列接続状態で容易的に検査するため並列するチップを均質化  
—電気特性をクラス分け(同クラスで組み合わせ)

### 3. パワーデバイス応用技術

#### パワーデバイスの応用分野

高耐圧系  
サイリスタ  
低耐圧系  
ゲートドライブ(バイポーラ)  
VDMOS

MOSゲート  
Si IGBT 大電流  
SiC VDMOS 高耐圧/高速SW  
Si 高速SW/ SiMOS 高耐圧化

WBG半導体

### 3. パワーデバイス応用技術

#### パワーデバイス(高耐圧系)

|             | 電圧・電流                                    | スイッチング速度                              | 駆動電源             | 主要用途             |
|-------------|--|---------------------------------------|------------------|------------------|
| MOS (VDMOS) | Si: 低耐圧/低on抵抗<br>SiC, SiMOSで高耐圧<br>+低損失化 | 多数キャリア応用(高速)<br>チップサイズ(寄生容量)<br>+低損失化 | 単電源<br>(ノーマリOFF) | スイッチング電源         |
| IGBT        | バイポーラ回路<br>高耐圧-on抵抗増大を<br>低導電率層でカバー      | 少数キャリア発生/消滅<br>時間+依存(低速)              | 単電源<br>(ノーマリOFF) | 大容量負荷駆動<br>(モータ) |

縦型パワー-MOSFET (Vertical Drain MOSFET)    IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

SiC VDMOS  
Si: SiMOS  
low MOSFET  
多数キャリア(電子)伝導

Si IGBT  
バイポーラ伝導  
少数キャリア注入  
ノーマリオン  
SiC Power 制御回路

### 3. パワーデバイス応用技術

#### Nchパワー-MOSFET Si/SiC

ゲート    ソース電極    ドレイン電極

チャンネル厚さ  
電中のチャンネル移動型に依存  
チャンネル移動度  $\mu_n$  SiC  
SiC/SiC/SiC(ホトド)実用化後

ドレイン電圧耐性  
動作時、逆バイアス) 損失  
高耐圧化、JFET) 領域の  
寄生容量が少  $\mu_n$  SiC

JFET) 領域(電圧降下)  
埋合電界増大  $\text{SiC} \approx \text{Si} \times 10$   
SiGFET) 領域(電圧降下)

パワー-MOSのDC損失 =  $R_{on}(ON抵抗) \times I_D$   
 $R_{on} \approx \text{チャンネル抵抗} + \text{JFET) 領域抵抗}$

縦型MOSで支配的 = Si    高耐圧MOSで支配的 = SiC

SiMOS: Super Junction MOS  
空乏層を3次元的に配り高耐圧化、JFET) 領域大  
耐圧600~1200VでSiCより実用化先行

降伏電圧(PN結合逆バイアス時)

SiC: 2 Mv/cm  
Si: 0.2 Mv/cm

空乏層  
PN) 結合電圧降下  $\text{SiC} > \text{Si} \times 10$   
SiC: 逆バイアス時の空乏層厚さが少

### 3. パワーデバイス応用技術

#### パワー-MOSのスイッチング損失

高速動作するパワー-MOSの損失    スwitching損失 >> DC損失  
 スwitching損失低減 = ゲート電圧の上り/下り(dV/dt)大 = チップサイズ縮小

パワーデバイスのスイッチング波形

$V_g = 15V$  (full ON)    DC損失  
 $t_{ON}$      $t_{OFF}$   
 CDF = ON遷移時間  
 スwitching損失  
 $V_g = 0V$

パワー-MOSの電圧特性

OFF = ON遷移時間 = 低ゲート電圧

MOSの電力損失  $P = R_{on} \times I_D^2$   
 $R_{on}(ON抵抗) = \text{ゲート電圧依存}$   
 DC損失  
 ゲート電圧大 (full ON) 動作  
 スwitching損失  
 CDF = ON遷移時のゲート電圧小動作  
 高周波/低速スイッチング損失増大





■ A2 【車載用パワーモジュール】 富永講師

|   |  |
|---|--|
| <p><b>3. パワーデバイス応用技術</b></p> <p><b>パワーモジュール</b></p> <p>ステーション型HEV(トヨタ)のV-コントロールユニット</p> <p>インバータパワーモジュール<br/>モータ駆動/ブレーキ回生発電<br/>ゲートコントロール回路増大</p> <p>モータ駆動電源<br/>HEV(2モータ) バッテリ昇圧PM(500~600V)→インバータPM<br/>エンジンで発電モータ駆動→ジェネレータPM<br/>BEV: バッテリ電圧で直接駆動 セル直列数に依存(300~400V)→パワーデバイス耐圧: 600~700V</p>   |  |
| <p><b>3. パワーデバイス応用技術</b></p> <p><b>電動車</b></p> <p>HV(HEV) シリズ/パラレルHV(トヨタ)      BEV (日産)      PHEV (シリーズHV)</p> <p>動力分割機構      CARIS駆動対応→ZEV: Zero Emission Vehicle</p> <p>動力併用方式多様(カーメーカー毎に専任化)<br/>エンジン仕様で車高走行性能決まる<br/>専用システム/専用部品構成→最適統合型<br/>モータ駆動電圧可変→パワーデバイスに対応</p> <p>EVソフト<br/>2017 米国CARB規制変更<br/>2018 中国NEV(New Energy Vehicle)法公布<br/>目標:500万台(2020)</p>   |  |
| <p><b>3. パワーデバイス応用技術</b></p> <p><b>SICMOSの大電流応用</b></p> <p>SICMOSがフルシリコン構造→結晶化遅れ<br/>ゲート電界緩和→信頼性(VA変動)アップ<br/>チャンネル移動度UP→電流密度 SICMOSが4×SiIGBT<br/>結晶欠陥大→実用チップサイズ上限(歩留まり) &lt; 5mm<sup>2</sup><br/>市販品最大演算→高Tj化でSiC先行困難<br/>パワー単位: SiC&gt;SiC 結晶成長速度に依存</p> <p>モジュール      Si代替      SiC組み分け</p> <p>パワー併用で単純代替困難      高電圧システム構築</p> <p>高電圧システム(例)</p> <p>電源(電圧) 100V → 1000V<br/>     負荷駆動電流 100V/10A = 10A      負荷電力同じ=1000W<br/>     負荷電圧 1000V/1000W = 1A      負荷電流<br/>     MOSFET抵抗 0.1Ω      同じ電力 100V×10A ≒ 1000V×1A</p> <p>競争力のあるフルシリコンインバータは完全1チップ化→SiC不要<br/>MOSが會ってもSiCが選り、SiC→ターゲでは増えないシナリオも考えられる</p>   |  |
| <p><b>4. パワーモジュールパッケージング技術</b></p> <p><b>モジュール設計</b></p> <p>車載モジュール設計の要素技術-実装の集中/分散      集中→分散      分散→集中</p> <p>電力配線      パワーモジュールのレイアウト</p> <p>分散(空冷/絶Tj化)<br/>アタチューナー一体化(冷却器共有)</p> <p>分散(空冷/絶Tj化)<br/>アタチューナーモジュール化(微電一様)</p> <p>パワーモジュール機能一体化のハードル<br/>     一般電子部品耐熱温度 &lt; 125~150°C      →実装基板半田耐熱温度 &lt; 125°C<br/>     シリコンチップ耐熱温度 &lt; 180°C      →基板シート耐熱温度 &lt; 200°C<br/>     モーニング電線耐熱温度 &lt; 180°C      →永久磁石磁気力低下(Dy使用量制約)<br/>     MOSFET抵抗の温度特性 温度×3~4(損失増大)<br/>     アルニウムの法則 10°C温度が上昇すると、寿命は概ね1/2に低下(化学反応促進)</p>   |  |
| <p><b>4. パワーモジュールパッケージング技術</b></p> <p><b>Tc(周囲温度)</b></p> <p>チップの許容電力損失<br/> <math>P = (T_j)_{max} - (T_c) / R_{th}</math></p> <p>温度特性(大サイズ)</p> <p>Tc: パワーモジュールのレイアウトを決める要因<br/> <math>T_c = T_{jmax}</math>では許容電力損失=0W<br/> <math>(T_c = 175°C)</math>では負荷駆動能力ゼロ<br/>     エンジンルーム+空冷 <math>T_c = 125°C</math>設定<br/> <math>P_d(125°C) = 1/3 P_d(25°C)</math>→負荷駆動能力不足<br/>     → <math>T_c = 125°C</math>で負荷駆動→3倍のチップ必要</p> <p>空冷モジュールのTc<br/>     逆排熱放射体幅射+自然対流→作動状況により変動<br/>     空気に熱体がない冷却に留意必要</p> <p>水冷モジュールのTc<br/>     60~65°C<br/>     ラジエータ能力限界 水: 100°C→空冷: 30°C</p> <p>空冷<br/> <br/>     空気が熱<br/>     放射熱</p> <p>SiC MOS 5GT3011AL(ローム)<br/> <math>T_{jmax} = 175°C</math></p> |  |

■ A2 【車載用パワーモジュール】 富永講師

|   |  |
|---|--|
| <p>4. パワーモジュールパッケージング技術</p> <p><b>熱伝達性能</b><br/>Nu:ヌセルト(Nusselt)数<br/>対流による熱伝達と静止流体の熱伝達の比</p> $Nu = \frac{\text{流体の熱伝達率}(h) \times \text{流路の長さ}(L)}{\text{流体の熱伝達率}(\lambda)}$ <p>対流がない場合、Nu=1 自然対流では熱伝達能力低い → 強制対流 空冷ファン/ウォーターポンプ</p> <p>■熱伝達効率に關する要素</p> <p>レイノルズ数 <math>Re = \rho \cdot v \cdot L / \mu</math> 流体の流れ方(熱伝達率)を決める<br/>     プラントル数 <math>Pr = \mu \cdot c_p / k</math> 流体の温度/速度境界層を決める</p> <p>熱伝達率 <math>W/(m^2 \cdot K)</math><br/>     空気: 10~300 水: 300~5000<br/>     熱伝導率 <math>W/(m \cdot K)</math><br/>     空気: 0.0262 水: 0.61 → 熱伝達能力: 水 &gt; 空気 × 20</p>   |  |
| <p>4. パワーモジュールパッケージング技術</p> <p><b>放熱フィン</b><br/>放熱フィンの設計<br/>フィン長さを長くし、放熱面積を大きくしても冷却効率向上は限定的=音響効率低下<br/>→大電流空冷モジュール成立困難</p> <p>放熱面積 <math>A</math><br/>長さ <math>L</math><br/>熱伝達率 <math>h</math><br/>フィンからの放熱量<br/>フィンと基板を同温度と仮定したときの放熱量<br/>フィンの表面積(×フィン長): 水 &gt; 空気 / 20</p> <p>熱伝達率 <math>h</math> のフィン長 × フィン枚数<br/>フィン長過大 → 熱抵抗増加<br/>フィン数過大 → ヌセルト数低下<br/>→ 音響効率低下</p>   |  |
| <p>4. パワーモジュールパッケージング技術</p> <p><b>熱容量</b><br/>定電流負荷駆動時の温度変化</p> <p>パワー半導体の許容電力損失 <math>P = \Delta T / R_{th}</math><br/>     パワーモジュール出力力 <math>P = P \times \text{時間}(wh)</math><br/> <math>\Delta T = T_{jmax} - T_c</math> <math>R_{th}</math> 熱抵抗</p> <p>最大出力期間(<math>P_{max}</math>期間)<br/>     ①チップが定電流に達する時間(容量) → <math>R_{th}</math>依存<br/>     ②チップが許容最高温度に到達される期間 → 熱容量依存<br/>     ③<math>T_c</math>が上昇 → <math>T_c</math>上昇(<math>R_{th}</math>に依存) → 熱容量</p> <p>熱容量の設定<br/>     負荷変動による温度変動を平均化 → 熱ストレス緩和<br/>     負荷変動の大きい用途 → 熱容量を大きく<br/>     負荷変動の小さい用途 → 熱容量を小さく</p> <p>水冷: 冷却水が熱容量(多量でも容易)<br/>     空冷: 放熱板/フィンが熱容量(大型化=高価)</p> |  |
| <p>4. パワーモジュールパッケージング技術</p> <p><b>負荷変動</b><br/>車の走行パターン(JC08モード)</p> <p>絶対最大定格(<math>T_{jmax}</math>)<br/>     (過熱保護/過電流保護)<br/>     熱容量でカバー<br/>     駆動電流(電流): <math>\Delta T(T_j - T_c)</math> 変動大<br/>     熱容量大: 水冷</p> <p>電車の走行パターン<br/> <math>\Delta T(T_j - T_c)</math> → 一定<br/>     熱容量小: 空冷</p> <p>EVエアコン<br/>     熱容量小 → ヒータ電力増大<br/>     → ヒーターで電圧を上げ<br/>     ラジエーター冷却必須<br/>     パワーモジュール: 水冷維持<br/>     SiC用ヒートポンプ駆動</p>  |  |
| <p>4. パワーモジュールパッケージング技術</p> <p><b>高Tj化</b><br/>パワーモジュールの許容電力損失(w)<br/> <math>P = (T_{jmax} - T_c) / R_{th}</math></p> <p>パワー定電流駆動の目的 → パワー損失(w)最小化</p> <p>① <math>R_{th}</math> ↓ ② <math>T_{jmax}</math> ↑ ③ <math>T_c</math> ↓</p> <p>直冷化(部品減) 高Tj化 冷却/冷却冷却<br/>     技術開発費大 フロン禁止<br/>     高Tj化 → チップ出力増加 → コストを下げずにモジュール出力を可(パワー半導体引き下げ)<br/>     チップ損失増大/寿命低下 SiCの高Tj化 → チップ改良(シュリンク) = 伝熱面積縮小</p> <p>SiCではチップメーカー自身がチップ/ウエハの高品質をカバーする手段として検討 → SiC MOSの技術差通じがつかいと共同トーンダウン</p> <p>SiC高Tj化の発掘<br/>     - SiC MOS: MOSゲート構造の信頼性: SiC &lt; Si → Siの高Tj化に追随可能<br/>     - SiC BJD: 高電圧動作 → 高電圧でも高信頼 → SiGIBTとセット使用のためのSi以上の高Tj化不要</p>              |  |

A2 【車載用パワーモジュール】 富永講師

4. パワーモジュールパッケージング技術
WBG半導体の高温動作
WBG半導体の高温動作可能=熱暴走温度高い
熱暴走=高温で真正キャリア大量発生
導電率=電荷量×キャリア濃度×キャリア移動度



■ A2 【車載用パワーモジュール】 富永講師

### 4. パワーモジュールパッケージング技術

#### 封止

半導体は最終的に封止必要 大サイズパワーモジュール—樹脂封止

①セラミック基板 シリコンゲル  
セラミック基板 CTE小さい接合 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>系 SiC<sub>2</sub>系<sub>2</sub> Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>系 SiC<sub>2</sub>系<sub>2</sub> SLN<sub>2</sub> 2.6~3.5 AlN<sub>2</sub> 4.5  
ウミネート接合の長寿命

②Cuリードフレーム エポキシ樹脂  
Cuリードフレーム CTE: 16.5 チップとのCTE差大  
ウミネート接合の長寿命 樹脂圧縮応力での接合強化

高強度=エポキシ樹脂  
トランスファモールド型  
サイズ制約(樹脂量)  
サイズ制約(樹脂量)  
高耐熱性 T<sub>max</sub>→300°C

トランスファモールド型  
チップ接合に対しては応力

チップ接合 接着力大  
樹脂封止 接着力大  
樹脂の封止性能=接着力に依存  
→樹脂のCTEは基板/Cu板に近接必要

---

### 4. パワーモジュールパッケージング技術

#### 電極構造

片面加熱/Aワイヤボンダ接合  
ワイヤ本数増加  
ワイヤ電流集中、ボンダ直下過熱  
モールド樹脂の変形/ストレス集中  
→ワイヤ強度劣化  
シリコンゲル用途

片面加熱/クリップ電極接合  
大型エミタ電極  
電流分散→局部過熱抑制  
モールド樹脂アンカー機能強化  
樹脂接着力増→接合強度強化  
トランスファモールド用途

両面加熱構造  
対称実装構造→熱応力低減  
(樹脂が製品の反りを抑制)  
薄型、厚さ違いチップの搭載可能  
Si田大サイズチップ用途

---

### 4. パワーモジュールパッケージング技術

#### チップ接合(ダイアタッチ)

95Pb半田  
半田シール  
TLP (Transient Liquid Phase Bonding)  
半田真空炉  
ナノAgシスター  
ナノ粒子  
ペースト印刷状態

温度→加圧→Sn溶解拡散

高圧化促進  
ディスタート-TLP  
一極性チップ同時加圧同時  
モジュール側加圧加圧

---

### 4. パワーモジュールパッケージング技術

#### 高温半田

| 半田  | 合金化率   | 溶融温度(°C) | 液相線温度(°C) | モールド温度 | チップ厚(μm) | 接合厚(μm) | 熱膨張率(ppm/°C) |
|-----|--------|----------|-----------|--------|----------|---------|--------------|
| BiA | 95Pb半田 | 180      | 214       | 15     | 14       | 14      | 26           |

95Pb半田  
T<sub>max</sub><180°C 大サイズ95チップダイアタッチ材の主流  
溶融温度がSn、Ag、Cuほど電気配線材に良く溶ける(低融点接合)  
CTE大きい(柔らかいためチップ(Si)と基板(セラミック)間のCTE差をマッパ  
を吸収できる  
シート厚で調整可能(厚い方がマッパに効果)  
熱伝導率、電気抵抗が電気配線材に比べ大きい

EL/RoHS規制 適用 2006/7-  
RoHS規制対象: Pb Hg Cd Cr6+ PBB PBDE(難燃剤)  
規制に該当基礎線半田(共晶半田)はPbフリー化  
適用除外用途(2010~): 高融点半田中のPb(95%)以上のPbベース合金

高温半田(95Pb)の適用除外理由: 代替品未開発 ← 規制状況 SiC集積化の進捗に依存→待機

---

### 4. パワーモジュールパッケージング技術

#### ナノAgシスター

シスター層 焼結焼成(→250°C)  
焼結後の除酸素、高融点溶融温度  
バルクAgに匹敵

金属接合  
Pd, Au, Cu上に結晶成長  
→下地メッキ品質に依存

接合寿命  
シスター250°C 50h消費  
チップ動作熱でシスター層進行  
空層層は接合界面に埋まり接合

接合強度(シスター中の空隙率増大回避)  
熱圧着工法 200~250°C/3~10MPa  
モジュール適用困難

複数層の異なるチップ同時接合=熱加圧工法=接合強度低下  
封止樹脂の圧縮応力利用(高融点圧状態)→ワイヤボンダ適用困難  
高融点Cu電極化→エパ(Ag)に電解メッキを必要

密着内化力で空層率低下  
Ag→電極成分で劣化

多層銅合→厚メッキ  
課題: 樹脂内有害成分 チップ表面凹凸 メッキ品質

■ A2 【車載用パワーモジュール】 富永講師

#### 4. パワーモジュールパッケージング技術

##### ワイヤボンド

AIワイヤボンド - 配線・工法容易、課題大

ワイヤボンド: AIワイヤボンド配線・工法容易、課題大  
 パッケージング: AIワイヤボンド配線・工法容易、課題大  
 エミッタ電極露出  
 大電流→多数のワイヤ接続必要  
 ゲート電極  
 チップ(エミッタ面)  
 コロム電極  
 Cu-Ni-Au/Ag (スパッタ)  
 絶縁膜+絶縁  
 下層面の機械的力  
 絶縁膜+絶縁  
 絶縁膜+絶縁

絶縁膜剥離  
 ストレス  
 応力集中  
 接合部  
 小粒半田層  
 チップAI接続 (スパッタ)  
 電流(熱)集中  
 樹脂アンカー機能

#### 4. パワーモジュールパッケージング技術

##### 冷却器接合

Siパワーモジュール開発の中心課題 CTE差:大 ΔT:小 大面積接合

セラミック基板-伝熱  
 銅基板  
 パンチプレート(AI)  
 冷却器(AI接合)  
 プリウス3  
 銅基板  
 セラミック基板  
 半田  
 冷却器フィン(Cu)  
 本体:AI接合

銅リードフレーム-伝熱+絶縁  
 加熱部  
 冷却部  
 絶縁部  
 AIワイヤ  
 高温半田  
 チップ  
 絶縁部  
 パワーカード  
 高熱伝導絶縁シート  
 冷却器  
 (スバ(Cu板)リーフ)

#### 4. パワーモジュールパッケージング技術

##### 伝熱シート

供給品構成: SMD2225V-MOS, RL6K2JLFC, V26-Q3-10-3A-P4-4e, 銅板: Cu

伝熱シート: 100μm  
 厚さ: 20×40×7.5mm

表面熱抵抗: Cu-板, AI-板  
 接合部  
 フラウ-熱伝導率減少  
 →表面熱抵抗大  
 シート表面  
 伝熱性能低下しない  
 BNフイバー  
 シート本体の伝熱性能から期待される熱性能から算出  
 (シート1枚/2枚重ねの伝熱性能最小)

測定結果: シート本体の伝熱性能から期待される熱性能から算出  
 (シート1枚/2枚重ねの伝熱性能最小)

接合後の熱抵抗: シートと金属接合の表面熱抵抗が支配的=モジュール熱抵抗の主要  
 半田層未考慮  
 BNフイバー(絶縁/高熱伝導)開発で開発活性化→ブレークスルー必要

| シート枚数 | 熱抵抗 (K/W) |
|-------|-----------|
| 1     | ~400      |
| 2     | ~350      |
| 3     | ~300      |
| 4     | ~250      |
| 5     | ~200      |
| 6     | ~150      |

#### 5. 品質保証

##### パワーモジュールの熱性能

チップ電力損失(w)  
 $P = I_{DMS} \times R_{DS(on)}$   
 $P = V_{DS} \times I_{DMS}$

パワーデバイス許容電力損失(w)  
 $P = \Delta T / R_{th}$   
 $\Delta T = T_{max} - T_c$  Rth: 熱抵抗

パワー半導体の許容電力損失(負荷駆動能力)=パワーモジュール冷却能力で決まる

パワーモジュールの放熱/冷却  
 チップ  
 チップ接合  
 基板接合  
 冷却器  
 ラジエータ  
 空気

熱伝導 (W/mK)  
 熱伝導 (W/mK)

パッケージとモジュールの違い→構造ではなく品質保証方法

| 形態           | チデバイス設計           | 品質保証        |
|--------------|-------------------|-------------|
| パッケージ (汎用設計) | 汎用設計/冷却器不完全       | チップメーカー     |
| モジュール (専用設計) | 冷却器設計/冷却器力不足で性能変化 | チップ+絶縁層熱伝導  |
| モジュール (専用設計) | 冷却器設計/冷却器力不足で性能変化 | モジュールメーカー   |
| モジュール (専用設計) | 冷却器設計/冷却器力不足で性能変化 | モジュール許容電力優先 |

#### 5. 品質保証

##### パワーデバイスの品質保証

パワーMOS(Si)応用拡大の経緯  
 大容量チップ/パッケージ(SMD)化製品展開  
 応用拡大/電力増大  
 接合半田の熱ストレス軽減  
 放熱増進  
 SOA拡大で差別化  
 パッケージ高付化 Tjmax=175°C

通常動作温度とTjmaxの乖離拡大  
 市場放熱の大半はパワーデバイス関連の半田トラブル  
 実装基板上の半田の最高温度<125°C  
 (温度サイクル試験温度:-30~125°C)

パワーモジュール品質保証のリスク  
 パワーデバイスにはモジュールに適用する高Tj動作の市場実績乏しい  
 市場で大量に使用されているデバイス(シート型/パワーデバイス(パッケージ))  
 Tjmax=150/175°Cの大半はTc+Tj<125°C(Tc<85°C, Tj<40°C)で動作

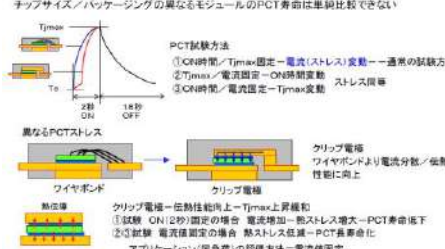
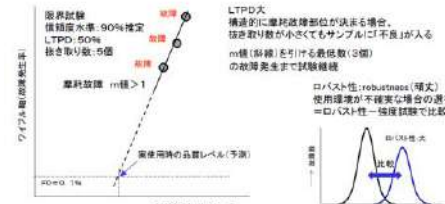
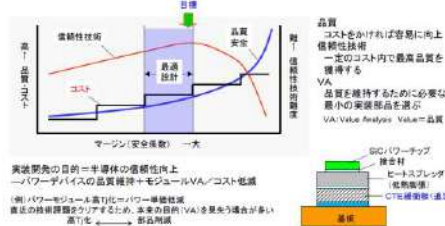
パワーモジュールは独自の品質保証体系(OA/寿命試験)必要  
 パワーモジュールのTj設定(例) Tc=65°C, Tjmax=150°C-Tj<85°C

ALD=Q101 (Cu-ペースト)  
 Intermetallic Oxidation Life  
 ΔTj ≤ 100°C, 10,000 cycles  
 ΔTj ≤ 125°C, 7,000 cycles  
 minimum 2 min. per cycle

■ A2 【車載用パワーモジュール】 富永講師

|   |  |
|---|--|
| <p><b>5. 品質保証</b></p> <p><b>接合寿命</b></p> <p>チップの負熱係数はユーザの使い方で寿命変化<br/>接合部が受ける各種の熱ストレス<br/>①熱平衡状態の熱膨張に伴う応力<br/>②過渡的な熱分布に伴う応力</p> <p>一定負荷を長時間駆動する応用①<br/>短時間で負荷が変動する応用②<br/>接合材の熱膨張により過渡熱分布変化</p> <p>半導体接合はチップの脆性を実装でカバーできない場合に発生 → 動作寿命試験<br/>接合寿命(実装の脆弱性) = 半導体故障として検出が必要</p> <p>接合寿命<br/>熱ストレス①, ②によりチップとチップ間に引剥がし応力発生<br/>→ サイクル熱ストレスが接合寿命を支配<br/>熱膨張による応力<br/>引き剥がし応力</p> <p>接合部引剥がし<br/>FEM解析</p>   |  |
| <p><b>5. 品質保証</b></p> <p><b>動作寿命試験</b></p> <p>パワーモジュールの動作寿命試験 = 熱疲労試験, TFT (Thermal Fatigue Test)</p> <p>TFT試験方法 - TePCT<br/>最大負荷ON / OFF連続試験<br/>最高温度(Tjmax)と自然冷却(→Tc)<br/>サイクル熱ストレスをモジュール耐用期間<br/>の最大動作回数(キマージン)追加</p> <p>TFT試験の課題<br/>市場動作温度のサイクル試験 = 加速困難 → 評価に長期前<br/>サイクル寿命は使い方(Tjmax), チップ接合面積等により変化 → 汎用試験不可 → 最終モデルに適用<br/>現実的な<br/>品質確認プロセス</p> <p>各種確認モデル → 試作モデル → プロトタイプ → 動作寿命試験 (TFT) で最終評価</p> <p>模擬確認モデル: デミニチュアチップ搭載, 実装条件, 実装材選定<br/>試作モデル: パワーチップ搭載, 実装条件, 実装材選定, コスト検証<br/>プロトタイプ: 量産設備で一定量製作, 信頼力評価, 量産時検査</p>  |  |
| <p><b>5. 品質保証</b></p> <p><b>サイクル熱ストレス</b></p> <p>動作寿命試験時の接合寿命 - サイクル熱ストレス<br/>①熱平衡状態のCTEミスマッチに伴う応力 → 温度サイクル試験(TCT)で評価<br/>②チップ内の熱分布に伴う変形応力 → パワーサイクル試験(PCT)で評価</p> <p>Tj, Tc<br/>チップ<br/>ダイアタクト<br/>基板</p> <p>①CTEミスマッチ<br/>チップと基板が同温度の場合, CTEの<br/>大きい基板の変形量大<br/>チップ-基板間, 基板-冷却器間<br/>接合面積大 = ストレス大</p> <p>②過渡熱分布<br/>CTEミスマッチがゼロでもチップ発熱時, チップ内,<br/>チップ-基板間の過渡的な温度差でストレス発生<br/>温度上昇速度(dT/dt)大 = ストレス大</p>  |  |
| <p><b>5. 品質保証</b></p> <p><b>強度試験</b></p> <p>TFTはTCTストレスと(ΔTj)PCTストレスに分解, 別個に試験 - 特定部位の寿命評価</p> <p>①温度サイクル試験(TCT)<br/>大規模接合部の寿命評価<br/>パワーモジュール熱平衡状態の<br/>サイクル熱ストレス試験</p> <p>②パワーサイクル試験(PCT)<br/>ダイアタクト接合部の過渡熱分布に伴う<br/>サイクル熱ストレス試験</p> <p>TCT: Temperature Cycle Test<br/>Tjmax, Tc, 30秒 ON, 30秒 OFF</p> <p>PCT: Power Cycle Test<br/>Tjmax, Tc, 2秒 ON, 18秒 OFF</p> <p>赤色PCT試験機<br/>200W出力(ON) - 2秒 / OFF - 18秒<br/>大電流電源とパワーモジュール両者の<br/>電圧 / 冷却構造が必要<br/>空冷式では冷却必須<br/>→ 測定精度(測定位置 / 検出距離)</p> <p>長期間熱疲労試験機 検査 = 実装検査<br/>高温側でストレス加速時 1000サイクル - 1.0月<br/>短時間で評価可能 50000サイクル ~ 2週<br/>チップサイズにより過渡熱分布 / PCTストレス変化</p> |  |
| <p><b>5. 品質保証</b></p> <p><b>PCTストレス</b></p> <p>ターンON電流がチップ全体に分散するまで時間 = 過渡熱分布(熱ストレス)</p> <p>①ターンON電流 - エミッタ電極シート抵抗で電流分散阻害<br/>→ フライバック能力向上促進 → 長寿命化<br/>②発熱部のMOSFET抵抗増加, 電流集中緩和<br/>→ チップ周辺部に電流分散 → チップ均熱化</p> <p>PCTストレスの手測<br/>ワイヤボンド部下の温度計測不可<br/>Tjmax点と温度センサの位置関係により誤り補正必要<br/>Tjmax点はチップサイズ, ワイヤ本数, エミッタ電極形状<br/>ワイヤボンドレイアウト等に依り変化<br/>→ ストレス予測には電流 - 熱 - 構造連成解析必要<br/>電流 - 熱 - 構造連成解析 解析例: ヒータ両側に電圧設置一例による実装予測</p> <p>チップ電極 (AI) ~ 4μm<br/>2μm Cu (300~500nm)<br/>Tjmax<br/>ダイアタクト接合 ~ 50μm<br/>基板</p>   |  |

■ A2 【車載用パワーモジュール】 富永講師

|   |  |
|---|--|
| <p>5. 品質保証</p> <p>PCT試験の話題</p> <p>チップサイズ/パッケージングの異なるモジュールのPCT寿命は単純比較できない</p>  <p>クリップ電極-伝熱性能向上-Tjmax上昇緩和<br/>         ①試験 ON(2秒)固定の場合 電流増加-熱ストレス増大-PCT寿命低下<br/>         ②③試験 電流値固定の場合 熱ストレス低減-PCT寿命向上<br/>         アプリケーション(負荷)の試験方法=電流値固定</p> |  |
| <p>5. 品質保証</p> <p>強度試験方法</p> <p>原形試験-摩耗故障領域の破壊試験-多数の故障発生想定<br/>         強度試験(ストレステスト)-市場で使用実績のあるリファレンスとの比較</p>  <p>ワイヤボンディングの比較</p> <p>ワイヤボンディングの比較</p>  |  |
| <p>5. 品質保証</p> <p>電子品質と信頼性</p> <p>信頼性技術=半導体の脆弱性を実装で補強-実装(Packaging)=コスト</p>  <p>実装技術の目的=半導体の脆弱性向上<br/>         -パワー半導体の品質維持+モジュールVA/コスト低減<br/>         (例)パワー半導体の実装技術=パワー半導体の脆弱性を補強する技術。実装技術(VA)を見失う場合が多い。高Tjを ← 部品別選</p>                    |  |
| <p>まとめ</p> <p>■実装技術(JISSO)は半導体を含む電子機器の品質保証に不可欠な技術で、半導体の車載応用として独自に発展した。電動車のパワーエレクトロニクスも同様に、パワー半導体の車載応用としてのパワーJISSOが必要である。</p> <p>■ベアチップを実装する大電流パワーモジュールは、発熱するパワーチップの品質保証が重要で、マイクロエレクトロニクスにはないパワー実装技術(Packaging、放熱、冷却)が必要である</p>  |  |
|   |  |