

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

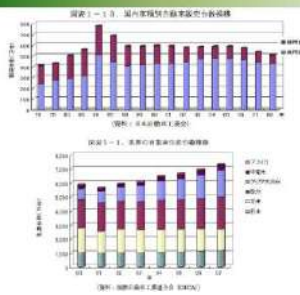
WBGパワーモジュール実装材料 (接合材)

講師: 大田大学 工学部電気電子工学科 山田 靖  
 E-mail: yamada-y@daido-it.ac.jp

目次

1. 自動車の電動化
2. 次世代パワー半導体
3. パワー半導体用接合技術
  - 3.1 求められる要件
  - 3.2 接合技術の研究開発動向
    - 3.2.1 高融点はんだ
    - 3.2.2 合金接合
    - 3.2.3 金属ナノ粒子

1. 自動車の電動化



1. 自動車の電動化

世界の人口と自動車台数

- |  |  |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 中国 13.5億人</li> <li>2. インド 12.4億人</li> <li>3. アメリカ 3.1億人</li> <li>4. インドネシア 2.4億人</li> <li>5. ブラジル 2.0億人</li> <li>...</li> <li>10. 日本 1.3億人</li> </ol> <p>世界人口白書 2014</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. アメリカ 2.5億台</li> <li>2. 中国 1.1億台</li> <li>3. 日本 0.76億台</li> <li>4. ドイツ 0.47億台</li> <li>...</li> <li>ブラジル 0.37億台</li> <li>インド 0.29億台</li> <li>インドネシア 0.18億台</li> </ol> <p>国際車台数白書(2012年) 日本自動車工業会 資料</p> |
|--|--|

新興国では、自動車の普及率は低い

1. 自動車の電動化

図表 1-1-6. 2010年主要国における自動車普及率


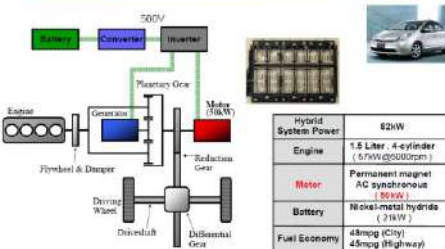
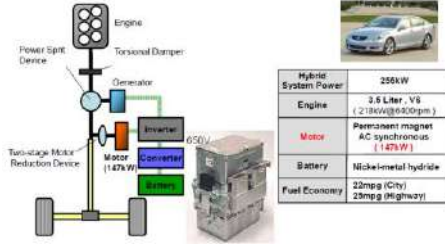
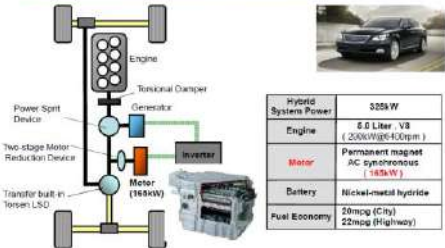

国名	人口 (百万人)	EV台数 (万台)	EV普及率 (%)
米国	311.44	6.583	2.1
中国	1,367.1	1,112.1	80.5
インド	1,199.6	7,222.8	0.6
インドネシア	244.8	259.7	0.1
ロシア	140.8	75.98	0.5
ブラジル	202.1	188.5	0.9
ドイツ	82.2	65.2	0.8
南アフリカ共和国	51.9	47.4	0.9
アルゼンチン	42.2	38.5	0.9
メキシコ	124.8	106.2	0.8
韓国	51.1	46.2	0.9
オーストラリア	22.8	20.2	0.9
フランス	65.8	59.1	0.9
イタリア	60.8	55.1	0.9
スペイン	45.8	41.4	0.9
ポランド	38.8	35.1	0.9
日本	127.8	122.8	0.9
韓国	51.1	46.2	0.9
オーストラリア	22.8	20.2	0.9
フランス	65.8	59.1	0.9
イタリア	60.8	55.1	0.9
スペイン	45.8	41.4	0.9
ポランド	38.8	35.1	0.9
日本	127.8	122.8	0.9

自動車保有台数: VDA, SMMT, World, 国土交通省  
 人口: 総務省「世界の統計2010」, インターネット情報等を元に作成

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

<p>1. 自動車の電動化</p> <p>出典: 米CSM Worldwide社</p> <p>グローバルに見れば、自動車台数の増加が予想される</p>	
<p>1. 自動車の電動化</p> <p>世界の平均気温の変化</p> <p>CO<sub>2</sub>排出比率</p>	
<p>1. 自動車の電動化</p> <p>HC濃度の推移</p> <p>NO<sub>x</sub>濃度の推移</p>	
<p>1. 自動車の電動化</p> <p>地球規模</p> <p>都市規模</p> <p>CO<sub>2</sub>排出量抑制 化石燃料枯渇不安</p> <p>有害排ガスの低減</p> <p>有力な候補 ハイブリット車</p>	
<p>1. 自動車の電動化</p> <p>Ultimate eco-car</p> <p>Hybrid technology</p> <p>AC Power</p> <p>DC Power</p> <p>Motor/Generator</p> <p>Inverter</p> <p>Battery</p>	

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

<p>1. 自動車の電動化</p>  <p>Power module (50kW Output) 18 IGBT 18 diode</p>											
<p>1. 自動車の電動化</p>  <table border="1" data-bbox="430 761 606 896"> <tr> <td>Hybrid System Power</td> <td>82kW</td> </tr> <tr> <td>Engine</td> <td>1.5 Liter, 4-cylinder (57kW@5000rpm)</td> </tr> <tr> <td>Motor</td> <td>Permanent magnet AC synchronous (56kW)</td> </tr> <tr> <td>Battery</td> <td>Nickel-metal hydride (21kWh)</td> </tr> <tr> <td>Fuel Economy</td> <td>48mpg (City) 45mpg (Highway)</td> </tr> </table>	Hybrid System Power	82kW	Engine	1.5 Liter, 4-cylinder (57kW@5000rpm)	Motor	Permanent magnet AC synchronous (56kW)	Battery	Nickel-metal hydride (21kWh)	Fuel Economy	48mpg (City) 45mpg (Highway)	
Hybrid System Power	82kW										
Engine	1.5 Liter, 4-cylinder (57kW@5000rpm)										
Motor	Permanent magnet AC synchronous (56kW)										
Battery	Nickel-metal hydride (21kWh)										
Fuel Economy	48mpg (City) 45mpg (Highway)										
<p>1. 自動車の電動化</p>  <table border="1" data-bbox="430 1097 606 1232"> <tr> <td>Hybrid System Power</td> <td>255kW</td> </tr> <tr> <td>Engine</td> <td>3.5 Liter, V6 (218kW@6500rpm)</td> </tr> <tr> <td>Motor</td> <td>Permanent magnet AC synchronous (147kW)</td> </tr> <tr> <td>Battery</td> <td>Nickel-metal hydride</td> </tr> <tr> <td>Fuel Economy</td> <td>22mpg (City) 23mpg (Highway)</td> </tr> </table>	Hybrid System Power	255kW	Engine	3.5 Liter, V6 (218kW@6500rpm)	Motor	Permanent magnet AC synchronous (147kW)	Battery	Nickel-metal hydride	Fuel Economy	22mpg (City) 23mpg (Highway)	
Hybrid System Power	255kW										
Engine	3.5 Liter, V6 (218kW@6500rpm)										
Motor	Permanent magnet AC synchronous (147kW)										
Battery	Nickel-metal hydride										
Fuel Economy	22mpg (City) 23mpg (Highway)										
<p>1. 自動車の電動化</p>  <table border="1" data-bbox="430 1500 606 1635"> <tr> <td>Hybrid System Power</td> <td>325kW</td> </tr> <tr> <td>Engine</td> <td>5.0 Liter V8 (250kW@6100rpm)</td> </tr> <tr> <td>Motor</td> <td>Permanent magnet AC synchronous (168kW)</td> </tr> <tr> <td>Battery</td> <td>Nickel-metal hydride</td> </tr> <tr> <td>Fuel Economy</td> <td>50mpg (City) 22mpg (Highway)</td> </tr> </table>	Hybrid System Power	325kW	Engine	5.0 Liter V8 (250kW@6100rpm)	Motor	Permanent magnet AC synchronous (168kW)	Battery	Nickel-metal hydride	Fuel Economy	50mpg (City) 22mpg (Highway)	
Hybrid System Power	325kW										
Engine	5.0 Liter V8 (250kW@6100rpm)										
Motor	Permanent magnet AC synchronous (168kW)										
Battery	Nickel-metal hydride										
Fuel Economy	50mpg (City) 22mpg (Highway)										
<p>1. 自動車の電動化</p>  <p>自動車用パワー半導体モジュールの特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) パワー半導体からの大きな熱流束 &gt;100W/cm<sup>2</sup> (将来500W/cm<sup>2</sup>)</li> <li>(2) スペースが狭い、取組条件が厳しい</li> </ul> <p>パワー半導体素子の高負動作化、小型化、低熱抵抗化</p> <p>パワー半導体モジュールの積層・材料に、より高い性能要求</p>											

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

<p>1. 自動車の電動化</p> <p>三菱電機社報 2007年Vol.81 No.4</p> <p>小型、高出力、高パワー密度</p>																															
<p>目次</p> <p>1. 自動車の電動化</p> <p>2. 次世代パワー半導体</p> <p>3. パワー半導体用接合技術</p> <p>3.1 求められる要件</p> <p>3.2 接合技術の研究開発動向</p> <p>3.2.1 高融点はんだ</p> <p>3.2.2 合金接合</p> <p>3.2.3 金属ナノ粒子</p>																															
<p>2. 次世代パワー半導体</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Si</th> <th>SiC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>バンドギャップ(eV)</td> <td>1.12</td> <td>3.26</td> </tr> <tr> <td>電子移動度 (cm<sup>2</sup>/V·s)</td> <td>1350</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>絶縁破壊電界 (MV/cm)</td> <td>0.3</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>飽和電子速度 (cm/s)</td> <td>1 × 10<sup>7</sup></td> <td>2.2 × 10<sup>7</sup></td> </tr> <tr> <td>熱伝導率 (W/m·K)</td> <td>150</td> <td>490</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">適用効果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>半導体素子 (SiC/Si)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>高温動作化</td> <td>2倍 水冷→空冷</td> </tr> <tr> <td>高耐圧化</td> <td>10倍 直列素子数低減</td> </tr> <tr> <td>低損失化</td> <td>1/100倍 小型・高効率化</td> </tr> <tr> <td>高速・高周波化</td> <td>2倍 小型・高速化</td> </tr> </tbody> </table>		Si	SiC	バンドギャップ(eV)	1.12	3.26	電子移動度 (cm <sup>2</sup> /V·s)	1350	1000	絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	3.0	飽和電子速度 (cm/s)	1 × 10 <sup>7</sup>	2.2 × 10 <sup>7</sup>	熱伝導率 (W/m·K)	150	490	適用効果		半導体素子 (SiC/Si)		高温動作化	2倍 水冷→空冷	高耐圧化	10倍 直列素子数低減	低損失化	1/100倍 小型・高効率化	高速・高周波化	2倍 小型・高速化	
	Si	SiC																													
バンドギャップ(eV)	1.12	3.26																													
電子移動度 (cm <sup>2</sup> /V·s)	1350	1000																													
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	3.0																													
飽和電子速度 (cm/s)	1 × 10 <sup>7</sup>	2.2 × 10 <sup>7</sup>																													
熱伝導率 (W/m·K)	150	490																													
適用効果																															
半導体素子 (SiC/Si)																															
高温動作化	2倍 水冷→空冷																														
高耐圧化	10倍 直列素子数低減																														
低損失化	1/100倍 小型・高効率化																														
高速・高周波化	2倍 小型・高速化																														
<p>2. 次世代パワー半導体</p> <p>次世代パワー半導体への期待</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・低損失 (低定常損失)</li> <li>・高速 (低スイッチング損失)</li> <li>・高温動作 &gt;200°C (高温環境)</li> </ul> <p>実装技術・材料が十分でない      接合、絶縁、封止、熱応力対応、...</p>																															
<p>2. 次世代パワー半導体</p> <p>200°Cを超える高温動作のニーズは、あるか?</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p>・負荷が刻々と変化する乗物では、短時間高負荷のニーズ有</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p>・高温では損失が増えるため、高温動作は効率を下げる</p> </div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px; width: fit-content; margin-left: auto; margin-right: auto;"> <p>・ハイブリッド車のような高温環境では、メリット有 (冷却系の簡素化)</p> </div> <p>さまざまな意見があるが、高温動作を実現できる実装 (接合) 技術がなければ、選択肢にならない</p>																															

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

<p>2. 次世代パワー半導体</p> <p>次世代パワー半導体モジュールの温度想定</p> <p>3次元有限要素法熱解析</p> <p>温度 (°C)</p> <p>Si半導体素子</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>素子サイズ10mm角</li> <li>熱伝率100W/cm<sup>2</sup></li> <li>熱伝達10<sup>4</sup>W/m<sup>2</sup>K</li> <li>冷却水65℃</li> </ul> <p>パワー半導体素子</p> <p>冷却器</p> <p>次世代半導体素子 (GaN,SiC)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>素子サイズ6mm角</li> <li>熱伝率500W/cm<sup>2</sup></li> <li>熱伝達5x10<sup>4</sup>W/m<sup>2</sup>K</li> <li>冷却水100℃</li> </ul>	
<p>目次</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 自動車の電動化</li> <li>2. 次世代パワー半導体</li> <li>3. パワー半導体用接合技術             <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1 求められる要件</li> <li>3.2 接合技術の研究開発動向                 <ol style="list-style-type: none"> <li>3.2.1 高融点はんだ</li> <li>3.2.2 合金接合</li> <li>3.2.3 金属ナノ粒子</li> </ol> </li> </ol> </li> </ol>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.1 求められる要件</p> <p>なぜ今、パワー半導体の接合技術が必要か？</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・自動車の電動化により需要が拡大 発電の多様化により、小型電力変換器の増加</li> <li>・SiC、GaNパワー半導体の出現により、200℃以上の高温動作の可能性</li> <li>・Pb系はんだは、環境問題で使用不可</li> </ul>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.1 求められる要件</p> <p>電気</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・直流</li> <li>・交流/高周波</li> <li>・電圧/電流分布</li> </ul> <p>伝熱</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・熱抵抗</li> <li>・熱容量</li> <li>・冷却</li> </ul> <p>熱応力</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・応力/ひずみ</li> <li>・変形</li> <li>・亀裂進展/剥離</li> </ul> <p>材料、構造、工程</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.1 求められる要件</p> <p>接合というと...</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・「くっつける」だけ?</li> <li>・何か難しいのか?</li> <li>・つまらん研究では?</li> </ul> <p>実は三重苦で日陰の存在</p> <p>くっつけるだけではなく、熱を通し、電気を通し、熱応力にも耐え...、コスト・レアメタルもだめ</p>	

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

<p>3. パワー半導体接合技術 3.1 求められる要件</p> <p>接合技術を検討する際に、留意すべき事項</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆接合材料 ベース材料 (金属、有機物)、添加物、コスト、各物性値 無害性、供給性、安定性 (保存) など</li> <li>◆工程 温度、加圧、雰囲気など 多素子・多層同時接合</li> <li>◆被接合材料 (面) 材料の制約、表面状態、面粗度、平行度など</li> <li>◆破壊モード クラック伸展、剥離</li> <li>◆検査方法 X線、超音波</li> </ul>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.1 求められる要件</p> <p>伝熱性:ほとんどの場合必要</p> <p>導電性:電流経路である場合 (交流・高周波動的な視点が必要)</p> <p>絶縁性:接合層で絶縁する場合</p> <p>強度 信頼性 耐熱性</p> <p>熱膨張係数差、温度分布に伴う熱応力にどう対応するか? どこで信頼性を持たせるか?</p> <p>接合部の強度が高い →接合部は壊れないが、被接合が壊れる 接合部の強度が低い →接合部が壊れる</p> <p>低応力工程:初期応力+動作時の応力で検討要</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.1 求められる要件</p> <p>信頼性について</p> <p>■熱応力の原因 実装材料の熱膨張係数差、温度分布等に起因する熱応力</p> <p>■主な信頼性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・冷熱サイクル 機器周囲温度の変化 冷間時～動作時、長い時定数</li> <li>・パワーサイクル パワー半導体の自己発熱 (損失) 周囲温度+パルスの温度上昇、短い時定数</li> <li>・製造時の熱履歴</li> </ul>	
<p>□電気特性 (a) 直流抵抗</p> <p>直流抵抗R  <math>R = \rho l / s</math>  <math>\rho</math>: 抵抗率、l: 長さ、s: 断面積</p> <p>素子 電極/基板</p> <p>接合部</p> <p><math>\rho = 2 \mu \Omega \text{cm}</math> (Cu: <math>1.6 \mu \Omega \text{cm}</math>)  <math>l = 0.1 \text{mm} = 0.01 \text{cm}</math>  <math>s = 1 \text{cm}^2</math> の場合  <math>R = 0.02 \mu \Omega</math></p> <p>電流 <math>I = 500 \text{A}</math> として、損失 <math>P</math> は、  <math>P = I^2 R = 5 \text{mW}</math>: 無視できる程度</p> <p>仮に、有効面積が <math>1/10</math> としても  <math>P = 50 \text{mW}</math> と小さい</p>	
<p>□電気特性 (b) インダクタンス</p> <p>自己インダクタンスLの簡易式  <math>L = \mu l / 2\pi (\ln 2l/a - 1)</math>  <math>\mu</math>: 透磁率、l: 長さ、a: 半径</p> <p>素子 電極/基板</p> <p>接合部</p> <p><math>l = 0.01 \text{cm}</math> では計算できないので、  <math>l = 10 \text{cm}</math>、半径 <math>1 \text{cm}</math> の場合 <math>L = 40 \text{nH}</math>      単純に <math>l = 0.01 \text{cm}</math> 換算で <math>L = 0.04 \text{nH}</math></p> <p>仮に半径が <math>1/10</math> となっても、同様に  <math>L = 0.08 \text{nH}</math> で、主回路の配線インダクタンス数 ~ 数十 <math>\text{nH}</math> に比べれば小さい</p> <p><math>L = 1 \text{nH}</math> とは、<math>I = 500 \text{A}</math> が <math>t = 100 \text{ns}</math> で      ターンオフする際のサージ電圧 <math>\Delta V</math> が、  <math>\Delta V = L \times di/dt = 5 \text{V}</math> と小さい</p> 	

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

<p>□熱特性</p> <p>素子 電極/基板</p> <p>接合部</p> <p>熱抵抗 <math>R_{th}</math>  <math>R_{th} = (1/\lambda) \times (l/s)</math>  <math>\lambda</math>: 熱伝導率, <math>l</math>: 長さ, <math>s</math>: 面積</p> <p><math>\lambda = 100W/mK, l = 0.01cm, s = 1cm^2</math>  <math>R_{th} = 0.01K/W</math>  <math>P = 500W</math> に対して <math>\Delta T = 5K</math> 程度</p> <p>仮に有効面積が1/10となると,  <math>R_{th} = 0.1K/W</math>  <math>P = 500W</math> に対して, <math>\Delta T = 50K</math> と      相当大きい</p> <p>以上のことから、電気特性に比べて、<b>熱特性に注視すべき</b>と思われる</p>	
<p>目次</p> <p>1. 自動車の電動化</p> <p>2. 次世代パワー半導体</p> <p>3. <b>パワー半導体用接合技術</b></p> <p>3.1 求められる要件</p> <p>3.2 <b>接合技術の研究開発動向</b></p> <p>3.2.1 高融点はんだ</p> <p>3.2.2 合金接合</p> <p>3.2.3 金属ナノ粒子</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (概要)</p>  <p>加圧力</p> <p>接合温度 (°C)</p> <p>金属材料接合</p> <p>導電性接着剤 (条件多様)</p> <p>Cuシンタ Niシンタ Agシンタ Sn基TLP Au-Sn, Au-Si Bi Zn-Al Sn-Cu, Sn-Ag, Sn-Ni, Sn-Cu-Bi</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (概要)</p> <p>次世代パワー半導体デバイスの200℃以上の高温動作に向けた<b>接合技術の信頼性</b></p> <p>デバイス上部接合</p> <p>熱応力緩和層</p> <p>パワー半導体デバイス</p> <p>冷却器</p> <p>樹脂モールド実装構造</p> <p>モールドレス実装構造</p> <p>リットフレーム構造          ・ワイヤボンディング          ・リボンボンディング</p> <p>伝熱 그리스、シート          ・異方熱伝導性材料</p> <p>・Pb系はんだ接合          ・Au系はんだ接合          ・Zn系高融点はんだ接合          ・Bi系高融点はんだ接合          ・CuSn合金接合          ・金属ナノ粒子接合</p>	
<p>目次</p> <p>1. 自動車の電動化</p> <p>2. 次世代パワー半導体</p> <p>3. <b>パワー半導体用接合技術</b></p> <p>3.1 求められる要件</p> <p>3.2 <b>接合技術の研究開発動向</b></p> <p>3.2.1 高融点はんだ</p> <p>3.2.2 合金接合</p> <p>3.2.3 金属ナノ粒子</p>	

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (高融点はんだ)

組成の検討

Zn-Al phase diagram

6%Al-Zn: 融点 390°C

共晶点を選択  
・融点最低  
・均一組成

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (高融点はんだ)

(1) 酸化膜除去および酸化防止 (2) 濡れ性促進

自然酸化膜  
RF プラズマによるエッチング  
50nm Cu 成膜 (酸化防止)  
Cuは Zn-Alの物性にほとんど影響しない  
また酸化膜は H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> flow中で還元可

50nm Cu  
Ni  
・Cu は Znと高い反応性  
・接合界面に残らない

Zn-Al pellet  
Melted Zn-Al

430°C 450°C  
With Cu  
No Cu

薄層Cuは、Zn-Alの濡れ性を促進

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (高融点はんだ)

接合試料の作製

Zn-Al sheet 自然酸化膜  
エッチング  
50nm Cu 成膜  
チップ  
Ni  
基板

改善前  
改善後  
超音波探傷による観察

Si  
Zn-Al  
Ni plated Cu (DBC substrate)  
接合試料の断面

濡れ性の改善により、緻密な接合を得た

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (高融点はんだ)

冷熱サイクル信頼性

試験温度: -40/160°C  
サイクル数: 1000

チップ  
Zn-Al  
Cu  
Zn-Al  
Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>  
基板

クラックや顕著なIMCは見られない

-40/160°C 試験 1000サイクル後

目次

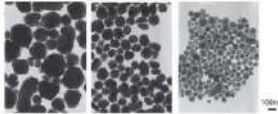

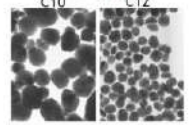
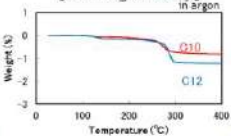
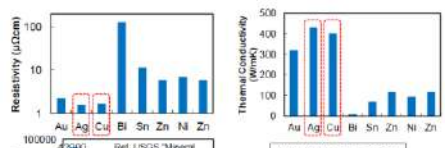
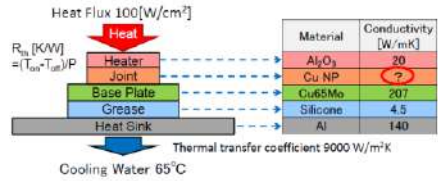
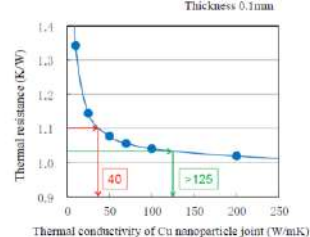
1. 自動車の電動化
2. 次世代パワー半導体
3. パワー半導体用接合技術
  - 3.1 求められる要件
  - 3.2 接合技術の研究開発動向
    - 3.2.1 高融点はんだ
    - 3.2.2 合金接合
    - 3.2.3 金属ナノ粒子



■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

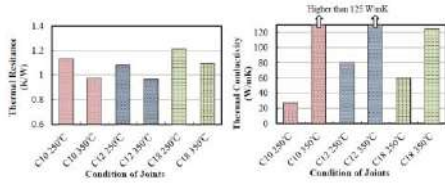
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (合金接合)</p> <p><b>接合方法</b></p> <p>CuSn合金は、溶融したSnと 固体Cuから生成</p> <p>2µm Sn film      10µm Sn film</p> <p>Cu<sub>3</sub>Sn is generated for 2µm Sn film. Cu<sub>3</sub>Sn and Cu<sub>2</sub>Sn<sub>3</sub> for 10µm film</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (合金接合)</p> <p><b>XRD (X線回折)</b></p> <p>Sn 単相は検出されない。従って、全てのSnは、CuSn 合金になったと思われる。合金の組成は、Cu<sub>3</sub>Sn および Cu<sub>2</sub>Sn<sub>3</sub></p> <p>Snの融点 (231°C) を越えた 使用可能性</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (合金接合)</p> <p><b>ナノインデンテーションによる硬度比較</b></p> <p>Rate: 100µN/s, Line: repeat</p> <p>Cu は、ほぼ2倍の変形量。従って、CuSn 合金はCuに比べてかなり硬い</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (合金接合)</p> <p><b>冷熱サイクル信頼性</b></p> <p>2µm Sn film deposited sample</p> <p>10µm Sn film deposited sample</p> <p>After -40/230°C, 2000 cycles test</p> <p>Analysis by EDX</p> <p>冷熱サイクル試験後も、Cu<sub>3</sub>Sn の組成になっている</p> <p>優れた信頼性を示した</p>	
<p><b>目次</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 自動車の電動化</li> <li>2. 次世代パワー半導体</li> <li>3. パワー半導体用接合技術             <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1 求められる要件</li> <li>3.2 接合技術の研究開発動向                 <ol style="list-style-type: none"> <li>3.2.1 高融点はんだ</li> <li>3.2.2 合金接合</li> <li>3.2.3 金属ナノ粒子</li> </ol> </li> </ol> </li> </ol>	

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>・ナノ粒子: 融点低下 → バルク融点より大幅に低温で接合可能</p> <p>・Ag系ナノ粒子接合: 多くの研究報告有。しかし, Agは高コスト</p> <p>・Cuは導電性、熱伝導性に優れる → Cuナノ粒子接合を検討</p>  <p>Cuナノ粒子のTEM観察写真</p> <p>Cuナノ粒子を、脂肪酸とアミンで被覆。加熱時に分解して接合</p>													
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p>  <p>Cu ナノ粒子</p> <p>保護層</p> <p>C10: 脂肪酸(C<sub>10</sub>H<sub>19</sub>COOH) + アミン(C<sub>10</sub>H<sub>21</sub>NH<sub>2</sub>)          C12: 脂肪酸(C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>COOH) + アミン(C<sub>12</sub>H<sub>27</sub>NH<sub>2</sub>)</p> <p>【TEM 観察】          C10 C12</p>  <p>平均粒径 230[nm] 140[nm] 100nm</p> <p>【Thermogravimetry】          in argon</p>  <p>Weight (%)          Temperature (°C)</p>													
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p>  <p>Resistivity (μΩcm)          Thermal Conductivity</p> <p>Price in US (\$/kg)          Ref. USGS "Mineral Commodity Summaries 2011"</p> <p>Advantages of Cu</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Low Resistivity</li> <li>• High Conductivity</li> <li>• Low Cost</li> <li>• Avoid Resource Risk</li> </ul>													
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p>  <p>Heat Flux 100[W/cm<sup>2</sup>]</p> <p><math>R_{th} [K/W] = (T_{top} - T_{bottom}) / P</math></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>Conductivity [W/mK]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Cu NP</td> <td>?</td> </tr> <tr> <td>Cu65Mo</td> <td>207</td> </tr> <tr> <td>Silicone</td> <td>4.5</td> </tr> <tr> <td>Al</td> <td>140</td> </tr> </tbody> </table> <p>Thermal transfer coefficient 9000 W/m<sup>2</sup>K          Cooling Water 65°C</p> <p>Joint experiment: 250, 300, 350°C-1MPa-5min in H<sub>2</sub>          Thermal resistance: Measured at the steady conduction          Thermal Conductivity: Calculated from thermal resistance using the finite element method</p>	Material	Conductivity [W/mK]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	Cu NP	?	Cu65Mo	207	Silicone	4.5	Al	140	
Material	Conductivity [W/mK]												
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20												
Cu NP	?												
Cu65Mo	207												
Silicone	4.5												
Al	140												
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p>  <p>Thickness 0.1mm</p> <p>Thermal resistance (K/W)</p> <p>Thermal conductivity of Cu nanoparticle joint (W/mK)</p>													

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)



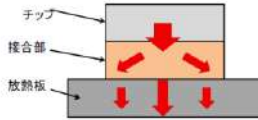
Thermal conductivities of sintered at 350°C are higher than a conventional solder very much!!

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

Material	Melting Point (°C)	Thermal Conductivity (W/mK)
Cu nanoparticle	1085	>125
Zn-5Al	380	117
Cu <sub>3</sub> Sn	640	70
Cu <sub>3</sub> Sn <sub>2</sub>	415	34
Pb-5Sn	314	36
Au-20Sn	280	59
Bi-CuAlMn	270	8

Zn-5Al, Bi-CuAlMn: Ref. Y. Yamada et al., Trans. Jpn. Inst. Electron. Packag., 2009, 2, 79.  
 Cu<sub>3</sub>Sn, Cu<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>: Ref. Y. Yamada et al., Acta Mater., 2013, 61, 1525.  
 Pb-5Sn, Au-20Sn: Ref. S. Kim et al., J. Electron. Mater., 2000, 38, 256.

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

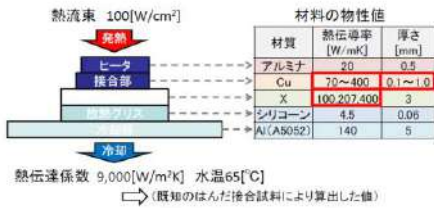


接合部の熱伝導率が特に高い場合は、はんだ等、従来の接合材料とは異なる現象が起こることが予想された

本研究では、接合部の熱伝導率が、実装構造全体の熱抵抗に及ぼす影響を検討する

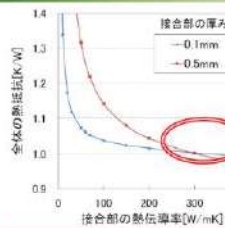
3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

【モデルの物性値と熱条件】



熱特性を解明するために、シンプルな構造とした

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)



接合部の熱伝導率が高い場合に、接合部の厚い方が熱抵抗が低くなった

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>【条件】 接合部の熱伝導率: 400[W/mK]</p> <p>接合部がある厚みで、熱抵抗が最小値となった</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>【条件】 接合部の熱伝導率: 400W/mK</p> <p>熱抵抗の値は、接合部が増加し、放熱板は減少している</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>接合部が厚い方が、ヒータチップの温度差が小さくなった</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>【熱抵抗が低下するイメージ】</p> <p>→ : 熱の流れの大きさ</p> <p>熱抵抗が低下した要因は、 面内方向への熱の拡がりが増えたことが考えられる</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>放熱板の熱伝導率が低い方が、熱抵抗の減少が大きくなる</p>	

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

【各物性値】

部品	材料	寸法 (mm)	熱伝導率 (W/mK)	熱膨張係数 (ppm/K)
ヒータ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6×6×0.5	20	6.7
接合部	Cu nanoparticle	6×6×1	N/A	N/A
ベースプレート	Cu-65Mo	20×40×3	207	8.2
サーマルシート	Silicone	20×40×1	5	N/A
	Silicone	20×40×1	1	N/A
	N/A	20×40×2	3.2	N/A
冷却器	Al	85×194×5	140	23.8

注: 接合部の熱伝導率は約 1.5 (ppm/K) の差がある。

---

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

項目	狙い	方策
試料の構造	接合部以外が先に壊れないこと	思いつく限りヒータチップ、剛性の高い導熱性基板を使用
	大電流電源が不要、安全性確保、大線ワイヤボンディングなし	ヒータチップの抵抗を数十Ω (室温) として、低電圧で試験可。電圧は最大100V前後。
	チップとのCTE差	基板材料を変えることで変更可
	低コスト	冷却器には伝熱シートで固定し、試料を容易に交換可
	PCT温度変化率	基板サイズ、ヒータチップの電力で変更可 (検討中)
電線取り出し	端子板を貼り付け、Au線線でワイヤボンディング	
チップ内温度分布	発熱、基板、冷却条件等で変更可	

---

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

項目	狙い	方策
温度測定	絶対値	ヒータチップ中央上面にシース熱電対を接触させて温度を測定 (中央付近の温度測定)
	相対値	ヒータチップの抵抗を測定し、抵抗温度係数から温度を推定 (チップ全体の温度測定)
	連続測定	データロガーとPCで、その場測定可
	低コスト	電圧・電流計2台とデータロガー等で可

---

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

**試験片の接合条件**

接合材料	粒子	接合温度 (°C)	加圧 (MPa)
Cuナノ粒子	C12	250	1
		300	
		350	
Sn-0.7Cu 融点: 227°C	—	240	

\*保持時間: Cuナノ粒子接合 (5分)、Sn-0.7Cu (2分)

---

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

【65°C/200°C試験】

【65°C/250°C試験】

各試験片にて、両試験を3000サイクルずつ実施

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p>	<p>原稿のバグ？</p>
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>         C12, 300°C接合          Sn-0.7Cu (はんだ) 接合          C10, 300°C接合     </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・C12接合: 温度上昇無し</li> <li>・C10接合: 突然温度上昇</li> <li>・Sn-0.7Cu: 徐々に温度上昇</li> </ul> <p>高温における信頼性は、<b>Cuナノ粒子接合&gt;はんだ</b></p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>         C12, 300°C接合          Sn-0.7Cu (はんだ) 接合          C10, 300°C接合     </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・C12接合: 縦割れが多数発生 ⇒縦割れによる、熱抵抗の上昇は無いと思われる</li> <li>・C10接合: 大きな界面剥離、横割れが見られた</li> <li>・Sn-0.7Cu: 亀裂進展と思われる</li> </ul>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>         C12, 250°C接合          C12, 350°C接合          C12, 300°C接合     </p> <p>いずれも温度変化は見られなかった      ⇒接合温度による、信頼性の違いは確認できなかった</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>         C12, 250°C接合          C12, 350°C接合          C12, 300°C接合     </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・いずれもの接合温度でも、縦割れが見られた</li> </ul> <p>試験後の断面SEM像</p>	

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

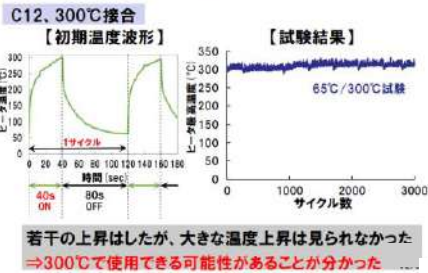
3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

パワーサイクル試験結果のまとめ

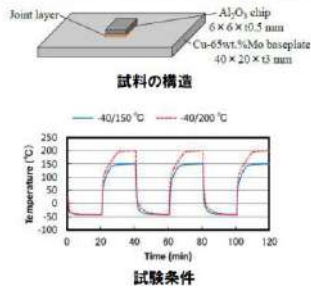
接合条件	65°C/200°C試験 (サイクル数)	65°C/250°C試験 (サイクル数)
C12 250°C	○ 3000	○ 3000
C12 300°C	○ 3000	○ 3000
C12 350°C	○ 3000	○ 3000
C10 300°C	○ 3000	× 360
Sn-0.7Cu	× 135	—

\*温度変化(ΔT)が20°C以内のサイクル数

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)



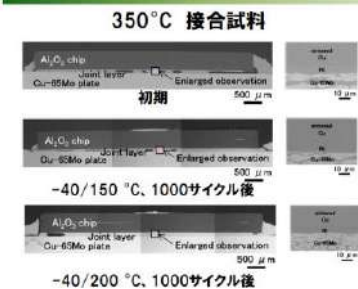
3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)



3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)



3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)



■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p><b>Sn-0.7Cu はんだ接合試料</b></p> <p>初期 500 μm, 10 μm</p> <p>-40/150 °C、1000サイクル後 500 μm, 10 μm</p> <p>-40/200 °C、1000サイクル後 500 μm, 10 μm</p>													
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p><b>TCTまとめ</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuナノ粒子接合試料は、Sn-0.7Cuはんだに比べ、優れた信頼性を示した。</li> <li>• 300°Cで接合した試料は、-40/200°Cの試験で接合界面が剥離したが、350°Cで接合したものは、破壊が見られなかった。</li> </ul>													
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>サンプル上写真</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>構成要素</th> <th>サイズ(mm)</th> <th>材料 (チップはACTE)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ヒータチップ</td> <td>6×10.5</td> <td>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td> </tr> <tr> <td>接合部</td> <td>6×(0.075~0.14)</td> <td>Cuナノ粒子 Cu-65Mo(1.8) Cu-40Mo(4.9) Al-SiC(7.5) Cu基板(18.0)</td> </tr> <tr> <td>放熱基板</td> <td>20×40×13</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>接合条件 接合温度:250,300,350 (°C) 加圧:1 (MPa)</p>	構成要素	サイズ(mm)	材料 (チップはACTE)	ヒータチップ	6×10.5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	接合部	6×(0.075~0.14)	Cuナノ粒子 Cu-65Mo(1.8) Cu-40Mo(4.9) Al-SiC(7.5) Cu基板(18.0)	放熱基板	20×40×13		
構成要素	サイズ(mm)	材料 (チップはACTE)											
ヒータチップ	6×10.5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>											
接合部	6×(0.075~0.14)	Cuナノ粒子 Cu-65Mo(1.8) Cu-40Mo(4.9) Al-SiC(7.5) Cu基板(18.0)											
放熱基板	20×40×13												
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>熱電対: チップ中心温度 ⇒接合部中心の劣化確認</p> <p>電源: チップの電気抵抗 ⇒接合部全体の劣化確認</p> <p><b>試験条件</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 定電圧制御</li> <li>• 印加電圧: サンプルごとに決定 (温度優先)</li> </ul> <p>3000サイクル実施</p>													
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p><b>パワーサイクル結果 (250°C接合)</b></p> <p>ベース値 (ACTE)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Cu-65Mo (1.8)</li> <li>Cu-40Mo (4.8)</li> <li>Al-SiC (7.5)</li> <li>Cu基板 (18.0)</li> </ul> <p>【Cu基板 断面SEM像】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 接合層内に水平方向のクラック ⇒放熱経路を遮断</li> <li>• 接合体の焼結不足 ⇒強度が弱い</li> </ul>													



■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

パワーサイクル結果 (300℃接合)

全ての試験片に65°C/200°C試験、65°C/250°C試験  
 共に電気抵抗値の大きな変化は見られなかった  
 ⇒次ページにこの結果の考察を示す

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

300℃接合試験片 考察

- ・全サンプルの接合層内に垂直方向のクラックが多数
- ・水平方向のクラックは見られず最後まで破断に至っていない
- ・熱特性への影響が少ないとされる垂直クラック  
 ⇒電気抵抗値の変化が少なかったと推測された

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

パワーサイクル結果 (350℃接合)

【Cu基板 断面SEM像】 【チップ周辺SEM像】

- ・チップへのクラック ⇒破壊モードが異なる
- ・接合体の融結進行 ⇒機械的強度が強い

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

パワーサイクル結果 (まとめ)

材料	250℃接合		300℃接合		350℃接合	
	65°C/200°C試験	65°C/250°C試験	65°C/200°C試験	65°C/250°C試験	65°C/200°C試験	65°C/250°C試験
Cu-65Mo (1.5)	3000以上	3000以上	3000以上	3000以上	3000以上	3000以上
Cu-40Mo (4.9)	3000以上	3000以上	3000以上	3000以上	3000以上	3000以上
AlSiC (7.3)	3000以上	3000以上	3000以上	3000以上	3000以上	3000以上
Cu基板 (19.3)	65°C		3000以上	3000以上	3000以上	911°C

1. ΔCTEが大きいサンプルに劣化が見られた  
 2. 接合温度によって破壊のモードが異なった

3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)

250℃接合 Cu基板 破壊モード考察

・接合層に大きなひずみが生じた事で  
 早期に劣化したと推測される

■ A7 【パワーモジュール実装材料 (接合材)】 山田講師

<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>350°C接合 Cu基板 破壊モード考察</p> <p>【接合温度ごとの接合層ヤング率】 【接合層のヤング率と相当応力の関係】</p> <p>ヤング率 (GPa)</p> <p>250°C 300°C 350°C 接合温度</p> <p>チップ最大相当応力 (MPa)</p> <p>接合層のヤング率 (GPa)</p> <p>・Cu基板のみAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ヒータチップの3点曲げ強さを上回った ・接合温度に起因して接合層のヤング率が上昇 ⇒チップに大きな応力が生じた事でチップが割れたと推測される。</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>ナノインデンテーション法によるヤング率の測定</p> <p>10 μm</p> <p>接合層の断面を作製 ↓ 圧子を用いた測定 (運速度0.05 mm/s, 深さ500nm) ↓ 断面画像の二値化による空層率の算出、整理</p> <p>350°Cで接合した試料は、高ヤング率のため、PCTでチップが割れる事象になったと思われる。</p>	
<p>3. パワー半導体接合技術 3.2 接合技術の研究開発動向 (金属ナノ粒子)</p> <p>まとめ</p> <p>熱膨張係数の異なる4つの基板でパワーサイクル信頼性を調べ、以下のことが推定された</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ΔCTEが7.3 ppm/K以下の系で優れた信頼性を示した</li> <li>2. ΔCTEが10.3 ppm/K (Cu基板)において接合温度によって異なる破壊モードが観察された ⇒接合温度によって接合層の強度が異なる事が推定された</li> </ol> <p>88/91</p>	
<p>目次</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 自動車の電動化</li> <li>2. 次世代パワー半導体</li> <li>3. パワー半導体用接合技術       <ol style="list-style-type: none"> <li>3.1 求められる要件</li> <li>3.2 接合技術の研究開発動向           <ol style="list-style-type: none"> <li>3.2.1 高融点はんだ</li> <li>3.2.2 合金接合</li> <li>3.2.3 金属ナノ粒子</li> </ol> </li> </ol> </li> </ol>	
<p>参考文献</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>[1] Y. Yamada, et al. "Pb-Free High Temperature Solder Joints for Power Semiconductor Devices," Trans. of JEP, Vol.2, No.1 (2009), pp.79-84</li> <li>[2] T. Ishizaki et al. "Thermal characterization of Cu nanoparticle joints for power semiconductor device" Microelectronics Reliability Vol.53 (2013), pp.1543-1547</li> <li>[3] 石嶋ら "Cuナノ粒子接合の熱特性評価" 第23回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (MES 2013), pp.163-165</li> <li>[4] 石嶋ら "Cuナノ粒子接合のシミュレーションによる熱特性予測" 第23回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (MES 2013), pp.159-162</li> <li>[5] 久野ら "Cuナノ粒子接合のV7-V7サイクル信頼性" 20th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics (MATE 2014), pp.125-130</li> <li>[6] T. Ishizaki et al. "Reliability of Cu nanoparticle joint for high temperature power electronics" Microelectronics Reliability Vol.54 (2014) pp.1867-1871</li> <li>[7] T. Ishizaki et al. "Thermal cycle reliability of Cu-nano-particle joint" Microelectronics Reliability Vol.55 (2015) pp.1861-1866</li> <li>[8] T. Ishizaki et al. "Thermal simulation of joints with high thermal conductivities for power electronic device" of Cu nanoparticle joints with mismatched coefficients of thermal expansion", MicroMicroelectronics Reliability Vol.55 (2015), pp.1060-1066</li> <li>[9] T. Ishizaki et al. "Power cycle reliability electronics Reliability Vol.64 (2016), pp.287-293</li> <li>[10] 三浦ら "Cuナノ粒子接合の信頼性及び熱膨張係数差の影響" 第30回エレクトロニクス実装学会春季学術大会 (2016), pp.446-449</li> <li>[11] T. Ishizaki, O. Miura, A. Kuno, R. Hasegawa, M. Usui, Y. Yamada, "Young's modulus of a sintered Cu joint and its influence on thermal stress," Microelectronics Reliability, 76-77 (2017), pp.405-408</li> <li>[12] 山田博: "パワー半導体実装用接合材料の特性評価法," エレクトロニクス実装学会誌, Vol.21, 6, (2018), pp.579-585</li> </ol> <p>90/91</p>	