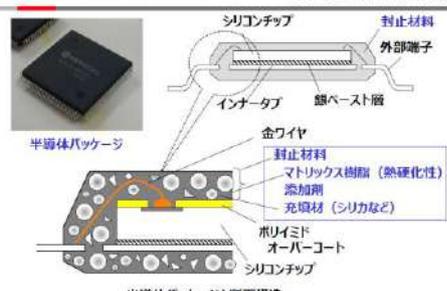


■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

<p>Advanced Course</p> <p>パワーモジュール実装材料(封止樹脂)</p> <p>(株)日立製作所研 究開発グループ 材料イノベーションセンタ 石井利昭</p> <p>横浜国立大学 高橋昭雄、大山俊幸</p>																					
<p>Contents</p> <p>1. 章 封止材料(封止樹脂)の機能及び組成</p> <p>2. 章 パワーモジュールの構造と機能</p> <p>3. 章 パワーモジュール用封止材料の高性能化</p>																					
<p>2 実装技術・実装材料とは? YNU 横浜国立大学</p> <p>高度種な電子部品、回路基板、電子電気制御装置を制作するプロセス・材料技術</p>  <p>図 電子制御装置 図 半導体パッケージ</p>																					
<p>3 実装の役割 YNU 横浜国立大学</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>№</th> <th>項目</th> <th>機能の内容</th> <th>実装材料</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>電気的インターコネクト ディスプレイインターコネクト</td> <td>・信号の伝播 ・電源の供給 ・テスト用プローブ</td> <td>・配線基板、バスバ ・端子、接続材 (金ハンパ、はんだ、 銅ペースト) ・ボンディングワイヤ ・融線(封止樹脂、セラミクス)</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>熱的インターコネクト</td> <td>・放熱路の形成 ・冷却性能の向上</td> <td>・放熱基板 ・放熱フィン ・パッケージ材(封止樹脂)</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>機械的ディスプレイインターコネクト</td> <td>・面ハンドリングストレス ・外部応力からの保護</td> <td>・パッケージ材(封止樹脂) ・基板</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>化学的ディスプレイインターコネクト</td> <td>・外部雰囲気からの腐食防止</td> <td>・パッケージ材(封止樹脂) ・コーティング剤</td> </tr> </tbody> </table> <p>島根県産、エレクトロニクス実装学会誌、11(4)、212(1996) 産経新聞、49、175-181(1999)</p>	№	項目	機能の内容	実装材料	1	電気的インターコネクト ディスプレイインターコネクト	・信号の伝播 ・電源の供給 ・テスト用プローブ	・配線基板、バスバ ・端子、接続材 (金ハンパ、はんだ、 銅ペースト) ・ボンディングワイヤ ・融線(封止樹脂、セラミクス)	2	熱的インターコネクト	・放熱路の形成 ・冷却性能の向上	・放熱基板 ・放熱フィン ・パッケージ材(封止樹脂)	3	機械的ディスプレイインターコネクト	・面ハンドリングストレス ・外部応力からの保護	・パッケージ材(封止樹脂) ・基板	4	化学的ディスプレイインターコネクト	・外部雰囲気からの腐食防止	・パッケージ材(封止樹脂) ・コーティング剤	
№	項目	機能の内容	実装材料																		
1	電気的インターコネクト ディスプレイインターコネクト	・信号の伝播 ・電源の供給 ・テスト用プローブ	・配線基板、バスバ ・端子、接続材 (金ハンパ、はんだ、 銅ペースト) ・ボンディングワイヤ ・融線(封止樹脂、セラミクス)																		
2	熱的インターコネクト	・放熱路の形成 ・冷却性能の向上	・放熱基板 ・放熱フィン ・パッケージ材(封止樹脂)																		
3	機械的ディスプレイインターコネクト	・面ハンドリングストレス ・外部応力からの保護	・パッケージ材(封止樹脂) ・基板																		
4	化学的ディスプレイインターコネクト	・外部雰囲気からの腐食防止	・パッケージ材(封止樹脂) ・コーティング剤																		
<p>4 半導体のパッケージ材: 封止材料 YNU 横浜国立大学</p>  <p>半導体パッケージ</p> <p>半導体パッケージと断面構造</p>																					

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

5 半導体パッケージの変遷と材料課題 YNU 横浜国立大学

年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代	2010年代
半導体の発現・集積化	インテグレーション	マイコン・LSI	マイコン・LSI	マイコン・LSI	マイコン・LSI
社会背景	マイコン・LSI	マイコン・LSI	マイコン・LSI	マイコン・LSI	マイコン・LSI
デバイス	マイコン・LSI	マイコン・LSI	マイコン・LSI	マイコン・LSI	マイコン・LSI
パッケージ方式	ダイオード	トランジスタ	トランジスタ	トランジスタ	トランジスタ
封止材料の課題	封止材料の課題	封止材料の課題	封止材料の課題	封止材料の課題	封止材料の課題

6 封止材料製造からの封止の流れ YNU 横浜国立大学

1. 押出混合機による基材混合 (Material mixing in extruder)

2. タレット化、出湯、乾燥 (Tabletting, drying, and curing)

3. ウエハのダイシング (ダイシング機) (Wafer dicing)

4. ダイボウニング (ダイボウニング機) (Die bonding)

5. ワイヤボンディング (ワイヤボンディング機) (Wire bonding)

6. トランスフェール/リフト (Transfer/lift)

7. 後硬化、リード加工、ムキ、検査 (Post-curing, lead processing, and inspection)

7 モールドプロセスにおける成形性 YNU 横浜国立大学

速硬化性、離型性、高流動性、溶融粘度など成形性が生産性に大きく影響

成形性: 速硬化性、離型性、高流動性、低粘度化

流動性: 流動長さ、流動停止

硬化: 溶融粘度、硬化時間

8 民生用半導体パッケージの主な不具合 YNU 横浜国立大学

構造	シリコンチップ	封止材	外部端子	基板
主な不具合モード	リフロー不良	温度サイクル不良	外部クラック、剥離	外部クラック、剥離
改良法	高強度化、低膨張率⇒フィラ高充填	低熱膨張化⇒フィラ高充填	外部クラック、剥離	外部クラック、剥離
手法	フィラ高充填により肉厚の改良が可能			

9 車載電子機器への展開～自動車の環境 YNU 横浜国立大学

耐環境性: 振動、熱、塩、腐食性ガス、オイルからの保護

1. On engine/ transmission (最高温度)

2. At engine (intake manifold)

3. Under hood (near engine)

4. Under hood (rear engine)

5. Passenger Compartment

振動レベル (G): 5, 10, 20, 30

温度 (°C): 50, 100, 150

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

<p>10 パワー系電動制御部品の電流・電圧 YNU 横浜国立大学</p> <p>材料課題: 高電圧部品→耐圧材料、高電流部品→高放熱、高耐熱</p> <p>大倉隆功, "カーエレクトロニクスを支える半導体技術", 電子情報通信学会, 90(4), 309 (2007)</p>							
<p>11 モールド構造電子制御装置 YNU 横浜国立大学</p> <p>耐振性・耐熱性・耐油性向上、パワー部品・ICの搭載可、低コスト量産が可能</p> <p>ECUの実装構造 樹脂封止構造</p> <p>樹脂封止により接合部の歪を1/2-1/10以下に低減。</p>							
<p>12 封止樹脂の効果 YNU 横浜国立大学</p> <p>樹脂封止により耐振・耐熱性が向上</p> <p>Reliability of solder joints for resistor Hitachi Review, 2000, 1, p67.</p>							
<p>13 モールドHICの放熱・耐熱実装技術 YNU 横浜国立大学</p> <p>パワーレインを中心としたECUの高機能化、実装部品の高集積化とシステム化</p> <p>ECU: 電子制御ユニット デンソー、松浦、第87回マイクロ接合研究会、2008 神谷、2013エレクトロニクス実装学会シンポジウム</p>							
<p>14 パワーモジュールの応用製品 YNU 横浜国立大学</p> <p>電力・電機機器の高効率化によりCO₂削減 シリコンIGBTのほか、ワイドギャップ半導体 (SiC, GaN) の応用も期待</p> <table border="1"> <tr> <td data-bbox="159 1792 303 1926"> <p>送電システム</p> <p>電力損失の低減</p> </td> <td data-bbox="311 1792 454 1926"> <p>生産設備</p> <p>電力損失の低減、小型化</p> </td> <td data-bbox="462 1792 606 1926"> <p>太陽電池</p> <p>パワーデバイスの高効率化</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="159 1937 303 2038"> <p>電車</p> <p>インバータの小型化・軽量化</p> </td> <td data-bbox="311 1937 454 2038"> <p>自動車</p> <p>冷却機構の小型化、軽量化</p> </td> <td data-bbox="462 1937 606 2038"> <p>エアコン</p> <p>省エネ</p> </td> </tr> </table>	<p>送電システム</p> <p>電力損失の低減</p>	<p>生産設備</p> <p>電力損失の低減、小型化</p>	<p>太陽電池</p> <p>パワーデバイスの高効率化</p>	<p>電車</p> <p>インバータの小型化・軽量化</p>	<p>自動車</p> <p>冷却機構の小型化、軽量化</p>	<p>エアコン</p> <p>省エネ</p>	
<p>送電システム</p> <p>電力損失の低減</p>	<p>生産設備</p> <p>電力損失の低減、小型化</p>	<p>太陽電池</p> <p>パワーデバイスの高効率化</p>					
<p>電車</p> <p>インバータの小型化・軽量化</p>	<p>自動車</p> <p>冷却機構の小型化、軽量化</p>	<p>エアコン</p> <p>省エネ</p>					

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

15 パワーモジュールの市場

YNU 横浜国立大学

2015年から2020年で1.5倍以上の伸び、電気、自動車分野が牽引

富士経済調べ、金額単位：百万円

16 電力変換機の容量と電圧

YNU 横浜国立大学

17 電力変換機の出力量の推移

YNU 横浜国立大学

出力密度は年々増加し、小型高出力化が進行、HEVEV分野で加速

18 インバータ・パワーモジュールの構造と熱抵抗構成

YNU 横浜国立大学

熱抵抗は、セラミクス絶縁板、TIM (グリース) が大きい

材料	熱伝導率 (W/mK)	厚み (mm)
パワーデバイス	150W/mK	~0.4mm
はんだ	20W/mK	~0.03mm
セラミクス絶縁板	100~200W/mK	0.3~0.6mm
はんだ	30W/mK	~0.03mm
放射ベース	200W/mK	3~5mm
TIM	3W/mK	~0.05mm
放射フィン	400W/mK	数mm

19 パワーモジュールの部材構成と稼働時温度変化

YNU 横浜国立大学

Power device (IGBT)
 Insulator
 Radiation fin
 Coolant

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

20 IGBTモジュールの信頼性の目標水準 YNU 横浜国立大学

自動車分野では、産業機器分野や民生機器分野の数倍の信頼性要求

信頼性試験項目	自動車分野	産業機器分野
温度サイクル試験 (数時間間隔の温度変化)	1000サイクル	100サイクル
パワーサイクル試験 (数秒~数十秒周期の温度変化)	3万サイクル	1万5千サイクル
ケース温度を変化させる パワーサイクル試験 (数分周期の温度変化)	1万サイクル	特になし
振動試験	X, Y, Z軸にそれぞれ20G	X, Y, Z軸にそれぞれ10G

カー・エレクトロニクスのすべて2008, 日経BP社 富士電機デバイステクノロジー

21 エポキシ封止材によるパワーモジュールの長寿命化 YNU 横浜国立大学

加筆, 2013エレクトロニクス実装学会シンポジウム

22 接続構造とパワーサイクル寿命 YNU 横浜国立大学

低歪・高放熱樹脂封止により、アルミワイヤの接続寿命、はんだの接続寿命を向上

パワーサイクル寿命 (回)

23 冷却構造の高性能化: 両面冷却構造 YNU 横浜国立大学

約10L
LS600h/LS600h用PCU (PCU: Power Control Unit)

名刺大サイズ
両面間接冷却

新帯, 成形加工, 20 (12), 850 (2008)

300A / 素子
Max 650V
Max 150°C
(均温)

24 両面冷却型 (インフィニオン、日立) YNU 横浜国立大学

両面直接冷却 日立評論, 11, 42(2013)

両面間接冷却 Infineon, PCIM 2016, 2017

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

25 パワーモジュール構造と熱抵抗比較

封止法はゲル封止orエポキシ封止、冷却は片面or両面、TIM材使用法で異なる

モジュールタイプ	片面封止部 ゲル封止タイプ	片面封止部 エポキシタイプ	片面封止部 ゲル封止タイプ	両面封止部 エポキシタイプ	両面封止部 エポキシタイプ
モジュール構造					
片面TIM層数	1	1	0	2	0
熱抵抗Rj-w (推定値)	100%	100%	75%	75%	50%

26 パワーモジュール封止材料の課題

課題	背景	材料技術
高耐熱化	大電流化 Tj:175℃ S i C半導体 Tj:200℃	高耐熱封止樹脂
高信頼化 (耐熱応力、耐高電圧)	高信頼・高寿命化 高電圧化(急速充電)	低熱応力高強度材料 高信頼化技術 高耐圧材料
高熱伝導化	小型軽量化 冷却簡素化	高熱伝導エポキシ材料 高熱伝導充填材

27 Tj高温化の課題

参考 後藤, SiC-Siパワーデバイスパッケージ技術, S&Tセミナー, 2009
 富士デバイステクノロジー(株)

28 シリコンゲルの高耐熱化

材料組成最適化により、シリコンゲルの硬化を防止、パワーモジュールを長寿命化

富士電機技報, 88(4), 254(2015)

29 225℃動作SiCパワーモジュール(ローム)

ロームは、電気自動車(EV)/ハイブリッド車(HEV)や産業機器のインバータ駆動向けに、225℃と高温で動作可能なシリコンカーバイド(SiC)パワーモジュールを開発。ボンディングの終わったフレームを金型にセットして、熱硬化性の樹脂を流し込んで成形する「トランスファーモールド型」と呼ばれるパッケージタイプのもの。新開発の高耐熱樹脂を採用することで実現。

6セットモジュール
 3相インバータ
 600V / 30.0A
 (定格電圧/定格電流)
 MOSFET: 4.8mm角
 SBD: 5.1mm角

縦: 32mm 横: 48mm 高さ: 3mm (4.608cm³)
 NIKKEI BP-NET 2011/10/03

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

35 樹脂の耐熱性指標

物理的耐熱性 (可逆的な要因)

熱により高分子の主鎖、側鎖あるいは分子全体の動きが活発になり起きる現象を耐熱性の尺度とする。冷却によりもとの物性にもとる。

指標:

- ガラス転移温度 (T_g)
 T_g をさかんに熱膨張率が3~4倍になり、弾性率等の物性が大きく低下する。
- 融点 (T_m)
 T_m をさかんに樹脂は流動性示す。
- 熱変形温度 (HDT)

化学的耐熱性 (不可逆的な要因)

高分子は高温で分解する。高温に保ったとき、化学反応による劣化で物性値が限界値以下になる場合の耐熱性をいう。

指標:

- 熱重量減少測定 (TGA)
 5%あるいは10%の重量減少温度 (T_{d5} , T_{d10})

YNU 横浜国立大学

36 樹脂弾性率の温度依存性

YNU 横浜国立大学

37 一般的な封止材料の組成と機能

素材	化合物	配合比	使用目的	
マトリックス樹脂	エポキシ樹脂	5-20	マトリックス樹脂、導電性、電気特性、機械特性等、難燃性付与	
	クルーゾール/ポリアミン/ビスフェノール系			
	硬化剤	フェノール/ポリアミン/アミン化合物	5-20	↑
	硬化促進剤	窒素化合物、ホスフィン系	<1	
可とう剤	シリコーンゴム、ポリオレフィンエラストマー	<5	脆化防止	
充填剤	カーボンブラック	<1	電導性/マトリックス樹脂の補強向上	
	導電剤	三酸化アンチモン	<1	導電性付与
	遮光剤	シリエチンシラン系	<1	金属腐蝕防止
	着色剤	カーボンブラック	<1	着色
充填剤	イオン交換樹脂	<1	耐食性イオンの補強	
充填剤	顔料/フィラー、結晶シリカ、アルミナ	55-90	導電率低下、熱膨張率、機械強度、熱伝導	

YNU 横浜国立大学

38 エポキシ樹脂とは

- 本業に平均1倍以上のオキシラン環を含む化合物の総称
- 反応熱: 27.4 kcal/mol 反応性が低い
- 1930年 Pierre Castan (スイス), Sylvan Greenlee (米国) による発明、歯科材料
- Dow, CIBA, Shellにより、全世界へ市場拡大
 1962年日本の国内生産開始
 三菱化学、DIC、日本化学、新日鉄化学
- 世界需要: 90万t、国内15万t (塗料5万t、電気5万t、3万t建設その他、残輸)
 ⇒ プリント基板、封止材、コイル成型

YNU 横浜国立大学

39 エポキシ樹脂の硬化反応

室温で固形、長期信頼性に優れる特性のハズランが良好

エポキシ樹脂とフェノール硬化剤の反応

エポキシ樹脂 + 硬化剤 → 三次元架橋物

グリシジルエーテル基 + フェノール性水酸基 → 硬化促進剤

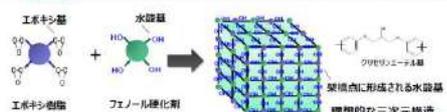
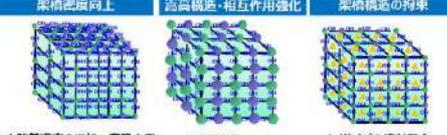
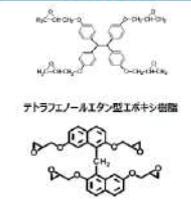
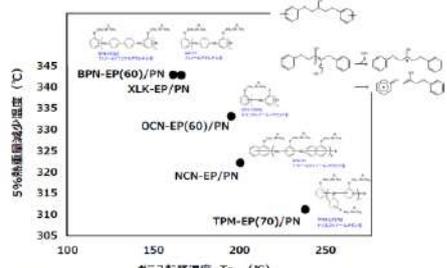
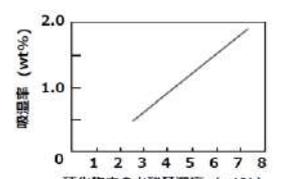
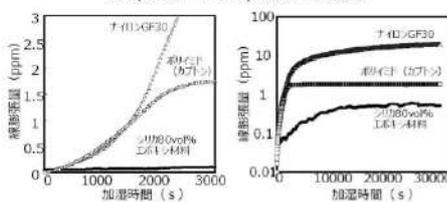
YNU 横浜国立大学

横浜パワーエレクトロニクスカレッジ

8

アドバンスト・コース

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

<p>40 エポキシ樹脂の高耐熱化 YNU 横浜国立大学</p>  <p>エポキシ樹脂 + 水酸基 (フェノール硬化剤) → 架橋点に形成される水酸基 (架橋構造の拘束)</p> <p>架橋密度向上 高高構造・相互作用強化 架橋構造の拘束</p>  <p>・水酸基濃度の増加: 高吸水率 ・熱重量減少温度の低下</p> <p>・低熱膨張化 ・熱伝導率向上</p> <p>・ナノサイズ充填材配合 ・熱伝導率向上</p>	
<p>41 代表的な多官能エポキシ樹脂 YNU 横浜国立大学</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="159 627 367 896"> <p>3官能エポキシ樹脂</p>  <p>トリスフェノールメタン型エポキシ樹脂</p> <p>特殊3官能エポキシ樹脂</p> <p><small>中西啓祐, 電子部品用エポキシ樹脂, シーエスシー (2015)</small></p> </div> <div data-bbox="383 627 606 896"> <p>4官能エポキシ樹脂</p>  <p>テトラフェノールエタン型エポキシ樹脂</p> <p>ナフタレン型エポキシ樹脂</p> <p><small>中西啓祐, 電子部品用エポキシ樹脂, シーエスシー (2015)</small></p> </div> </div>	
<p>42 耐熱性と熱分解温度の関係 YNU 横浜国立大学</p>  <p>5%熱重量減少温度 (°C)</p> <p>ガラス転移温度 Tg (°C)</p> <p>● BPH-EP(60)/PN ● XLK-EP/PN ● OCN-EP(60)/PN ● NCN-EP/PN ● TPM-EP(70)/PN</p> <p><small>中西啓祐, 電子部品用エポキシ樹脂, 山形大学 (2014)</small></p>	
<p>43 水酸基濃度の影響 YNU 横浜国立大学</p> <p>水酸基濃度の増加とともに吸水率は増加</p>  <p>吸湿率 (wt%)</p> <p>硬化物中の水酸基濃度 (wt%)</p> <p>アルキルフェノールノボラック型エポキシ樹脂の硬化物の水酸基濃度と吸湿率の関係</p> <p><small>小塚一朗, 高分子, 57, 621 (2008) より「新規エポキシ樹脂の分子設計による分子構造の最適化」</small></p>	
<p>44 水の影響 ナイロンの吸湿特性 YNU 横浜国立大学</p> <p>ナイロンやポリイミドは湿度による寸法変化有、一方、吸湿はシヤン性向上に寄与</p> <p>85°C/5%RH → 85°C/85%RH 急激加湿</p>  <p>繊維吸湿度 (ppm)</p> <p>加湿時間 (s)</p> <p>ナイロン/GF30</p> <p>ポリアイミド/GF30</p> <p>エポキシ樹脂/GF30</p>	

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

<p>45 水の影響 吸湿によるエポキシ樹脂特性変化 YNU 横浜国立大学</p> <p>吸湿により、耐熱性の低下、強度低下が起こる: 水による可塑化現象</p> <p>ガラス転移温度 (Tg)の低下</p> <p>曲げ強度の低下</p> <p>吸湿条件: 85°C/85%RH, 75wt%シリカ充填エポキシ樹脂 <small>橋 正史, 高分子, 58, 544 (2009) 「重合多環芳香族構造の導入によるエポキシ樹脂の低吸湿化」</small></p>																																	
<p>46 分子構造の多環化による高Tg化 YNU 横浜国立大学</p> <p>多環芳香族構造を有するエポキシ樹脂, ナフタレン, アントラセンのπ-πスタッキングを利用</p> <p>エポキシ樹脂硬化物のガラス転移点と吸湿率の関係 <small>橋 正史, 高分子, 58, 544 (2009) より転写 「重合多環芳香族構造の導入によるエポキシ樹脂の低吸湿化」</small></p>																																	
<p>47 全芳香族ポリアミドの対称性とTg及びTm YNU 横浜国立大学</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>アミン成分</th> <th>酸成分</th> <th>Tg (°C)</th> <th>Tm (°C)</th> <th>製品</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>オルト</td> <td>メタ</td> <td>260</td> <td>300</td> <td rowspan="2">Nomex (DuPont, Toray) コーネックス(帝人)</td> </tr> <tr> <td>メタ</td> <td>メタ</td> <td>270</td> <td>430</td> </tr> <tr> <td>パラ</td> <td>メタ</td> <td>300</td> <td>470</td> <td rowspan="3">Kevlar(DuPont) トワロン(帝人)</td> </tr> <tr> <td>オルト</td> <td>パラ</td> <td>260</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>メタ</td> <td>パラ</td> <td>290</td> <td>470</td> </tr> <tr> <td>パラ</td> <td>パラ</td> <td>520</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	アミン成分	酸成分	Tg (°C)	Tm (°C)	製品	オルト	メタ	260	300	Nomex (DuPont, Toray) コーネックス(帝人)	メタ	メタ	270	430	パラ	メタ	300	470	Kevlar(DuPont) トワロン(帝人)	オルト	パラ	260	300	メタ	パラ	290	470	パラ	パラ	520			
アミン成分	酸成分	Tg (°C)	Tm (°C)	製品																													
オルト	メタ	260	300	Nomex (DuPont, Toray) コーネックス(帝人)																													
メタ	メタ	270	430																														
パラ	メタ	300	470	Kevlar(DuPont) トワロン(帝人)																													
オルト	パラ	260	300																														
メタ	パラ	290	470																														
パラ	パラ	520																															
<p>48 芳香族ポリアミド YNU 横浜国立大学</p> <p>1960年 Du Pont社開発 1965年 実用化</p> <p>「Kapton®」ポリアミド</p> <p>ポリイミドを中心とする一群のポリアミド</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高熱の耐熱性 ・優れた機械特性、電気特性 (高絶縁性、低誘電率、低誘電損失など) ・腐薬品性、耐放射線性 <p>・フィルム、絶縁ワニス、成型品などの形態で</p> <p>・電気・電子機器、各種産業機器、自動車、航空機器等の高性能部品</p> <p>今井, 11外正工実装学会誌, 4(7),2001</p>																																	
<p>49 芳香族ポリアミドのガラス転移点 YNU 横浜国立大学</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>440</td> <td>355</td> <td>340</td> <td>335</td> </tr> <tr> <td>c</td> <td>410</td> <td>—</td> <td>315</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>410</td> <td>285</td> <td>270</td> <td>285</td> </tr> </tbody> </table> <p>今井, 11外正工実装学会誌, 4(7),2001</p>	R	1	2	3	4	a	—	—	—	—	b	440	355	340	335	c	410	—	315	300	d	410	285	270	285								
R	1	2	3	4																													
a	—	—	—	—																													
b	440	355	340	335																													
c	410	—	315	300																													
d	410	285	270	285																													

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

55 高耐熱化、低熱膨張機構

YNU 横浜国立大学

ポリベンゾオキサジン分子構造

ポリベンゾオキサジン/エポキシ変性 1.0/1.0

自由体積の減少

ポリベンゾオキサジン/エポキシ変性 1.0/0.3

電子部品用エポキシ樹脂 一半導体実装材料の最先端技術— 株式会社シーエムシー出版, 監修: 原博昭編, DP7-8, (2015年3月13日)

56 エポキ-シリカナノハイブリッドによる高耐熱

YNU 横浜国立大学

エポキシ樹脂実装構造

実装構造

Akiyo Takahashi, Yuichi Saito, Akira Nagai, Morimichi Umoto, and Yoshiharu Nakamura, IEEE: Intersection on Electronics Packaging Manufacturing, 28(2), 11-17, (2005)

57 代表的な充填材の特徴

YNU 横浜国立大学

	比重	熱伝導率 (W/m·K)	粒子の粒径 (μm)	硬度	誘電率	特徴
結晶シリカ (SiO ₂)	2.7	6-13	5-15	7	3.5-4.5	高熱伝導、角形、型崩れ
非晶シリカ (SiO ₂)	2.2	1.3	0.5	8	3.8	球形、高充填可能、低誘電率
アルミナ (Al ₂ O ₃)	4	36	8.8	12	8.9	高熱伝導、高硬度、型崩れ
窒化アルミ (AlN)	3.3	320	5.6	12	8.8	高熱伝導
窒化ホウ素 (BN)	2.3	110	4.0	-	4.5	高熱伝導、薄片状、低誘電 (高耐圧)

58 主な充填材の製法

YNU 横浜国立大学

1. 天然シリカ

インド、オーストラリア、中国

採掘 → 粗砕 → 水洗 → 乾燥 → 原石

溶剤 → インゴット → 粉砕工程 → 分級工程 → 熔融シリカフィラ

2. 合成シリカ

燃焼法: SiCl₄, H₂, Air → 反応炉 → 捕集機 → 軽燃焼 → 包装機 → 製品

加熱法: 珪砂, コークス, Air → アーク炉 → 捕集機 → 包装機 → 製品

湿式法: 珪酸ソーダ, 硫酸, 塩類 → 反応炉 → ろ過・脱水機 → 乾燥機 → 包装機 → 製品

59 主な充填材の製法 (2)

YNU 横浜国立大学

3. 球状アルミナ

原料 → 火炎溶融法 → 球状アルミナ

4. 窒化アルミ

直接窒化: 2Al + N₂ → 2AlN (1800°C)

還元窒化: Al₂O₃ + 3C + N₂ → 2AlN + 3CO (1800°C)

5. 窒化ホウ素

高ホウ素化合物 (ホウ酸など) → 低純度BN → 高純度BN

高窒素化合物 (尿素など) → 高純度BN

(デンカ資料参考) (東洋アルミ) (トクヤマ) (デンカ)

BN粒子の二次造粒

BN造粒機

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

60 充填材による材料特性の改良
YNU 横浜国立大学

材料要求特性	充填剤と手法	再反特性	解決手法
高熱伝導化による放熱性向上	高熱伝導充填材 Al ₂ O ₃ , 結晶SiO ₂ , AlN, SiN, BN 高充填	・柔軟性低下 ・寸法低下	粒子径分布の最適化による最大充填率の増加
低熱膨張化による熱応力低下 (Si: 4 ppm/°C)	低熱膨張充填材 アモルファスシリカ 高充填	・粘度増加	
低吸水化による半導体パッケージのLiF特性向上	無吸湿充填材 シリカ高充填	・粘度増加	

61 機械特性の最適化～シリカ充填量と物性
YNU 横浜国立大学

Fahmy-Ragai equation of composite

$$E_c = \frac{E_f E_m (1 + \phi \frac{E_f}{E_m})}{1 - \phi \frac{E_f}{E_m}}$$

σ : CTE, ϕ : volume fraction, E : Young's modulus, ν : Poisson's ratio

Ishai-Cohen equation of composite

$$E = E_m \left(1 + \frac{\phi}{(m/(m-1) - \phi^{1/2})} \right)$$

ϕ : Volume fraction, E_m : Young's modulus of resin, E_p : Young's modulus of particle, E : Young's modulus of composite

62 成形性・充填性の改良：低粘度化手法
YNU 横浜国立大学

複合材の粘度式 (Mooneyの粘度式)

$$\ln(\eta/\eta_0) = k_p \phi / (1 - \phi/\phi_m)$$

η : 封止材の粘度, η_0 : 樹脂の粘度, k_p : アインシュタインの係数, ϕ : 充填材の体積分率, ϕ_m : 充填材がとりうる最大充填分率 (粒子径分布により異なる)

低粘度化手法

- η_0 を小さくする→樹脂の低粘度化
- ϕ_m を増やす → 充填材の粒径分布の最適化、計算予測
- k_p を下げる→界面での摩擦低下、形状の均一性

63 粒子径分布の最適化手法例
YNU 横浜国立大学

最大充填分率大きくすることにより、封止材料の粘度が低下

最大充填分率の計算手法例

$$\phi_m = 1 - \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{d_i^3} + \sum_{j=1}^m \frac{w_j}{d_j^3}}$$

ϕ_m : 最大充填分率, D : 数平均粒子径, V_{ij} : 充填剤の粒子体積と樹脂体積の比, D_i^3 : 粒子の粒子径, w_i : 重量分率, ϵ_{ca} : 単位成分の空間率 (=0.32)

64 硬化と流動挙動の解析 (硬化反応)
YNU 横浜国立大学

硬化反応式 (Kamalモデル)

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \alpha^{m-1}) (1 - \alpha)^n$$

α : 反応率, k_1, k_2 : 反応因子, E_1, E_2 : 活性化エネルギー, m, n : 反応次数

封止材料の反応率時間曲線

石井, 水上, 石田, 日立化成テクノリポート, [40], 13(2003)

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

<p>65 硬化と流動挙動の解析 (粘度式) YNU 横浜国立大学</p> <p>せん断速度依存 (Herschel-Bulkleyモデル)</p> $\tau = \frac{\tau_0}{1 + K(\dot{\gamma})^n} + A\dot{\gamma}^m$ <p>τ:せん断応力, $\dot{\gamma}$:せん断速度, τ_0:流動開始せん断応力, K, A, n, m:材料定数</p> <p>温度依存 (Arrhenius式, WLF式)</p> $K(T) = B \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$ $K(T) = K_0 \exp\left(\frac{-C_1(T - T_g)}{C_2 + T - T_g}\right)$ <p>B, E_a:定数, K_0, C_1, C_2:定数, T_g:ガラス転移温度</p> <p>硬化度依存 (Castro-Macoskoモデル)</p> $K_0 = K_{00} \left(\frac{\alpha_{gel}}{\alpha_{gel} - \alpha} \right)^{C_1} \exp\left(\frac{C_2}{\alpha_{gel} - \alpha}\right)$ <p>α_{gel}:ゲル化反応率, C_1, C_2:定数</p> <p>吉井, 水上, 荏司, 日立化成テクニカルレポート, (40), 13(2003)</p>	
<p>66 カップリング剤 YNU 横浜国立大学</p> <p>充填材表面を被覆し、樹脂と反応することで強度を増加</p> <p>加水分解によるシラノール基の生成</p> $R-Si(OCH_3)_3 + 3H_2O \rightarrow R-Si(OH)_3 + 3CH_3OH$ <p>シリカ表面によるシラノール基の生成</p> $R-Si(OH)_3 + HO-充填材 \rightarrow R-Si-O-充填材 + H_2O$ <p>加水分解したシランの自己縮合反応</p> $R-Si(OH)_3 + R-Si(OH)_3 \rightarrow R-Si-O-Si-R + H_2O$ <p>曲げ強度 (MPa) vs 表面積割合 (1, 2)</p> <p>A: 単層, B: 多層</p> <p>基礎有機高分子論文集, 47, 483(1990)</p>	
<p>67 封止材料に用いられる主な難燃剤 YNU 横浜国立大学</p> <p>ハロゲン化合物、ハロゲン化合物と酸化アンチモン</p> <p>ラジカルトラップ効果による、活性OHラジカルの安定化 酸素連鎖効果、脱水素炭化効果</p> $RX \rightarrow R\cdot + \cdot X$ $\cdot X + RX \rightarrow R\cdot + HX$ $HX + \cdot H \rightarrow H_2 + \cdot X$ $HX + \cdot OH \rightarrow H_2O + \cdot X$ <p>リン酸によるラジカルトラップ</p> $P(O)Cl_2 + H_2O \rightarrow H_3PO_4 + 2HCl$ <p>脱水素炭化反応: 脱水による吸熱で燃焼を遅延及び防止</p> <p>水和金属化合物 2Al(OH)₃ → Al₂O₃ + 3H₂O Mg(OH)₂ → MgO + H₂O</p> <p>日本難燃剤協会 HP</p>	
<p>68 樹脂の接着機構と向上策 YNU 横浜国立大学</p> <p>接着性の影響する因子</p> <ul style="list-style-type: none"> ・界面の相互作用 ・機械的及物理効果 ・界面に働く応力 ・汚染など <p>接着性の向上方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・洗浄 <ul style="list-style-type: none"> ・脱脂洗浄 (界面活性剤, 有機溶剤, 酸アルカリ) ・UVオゾン洗浄 (オゾンによる有機物分解、酸化) ・プラズマ照射 ・表面改質 <ul style="list-style-type: none"> ・有機プライマー処理 ・ラジカルカップリング処理、アクリルコポリマー、アゾール処理 ・酸化処理 <ul style="list-style-type: none"> 銅: 塩化鉄 (フロンオキサイド、黒化還元)、CZ処理機 アルミ: 陽極酸化 (硫酸、シュウ酸、リン酸など)、エッチング (水酸化ナトリウム) 	
<p>69 銅と樹脂界面の加熱強度劣化機構 YNU 横浜国立大学</p> <p>WBL: Weak Bond Layer</p> <p>せん断試験後のXPS測定結果 (Cu 2p)</p> <p>劣化初期: Cu⁺とCu⁰界面で割離</p> <p>劣化後: Cu⁺上に銅が付着</p>	

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

<p>70 銅の表面処理による接着性改良 YNU 横浜国立大学</p> <p>接合強度 (MPa)</p> <p>表面粗さ Ra (μm)</p> <p>粗化処理時間(分)</p>	
<p>71 アルマイト・粗化処理による接着強度向上 YNU 横浜国立大学</p> <p>アルマイトの形成、粗化処理によるアンカー効果で樹脂との密着性は向上する 膜中に硫酸、リン酸などの不純物を含む</p> <p>(a) 標準アルマイトA (b) 多孔アルマイトB (c) シュウ酸アルマイト (d) シュウ酸+リン酸アルマイト</p> <p>(e) アルカリエッチング (f) 接合断面</p>	
<p>72 絶縁寿命設計例 YNU 横浜国立大学</p> <p>放電の可能性がある場合(絶縁面にボイドや欠陥を許容しなければいけない場合) 絶縁物の放電による劣化を考慮した寿命設計が必要</p> <p>図1 パッシェン曲線</p> <p>図2 VT寿命線</p>	
<p>73 高耐圧化技術: エポキシマイカナコンポジット U 横浜国立大学</p> <p>オルガノマイカとエポキシ樹脂を界面反応させ剥離することで電気特性向上を期待</p> <p>Epoxy resin / Organophilic / Organic cation</p> <p>Exfoliation</p> <p>層間での反応</p> <p>電気絶縁特性の向上が期待</p>	
<p>74 材料 YNU 横浜国立大学</p> <p>Epoxy resin: (3'-4'-Epoxy)cyclohexyl(methyl) 3'-4'-epoxy)cyclohexane carboxylate (Mw=252.3)</p> <p>Mica: Cation exchange capacity=120meq/100g</p> <p>Intercalant: N,N'-dimethyloctadecylammonium chloride (DMOA)</p> <p>Organophilic</p>	

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

75 XRD結果

エポキシ-オルガノマイカの反応によりマイカ層間距離が増加

エポキシ-オルガノマイカ
 ↓ 2.34° (3.78nm)
 硬化前
 1.02° (8.66nm)
 硬化後 for 180°C (5min)
 硬化後 for 180°C (120min)
 Epoxy resin

76 絶縁性能の改善〜トリー試験

マイカの配合量の増加とともに絶縁寿命が向上

Insulation breakdown time (h)
 Inorganic content (%)
 20KVrms
 5μm
 Interlayer distance: 70nm
 NiCo layer
 TEM: Cured epoxy resin (0.07% inorganic content)

77 種々の物質の熱伝導率

	特徴	熱伝達のしくみ	熱伝導率 (W/mK)
金属	導電体	自由電子	銀: 427 銅: 400 半田: 41
セラミックス	絶縁体	格子振動 (フォノン)	ダイヤモンド: 2000 アルミナ: 30
樹脂			HDPE: 0.5 エポキシ樹脂: 0.1
液体	流体	分子運動	水: 0.6
気体			空気: 0.024

78 高熱伝導化: 高熱伝導化のコンセプト

モノマー
 メソゲン
 ビフェニルタイプ
 硬化
 秩序構造
 高次構造
 共有結合
 アモルファス
 フォノンの散乱小
 高熱伝導性
 専方的高熱伝導材

79 複合材料の熱伝導率

MAXWELL式	金成の式	NIELSEN式
$k_c = \frac{k_f k_m (k_f + 2k_m) + 2k_f^2 k_m}{k_f^2 + k_m(k_f + 2k_m)}$ <p>均質媒体中に球形粒子が分散したモデル</p>	$k_c = \frac{k_f k_m (k_f + 2k_m) + 2k_f^2 k_m}{k_f^2 + k_m(k_f + 2k_m)}$ <p>均質媒体中に粒子が分散したモデル 流動性を有する系 (低充填領域) に適する</p>	$k_c = \frac{k_f k_m (k_f + 2k_m) + 2k_f^2 k_m}{k_f^2 + k_m(k_f + 2k_m)}$ <p>充填材の形状、形状、充填密度を考慮 ・高充填領域に適</p>

■ A5 【パワーモジュール実装材料(封止樹脂)】 石井講師

<p>80 エポキシ複合材の熱伝導率</p> <p>YNU 横浜国立大学</p> <p>高熱伝導材の高充填化で複合材を高熱伝導化</p> <p>熱伝導率 (W/m·K)</p> <p>$\lambda_{resin} = 0.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (従来エポキシ樹脂)</p> <p>$\lambda_{resin} / \lambda_{filler} \text{ (W/m}\cdot\text{K)}$ 0.2 / 150 0.2 / 30 0.2 / 5</p> <p>充填材量 (vol%)</p> <p>合成の式</p> $\lambda_c = \frac{\lambda_r \lambda_f V_r + \lambda_r \lambda_f V_f}{\lambda_r V_r + \lambda_f V_f}$ <p> λ_c: 複合材の熱伝導率 λ_r: 樹脂材の熱伝導率 λ_f: 充填材の熱伝導率 V_r: 樹脂材の体積分率 V_f: 充填材の体積分率 $V_r + V_f = 1$ (総率) (Rule of Mixtures) </p>	
<p>81 封止材料の熱伝導率</p> <p>YNU 横浜国立大学</p> <p>樹脂の高熱伝導化により、少ない充填材量で高熱伝導化</p> <p>熱伝導率 (W/m·K)</p> <p>$\lambda_{resin} = 0.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (従来エポキシ樹脂)</p> <p>$\lambda_{resin} / \lambda_{filler} \text{ (W/m}\cdot\text{K)}$ 0.2 / 150 0.2 / 30 0.2 / 5</p> <p>充填材量 (vol%)</p> <p>熱伝導率 (W/m·K)</p> <p>$\lambda_{filler} = 30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (アルミナ充填材)</p> <p>$\lambda_{resin} / \lambda_{filler} \text{ (W/m}\cdot\text{K)}$ 1 / 30 0.4 / 30 0.2 / 30</p> <p>充填材量 (vol%)</p>	
<p>82</p> <p>YNU 横浜国立大学</p> <p>ご清聴ありがとうございました。</p>	