

■ A6【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】多々見講師

<p>パワーモジュール実装材料 (セラミックス)</p> <p>横浜国立大学 多々見 純一</p>	
<p>自己紹介</p> <p>多々見純一 昭和44年8月14日生まれ(46歳) 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 教授 (理工学部化学・生命系学科) 研究室 環境情報1号棟414号室 内線3959 メール tatami@ynu.ac.jp 専門 セラミックス セラミックスの破壊 セラミックスのプロセス科学 ……まとめると『セラミックスの破壊と創造』 趣味 料理, ハンドボール, 石集め, 子供と遊ぶ 特技 睡眠</p>	
<p>SiCパワーデバイスの構造</p>  <p>絶縁基板への要求</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 高信頼性 ✓ 高熱伝導率 ✓ 高絶縁 ✓ 低コスト <p>➢ SiCパワーチップだけでなく、周辺材料も重要 ➢ 特に、サーマルマネジメント材料の開発が不十分</p>	
<p>セラミックス</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 無機固体材料 <ul style="list-style-type: none"> …有機物以外 = 多様な元素の選択、多様な結晶構造 ⇒ 多様な特性 ✓ 電気的特性(導電性~半導性~絶縁性) ✓ 熱的特性(熱伝導率(0.1~1000W/mK)、熱膨張 1~20/K⁻¹) ✓ 機械的特性(強度、破壊靱性、疲労) ✓ 作製方法にも依存 	
<p>本日の内容</p> <p>SiCパワーモジュールで用いられる絶縁放熱基板用セラミックスの機能と信頼性の発現メカニズムと製造プロセス、および、セラミック基板材料開発の最前線について解説</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ セラミックスプロセスニング ■ セラミックスの特性 <ul style="list-style-type: none"> □ 電気的特性 □ 熱的特性 □ 機械的特性 	

■ A6 【パワーモジュール実装材料（セラミックス）】 多々見講師

<p style="text-align: center;">セラミックスプロセス</p> <table border="1"> <tr> <td>面相法</td> <td>原料粉末調整→配合→混合→成形→乾燥→脱脂 →焼成(焼結)→加工→接合……ファインセラミックス(焼結体)、陶磁器、耐火物</td> </tr> <tr> <td>液相法</td> <td>原料調整→配合→混合→成形→乾燥→加工……ガラス →成形……ガラス、熔融耐火物 →積敷……繊維、粒子、箔材 →引上げ・固化……単結晶 ↓ 溶解→急冷→粉砕→塗布→溶融……ほうろう・厚膜</td> </tr> <tr> <td>気相法</td> <td>気化→蒸着、CVD、真空蒸着、スパッタリング、プラズマ……薄膜、単結晶</td> </tr> </table>	面相法	原料粉末調整→配合→混合→成形→乾燥→脱脂 →焼成(焼結)→加工→接合……ファインセラミックス(焼結体)、陶磁器、耐火物	液相法	原料調整→配合→混合→成形→乾燥→加工……ガラス →成形……ガラス、熔融耐火物 →積敷……繊維、粒子、箔材 →引上げ・固化……単結晶 ↓ 溶解→急冷→粉砕→塗布→溶融……ほうろう・厚膜	気相法	気化→蒸着、CVD、真空蒸着、スパッタリング、プラズマ……薄膜、単結晶	
面相法	原料粉末調整→配合→混合→成形→乾燥→脱脂 →焼成(焼結)→加工→接合……ファインセラミックス(焼結体)、陶磁器、耐火物						
液相法	原料調整→配合→混合→成形→乾燥→加工……ガラス →成形……ガラス、熔融耐火物 →積敷……繊維、粒子、箔材 →引上げ・固化……単結晶 ↓ 溶解→急冷→粉砕→塗布→溶融……ほうろう・厚膜						
気相法	気化→蒸着、CVD、真空蒸着、スパッタリング、プラズマ……薄膜、単結晶						
<p style="text-align: center;">セラミックス(焼結体)の製造工程</p>							
<p style="text-align: center;">ミクロに見ると何が起きている？ 高温焼成…微粒子が接合→表面積が減少=焼結 成形体 1200℃ 1400℃</p> <p>Al₂O₃ 58.5% 83.0% 97.0%</p> <p>比表面積 大 → 小 = 単位重量あたりの表面積 一辺0.1μm = 6 × 10⁻¹⁴m² = 4 × 10⁻¹⁵g = 15m²/g 一辺1mm = 6 × 10⁻⁶m² = 4 × 10⁻³g = 0.0015m²/g</p>							
<p style="text-align: center;">通常の実験用 ボールミル</p> <p style="text-align: center;">遊星ボールミル</p>							
<p style="text-align: center;">各種粉砕・混合方式</p>							

■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師

セラミックスの成形方法					
区分	成形方法	溶媒	粘度	圧力	適用領域
乾式	・金型成形(一輪成形) ・冷間静水圧 (CSP) 成形(圧入パルス)	少	高	高	・単独形状 ・パイプ状、球状 ・典型例: 自動車用点火プラグ
塑性	・ロクロ成形 ・押出成形 ・射出成形	多	低	低	・円筒状、皿、つぼ ・棒状、パイプ状、ハニカム ・ターボロータ、小型複雑形状
練込	・泥押成形 ・加圧射込 ・面転射込	多	低	低	・複雑形状・薄肉 ・複雑形状・薄肉 ・円筒状
テープ (シート)	・ドクターブレード法	多	低	低	・シート状製品(基板、パッケージ、積層コンデンサ)

押出成形

セラミック原料
押出し
切断

「本講座でセラミックスの作りかたを教えます」
日本学術振興会特別研究員(国際共同) 藤田 浩二先生

ドクターブレード法

スラリー
ドクターブレード
グリーンシート
フィルム
キャリアテープベルト

スラリーを一定の厚みでフィルム上に成形
セラミックス基板や積層コンデンサなどの電子部品用の薄い試料の成形に適した手法

ドクターブレード法の特徴

成形体(グリーンシート)の厚さ
・・・数十μmから1mm程度まで

最近では、厚さ1μm

ドクターブレードの高さ、スラリーの粘度、フィルムの送り速度などで制御

可塑性やスラリーに応力が作用しながら成形

- ⇒ 粒子配向などの方向性
- ⇒ 焼成時に不均一な焼結収縮

焼結

セラミックスの大部分

焼成工程で微細な粉末を焼結することにより作製

焼結 = 接触状態の粒子をその融点以下の温度に保持したとき、粒子系全体の表面エネルギーが減少する方向へ物質が移動する現象

⇒ 粒子の接触部が結合して強固になる必要に応じて緻密化する

■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師

欠陥と拡散

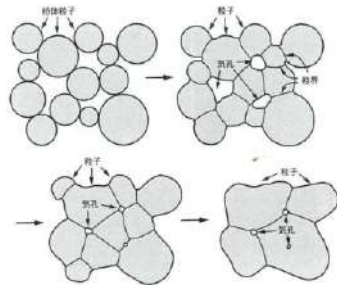
焼結には物質移動が起こる必要有り

固相反応における物質移動

拡散 (or 蒸発凝縮)

... 空孔の生成
 拡散係数が大

粉体から焼結体への過程における構造形成



固相焼結における物質移動

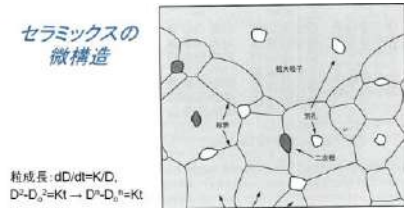
$x/r = Kt^{1/3}$, $\Delta L/L_0 = Kt^{1/3}$, ($\Delta L/L_0$: 収縮率, x : ネット半径, r : 粒子半径, t : 等温焼成時間, K : 定数)

焼結機構	m	n	定数	研究者
表面拡散	1/3	-	無	Kuczynski
粒界拡散	1/5	2/5	有	Ringier
体積拡散	1/5	1/5	有	Coble
蒸発凝縮	1/3	-	無	Kuczynski

m, n はそれぞれ、 x の成長速度が x^m 及び、 L の成長速度が L^n であることに由来する。また定数は、 x の成長速度と L の成長速度の比が異なるためこの中に入れた。

2等次法モデルによる焼結の物質移動経路 固相焼結モデルによる焼結経路

セラミックスの微構造



粒成長: $dD/dt = K/D$
 $D^2 - D_0^2 = Kt \rightarrow D^2 - D_0^2 = Kt$

- 原料不純物、粒径と粒度分布、不均一混合、造粒の不備 (バインダが表面へ移動、中空顆粒、き裂欠陥等)
- 焼結過程での緻密化不十分、粒成長先行、表面あれ・変質、組織の不均質、異常粒成長
- 加工傷、変質

Si₃N₄の自己拡散係数

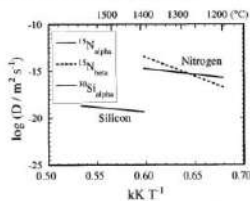


Fig. 7. Silicon and nitrogen diffusion coefficients in Si₃N₄ as a function of temperature.

Al₂O₃などより数桁低い
 = 単独での焼結は不可能

■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師

液相焼結 ... 液相を利用した焼結

被焼結物	焼結助剤
TiC	Ni
ZrC	Ni
WC	Co
ZnO	Bi ₂ O ₃ -CoO
SiC	Y ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃
AlN	Y ₂ O ₃



Si₃N₄の焼結助剤

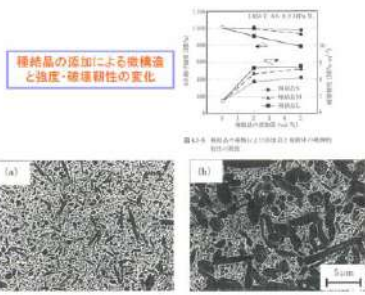
- | | |
|---|---|
| Y ₂ O ₃ | MgO |
| Y ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ |
| Y ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -AlN | MgO-Al ₂ O ₃ |
| Y ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -AlN | Al ₂ O ₃ -AlN |
| Y ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -MgO | Yb ₂ O ₃ |
| Y ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -MgO-ZrO ₂ | Lu ₂ O ₃ |
| Y ₂ O ₃ -MgO-ZrO ₂ | CeO ₂ -MgO-SrO |
| Y ₂ O ₃ -SiO ₂ | CeO ₂ -MgO-SrO |
| Y ₂ O ₃ -Cr ₂ O ₃ | CeO ₂ -Al ₂ O ₃ -SrO |
| Y ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ -AlN | BeAl ₂ O ₄ |
| Y ₂ O ₃ -AlN-HfO ₂ | |
| Y ₂ O ₃ -AlN-ZrO ₂ | |
| Y ₂ O ₃ -CeO ₂ -MgO | など |

Si₃N₄セラミックスの微構造



粒子の形状、寸法
 粒界ガラス相 焼結助剤・焼成条件に依存
 第二相

Si₃N₄セラミックスの 微構造に依存
 機械的特性 = 原料粉体・焼結助剤・
 焼成条件に依存



■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師

<p>柱状種結晶添加テープ成形による配向粒成長</p> <p>図4-3-4 SiCテープ成形・結晶成長制御による配向粒成長効果 (左) SiCテープ成形前、(右) 制御後</p> <p>図4-3-5 SiCテープ成形・結晶成長制御による配向粒成長効果の特性 (左) 熱伝導率、(右) 熱膨張係数</p> <p>(Hirao et al.)</p>																																									
<p>本日の内容</p> <p>SiCパワーモジュールで用いられる絶縁放熱基板用セラミックスの機能と信頼性の発現メカニズムと製造プロセス、および、セラミック基板材料開発の最前線について解説</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ セラミックスプロセッシング ■ セラミックスの特性 <ul style="list-style-type: none"> □ 電気的特性 □ 熱的特性 □ 機械的特性 																																									
<p>セラミックスの特性</p> <p>無機材料の特性は何で決まるか</p> <p>秩序構造 構成する原子とその配列 = 化学結合と結晶構造</p> <p>+</p> <p>非秩序構造 欠陥と微構造 = 点欠陥(空孔、不純物・・・) 線欠陥(転位)、面欠陥(積層欠陥) ... 粒子径、粒界、第二相など</p>																																									
<p>代表的な基板用セラミックスの物性と特性比較</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>Al₂O₃</th> <th>AlN</th> <th>Si₃N₄</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>結晶構造</td> <td>六方晶(コランダム)</td> <td>六方晶(ウルツァイト)</td> <td>六方晶(α, β)</td> </tr> <tr> <td>格子定数(nm)</td> <td>a=0.475900 c=1.298900</td> <td>a=0.31127 c=0.49816</td> <td>α: a=0.3759 c=0.5623 β: a=0.3759 c=0.2909</td> </tr> <tr> <td>イオン性</td> <td>0.6</td> <td>0.43</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>密度(g/cm³)</td> <td>3.99</td> <td>3.26</td> <td>α: β</td> </tr> <tr> <td>融点/分解温度(°C)</td> <td>2050(融点)</td> <td>2200-2400(分解)</td> <td>1830-1900(分解)</td> </tr> <tr> <td>熱伝導率(W/mK) (計算値)</td> <td>60</td> <td>320</td> <td>α: 105-226, β: 170-450</td> </tr> <tr> <td>熱膨張係数(K⁻¹)</td> <td>7.8-8.1</td> <td>4.3</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>電気抵抗(Ωcm)</td> <td>>10¹⁴</td> <td>>10¹⁴</td> <td>>10¹⁴</td> </tr> <tr> <td>弾性率(GPa)</td> <td>350-400</td> <td>280</td> <td>320</td> </tr> </tbody> </table>	項目	Al ₂ O ₃	AlN	Si ₃ N ₄	結晶構造	六方晶(コランダム)	六方晶(ウルツァイト)	六方晶(α, β)	格子定数(nm)	a=0.475900 c=1.298900	a=0.31127 c=0.49816	α: a=0.3759 c=0.5623 β: a=0.3759 c=0.2909	イオン性	0.6	0.43	0.30	密度(g/cm ³)	3.99	3.26	α: β	融点/分解温度(°C)	2050(融点)	2200-2400(分解)	1830-1900(分解)	熱伝導率(W/mK) (計算値)	60	320	α: 105-226, β: 170-450	熱膨張係数(K ⁻¹)	7.8-8.1	4.3	3.0	電気抵抗(Ωcm)	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	弾性率(GPa)	350-400	280	320	
項目	Al ₂ O ₃	AlN	Si ₃ N ₄																																						
結晶構造	六方晶(コランダム)	六方晶(ウルツァイト)	六方晶(α, β)																																						
格子定数(nm)	a=0.475900 c=1.298900	a=0.31127 c=0.49816	α: a=0.3759 c=0.5623 β: a=0.3759 c=0.2909																																						
イオン性	0.6	0.43	0.30																																						
密度(g/cm ³)	3.99	3.26	α: β																																						
融点/分解温度(°C)	2050(融点)	2200-2400(分解)	1830-1900(分解)																																						
熱伝導率(W/mK) (計算値)	60	320	α: 105-226, β: 170-450																																						
熱膨張係数(K ⁻¹)	7.8-8.1	4.3	3.0																																						
電気抵抗(Ωcm)	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴																																						
弾性率(GPa)	350-400	280	320																																						
<p>電気的特性</p> <p>電子伝導性</p> <p>電流密度 $J(A/m^2) = \text{導電率 } \sigma(S/m) \times \text{電界 } E(V/m)$</p> <p>導電率 $\sigma(S/m) = (\text{体積抵抗率 } \rho(\Omega m))^{-1}$ $= \text{キャリア濃度 } n(1/m^3) \times \text{電荷 } (A \cdot s) \times \text{移動度 } \mu(m^2/Vs)$</p> <p>導電率はキャリア濃度と移動度に依存 ... 固体中の電子状態に関する情報が重要</p>																																									

■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師

固体中の電子軌道エネルギー

孤立した原子…電子は離散した特有のエネルギーの軌道に存在
 分子…電子軌道の重なり→結合性軌道と反結合性軌道を生成
 固体…さらに多数のエネルギー準位
 →あるエネルギー幅の中に無限の軌道が入ったバンドが形成

バンド構造

電子…エネルギーの低い軌道から占有

伝導帯 = 価電子帯の上位の空あるいはごく一部のみ電子で占有されたバンド

バンドギャップ = 軌道が存在しないエネルギー範囲

フェルミ準位 = 電子の占有と非占有の境界を意味するエネルギー

価電子帯 = 占有軌道からなるバンドで最も高い位置にあるもの

金属・絶縁体・半導体

電子伝導キャリア…伝導帯にある電子および価電子帯にある正孔
 不純物や結晶中の格子欠陥→不純物準位を生成

電気絶縁性 = 大きなバンドギャップ

セラミックスのバンドギャップ

物質	バンドギャップ (eV)
Si	1.11
SiC	2.86
AlN	6.3
ダイヤモンド	5.5
Al ₂ O ₃	6.04
Si ₃ N ₄	5
SiO ₂	9

セラミックスの絶縁性

各種希土類酸化物でSi₃N₄セラミックスを作製
 = 粒界ガラスや第二相が異なる

■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師

熱伝導

単位時間あたりに単位断面積を横切る熱エネルギー
 ...温度勾配に比例(フィックの第一法則に類似)
 フーリエの法則

$$J_Q = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \quad \kappa: \text{熱伝導率}$$

固体中で熱輸送するもの(キャリア)
 電子、光子、フォノン...
 特に、反磁性の絶縁体ではフォノン伝導が重要
 =フォノンという粒子が運動して熱を運ぶと考える

熱伝導率の具体例

単位 W/mK

物質	熱伝導率	物質	熱伝導率
Fe	50	MgO	60
Al	238	ガラス	2
Cu	403	Al ₂ O ₃	20
ダイヤモンド	900-2000	Si ₃ N ₄	15-170
AlN	60-170	ポリエチレン	3
BeO	260	ポリスチレン	1
SiC	270	PMMA	2

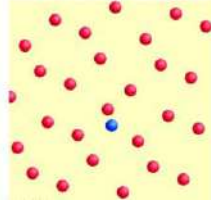
物質によって熱伝導率が大きく異なる

熱伝導率

気体の分子運動論における表現を用いて考える。
 物質全体の熱伝導
 ...それぞれのキャリアからの寄与が加法的であると仮定

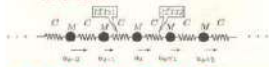
$$\kappa = \sum \kappa_i = \frac{1}{3} \sum C_i v_i l_i$$

C_i : キャリア*i*の単位体積あたりの熱容量
 v_i : キャリア*i*の速度
 l_i : キャリア*i*の平均自由行程



格子振動とフォノン

固体 原子の集合体=原子同士が結合+原子は振動
 熱エネルギーによって励起
 ある原子の動きは隣の原子に影響を及ぼす
 ...格子振動



フォノン 量子化された格子振動
 量子力学...粒子は波動としての性質を持つ
 例)光=波であり光子
 この考えを格子振動に適用
 =結晶格子を伝わる波を『粒子』として捉える

比熱容量

$$C_V = 9R \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx$$

デバイ温度 $\theta_D = \frac{\hbar \omega_{max}}{k_B}$ 1次元結晶では $\omega = vK = \sqrt{\frac{C}{M}} Ka$

音速が高いものor軽元素、ばね定数(イオン結晶では原子価)が大きいものはデバイ温度が大きい


高温では、 $C_V \approx 3R$

低温では、 $C_V = \frac{12\pi^4}{5} R \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3$

■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師

フォノンの群速度

結晶中のフォノン全体
 ...様々な波数を持つ波の重ね合わせ
 熱伝導
 重ね合わせた波(=波束)の移動が重要
 群速度...波束の動く速さ



$$v_L = \sqrt{\frac{C}{M}} a \propto a \theta_D \quad \text{群速度はデ바이温度に比例}$$

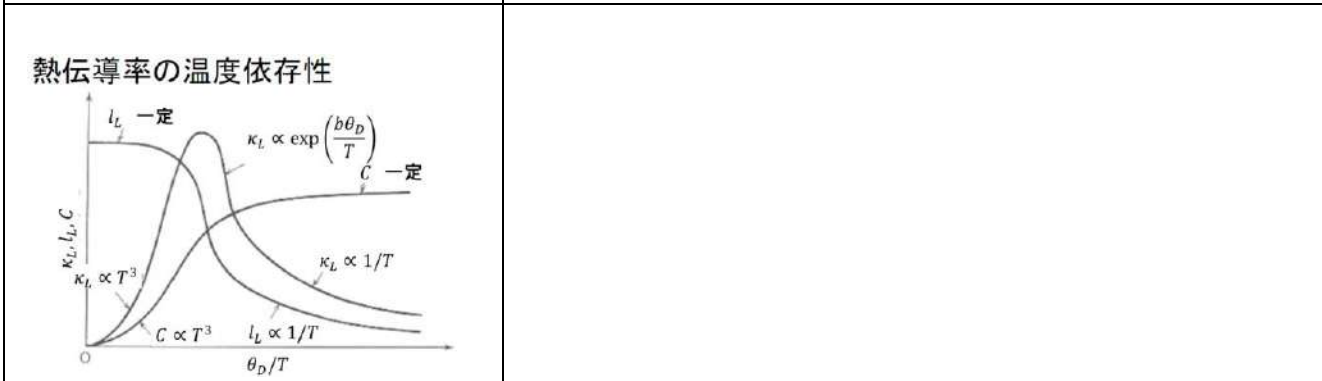
フォノンの平均自由行程

調和振動子... $l_L = \infty$ 熱伝導率 ∞
 実際には、結晶の不完全性(同位元素、不純物原子、空孔、転位、面欠陥など)および非調和ポテンシャルに依存して有限の値になる。
 非調和ポテンシャル...フォノン間に相互作用
 ⇒波数ベクトルの衝突⇒フォノン散乱が生じる
 高温では 低温では

$$l_L = v_L \tau_L \propto \frac{a \theta_D^2}{T} \quad l_L = \exp\left(\frac{b \theta_D}{T}\right)$$

構成原子の平均質量が小さい
 原子間距離が小さい
 結合強度が高い

熱伝導率 大



高熱伝導性物質

物質	熱伝導率(W/mK)	結晶構造
ダイヤモンド	2000	ダイヤモンド型
黒鉛	2000	黒鉛型
cBN	1300	閃亜鉛型
β-SiC	490	閃亜鉛型
BeO	370	ウルツ鉱型
BP	350	閃亜鉛型
AlN	320	ウルツ鉱型
Si ₃ N ₄	α:105/225 β:170/450	六方晶型
BeS	300	閃亜鉛型
GaN	170	ウルツ鉱型
AIP	130	閃亜鉛型
GaP	100	閃亜鉛型
Al ₂ O ₃	60	コランダム型

高熱伝導性物質の理論熱伝導率及び実験熱伝導率データ

物質名	理論熱伝導率 W/mK	熱伝導率データ(実験及び計算による)		
		単結晶	多結晶	ファイバー/粉末*
カーボンナノチューブ	3000	—	—	—
ダイヤモンド	2000	1020-900	400-230	10
c-BN	1500	—	260-60	7-5
h-BN	400†	—	150-20	40-12
SiC	800†	400-320	270-100	12-7
AlN	320	285-200	270-120	19
Si ₃ N ₄	320†	180	150-20	9-8
Al ₂ O ₃	47	43-25	30-0	8
SiO ₂	10	7-3	4-0.5	3

データ: Slack et al., J. Phys. Chem. Solids, 44, 941 (1983); MRS Bulletin, June Issue 2001等から引用
 † 理論値に由来し、強い温度依存性を示す。
 * ファイバー/粉末: 粉末は熱伝導率測定をレーザー法により測定し、結果を修正して熱伝導率を得た。

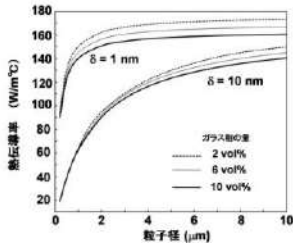
資料出典: 熱伝導率測定法(第2版)に収録のデータ(2005年) 株式会社 日本科学出版社

■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師

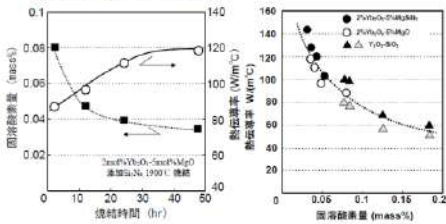
<p>セラミックスの熱伝導率に及ぼす因子</p> <p>結晶の不完全性 → フォノンを散乱 ⇒ 熱伝導率を低減</p>	
<p>AlNの構造内酸素と熱伝導率の関係</p> <p>Figure 2.28 Results of two advanced analytical methods, electron microprobe and secondary ion mass spectrometry (SIMS) verify the optical size oxygen concentration in the AlN lattice has an 8% thermal conductivity. (Fisher, G.E., Knudsen, A.K., Tink, L.C. and Choudhary, A., Measurements of the oxygen and vacancy distribution in polycrystalline aluminum nitride with secondary ion mass spectrometry, J. Am. Ceram. Soc., 78(12), 3215-24, © 1995. Reprinted by permission of the American Ceramic Society, Westerville, OH.)</p>	
<p>AlN-Y₂O₃系焼結体の高熱伝導化プロセス</p>	
<p>Si₃N₄の理論熱伝導率</p> <p>Haggerty... 純粋なβ-Si₃N₄で200~300W/mK 渡利... 最大400W/mK 廣崎... MD計算でα<β β-Si₃N₄: a軸170W/mK, c軸450W/mK</p> <p>単結晶での実験</p>	
<p>Si₃N₄セラミックスの熱伝導率と焼結助剤</p> <p>熱伝導率低減させる焼結助剤 ... Al₂O₃ AlとOがSi₃N₄に固溶してSiAlONを形成 ⇒ フォノン散乱大</p> <p>β-Si₃N₄の粒成長 ... 粒成長に伴うSi₃N₄粒子内の不純物 量低減+ガラス相の影響低減</p>	

■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師

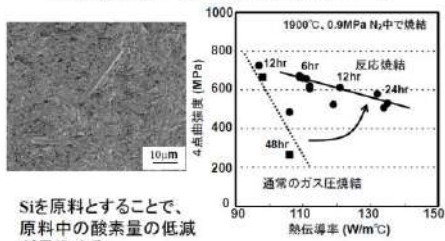
Si₃N₄セラミックスの熱伝導率に及ぼす粒径の影響(計算)



固溶酸素の影響



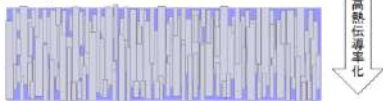
反応焼結による高熱伝導率化



YNUでの取り組み 例
c軸配向Si₃N₄セラミックス

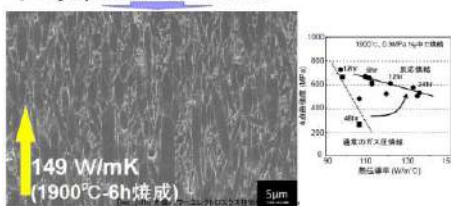
β-Si₃N₄柱状粒子
 熱伝導率: 柱状粒子軸方向(c軸方向)
 > 径方向(ab軸方向)

配向構造



磁場配向

絶縁基板・・・板厚方向に放熱
 = c軸を板厚方向に配向⇒高熱伝導率化
 β-Si₃N₄種粒子+回転磁場



■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師

熱膨張とは・・・

温度上昇に伴って体積が増加する現象
 材料の温度特性や熱衝撃抵抗の観点から重要
 例えば、電気容量の温度依存性にも影響

熱膨張係数

体積熱膨張係数 線熱膨張係数 等方体ならば

$$\alpha_p = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad \beta_p = \frac{1}{L} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_p \quad \alpha_p = 3\beta_p$$

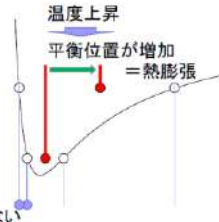
熱膨張係数の具体例(室温) ×10⁻⁶K

物質	線熱膨張係数	物質	線熱膨張係数
Fe	11.8	MgO	10
Al	23.1	NaCl	40
Cu	16.5	Al ₂ O ₃	8
ダイヤモンド	1.4	Si3N4	3
Si	3.2	エポキシ樹脂	40~50
Ge	5.6	ポリエチレン	100
SiC	5.4	空気	3333

なぜ物質によって熱膨張係数が異なるのか

熱膨張の起源

格子振動の非調和性
 原子が振動する際の復元力
 変位に比例しない
 例: $F = -ax + bx^2 + cx^3$
 ポテンシャルエネルギーが
 変位に対して非対称
 非対称性の度合い
 ...温度に対して一律ではない
 =熱膨張係数は温度にも依存



熱膨張と比熱容量

線熱膨張係数 $\beta_1 = \frac{3k}{2ar_e D_e} \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 g_1(x) \quad g_1(x) = \int_0^x \frac{y^4 e^y}{(e^y - 1)^2} dy$

熱膨張係数は温度とデバイ温度に依存

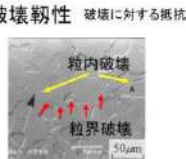
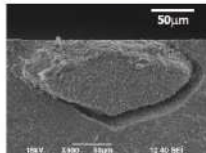
β_p は C_v と同じ形式 =同じ温度依存性
 低温 T^3 に比例
 高温 一定に収束
 =同じデバイ温度依存性
 軽元素、
 結合半径小、
 結合強度大、
 ⇒熱膨張係数小

機械的特性


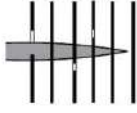

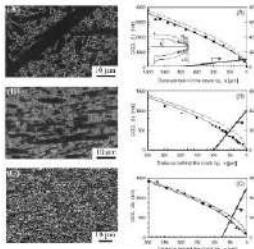
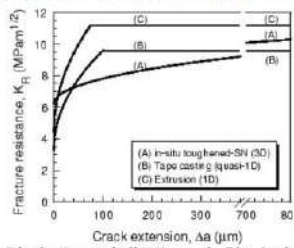
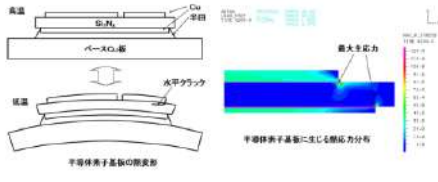
セラミックス=脆性固体

強度 $\rightarrow \sigma_f = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi c}}$

欠陥寸法



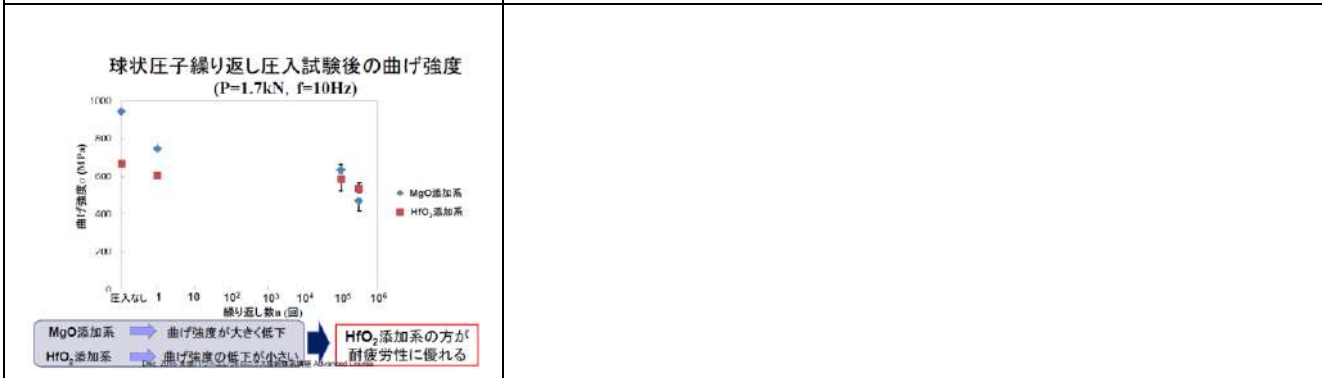
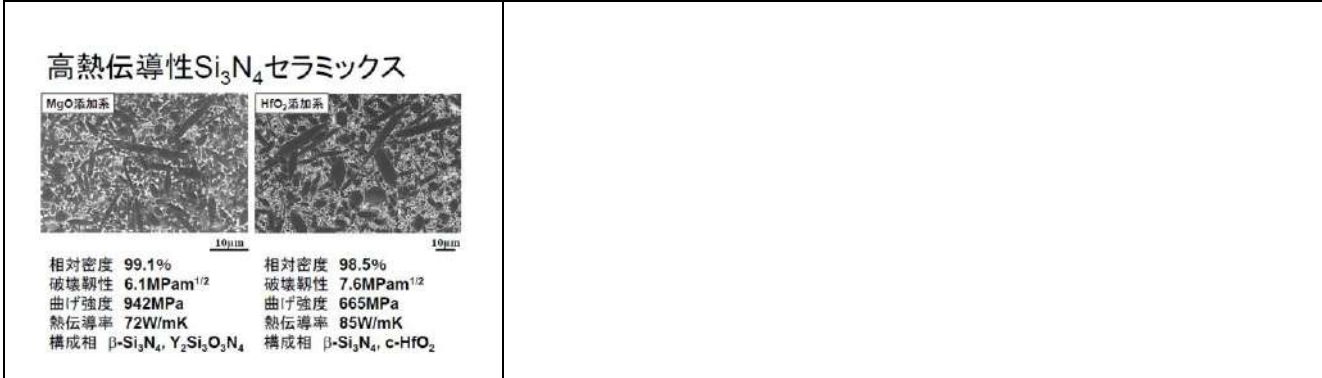
■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師

<p>セラミックスの高靱化メカニズム</p> <p>き裂の偏向 相転移、転位、マイクロクラック</p>  <p>長繊維による き裂面架橋</p>  <p>粒子(特に柱状粒子)による き裂面架橋やインターロッキング</p> 																	
<p>セラミックスの破壊靱性</p> <table border="1" data-bbox="172 633 604 893"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>破壊靱性 / MPam^{1/2}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Si</td> <td>1.5~2</td> </tr> <tr> <td>SiC</td> <td>2~5</td> </tr> <tr> <td>AlN</td> <td>3~3.5</td> </tr> <tr> <td>ダイヤモンド</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Al₂O₃</td> <td>3~5</td> </tr> <tr> <td>Si₃N₄</td> <td>5~10</td> </tr> <tr> <td>SiO₂</td> <td>1~2</td> </tr> </tbody> </table>	材料	破壊靱性 / MPam ^{1/2}	Si	1.5~2	SiC	2~5	AlN	3~3.5	ダイヤモンド	10	Al ₂ O ₃	3~5	Si ₃ N ₄	5~10	SiO ₂	1~2	
材料	破壊靱性 / MPam ^{1/2}																
Si	1.5~2																
SiC	2~5																
AlN	3~3.5																
ダイヤモンド	10																
Al ₂ O ₃	3~5																
Si ₃ N ₄	5~10																
SiO ₂	1~2																
<p>Si₃N₄セラミックスの破壊靱性</p> <p>き裂の偏向、き裂面架橋</p>  <p>柱状粒子 ⇒架橋応力発生 ⇒き裂開口を抑制 ⇒破壊靱性向上 架橋応力の大きさと影響範囲 ……柱状粒子の大きさ、存在量に依存</p>																	
<p>き裂進展抵抗曲線</p> <p>破壊靱性がき裂長さの増加と共に増加</p>  <p>高強度化 = 高靱化 + 欠陥寸法の低減</p>																	
<p>熱サイクルにより生じる応力</p>  <p>高温 低温 Cu 半田 ペースト 水平クラック 半導体素子基板の膨張形 半導体素子基板に生じる熱応力分布 最大主応力</p>																	

■ A6【パワーモジュール実装材料（セラミックス）】多々見講師

<p>基板の耐久性</p> <p>水平クラックの進展状況(基板単位)</p> <p>Cu-AlN基板 (△) (ヒートサイクル数)</p> <p>Cu-AlN基板 (□) (ヒートサイクル数)</p> <p>Cu-Si₃N₄基板 (○) (ヒートサイクル数)</p> <p>ヒートサイクル回数</p> <p>水平クラックの進展</p> <p>ヒートサイクル条件: 400 × 30min (1) × 10min → (2) × 30min → (3) × 10min (繰り返し) 水平クラック発生 (水平クラックが最も多い) 各試験の断面 (試験の全長) × 10 100倍の拡大</p>	
<p>ファインセラミックス基板の熱疲労試験方法 JIS R1692</p> <p>■ 適用範囲 主にパワーモジュール用ファインセラミックス基板の熱疲労特性を評価するための試験方法</p> <p>適用範囲 主にパワーモジュール用ファインセラミックス基板の熱疲労特性を評価するための試験方法</p> <p>図1-試験片の形状及び寸法</p>	
<p>3000サイクル = 1500時間 = 63日 材料開発には不向き??</p> <p>図1-残存強度比-熱サイクル数プロット図</p>	
<p>基板に作用する応力</p> <p>水平クラック</p> <p>図1-残存強度比-熱サイクル数プロット図</p> <p>図2-基板に作用する応力</p> <p>図3-基板に作用する応力</p> <p>図4-基板に作用する応力</p> <p>図5-基板に作用する応力</p> <p>図6-基板に作用する応力</p> <p>図7-基板に作用する応力</p> <p>図8-基板に作用する応力</p> <p>図9-基板に作用する応力</p> <p>図10-基板に作用する応力</p> <p>図11-基板に作用する応力</p> <p>図12-基板に作用する応力</p> <p>図13-基板に作用する応力</p> <p>図14-基板に作用する応力</p> <p>図15-基板に作用する応力</p> <p>図16-基板に作用する応力</p> <p>図17-基板に作用する応力</p> <p>図18-基板に作用する応力</p> <p>図19-基板に作用する応力</p> <p>図20-基板に作用する応力</p> <p>図21-基板に作用する応力</p> <p>図22-基板に作用する応力</p> <p>図23-基板に作用する応力</p> <p>図24-基板に作用する応力</p> <p>図25-基板に作用する応力</p> <p>図26-基板に作用する応力</p> <p>図27-基板に作用する応力</p> <p>図28-基板に作用する応力</p> <p>図29-基板に作用する応力</p> <p>図30-基板に作用する応力</p> <p>図31-基板に作用する応力</p> <p>図32-基板に作用する応力</p> <p>図33-基板に作用する応力</p> <p>図34-基板に作用する応力</p> <p>図35-基板に作用する応力</p> <p>図36-基板に作用する応力</p> <p>図37-基板に作用する応力</p> <p>図38-基板に作用する応力</p> <p>図39-基板に作用する応力</p> <p>図40-基板に作用する応力</p> <p>図41-基板に作用する応力</p> <p>図42-基板に作用する応力</p> <p>図43-基板に作用する応力</p> <p>図44-基板に作用する応力</p> <p>図45-基板に作用する応力</p> <p>図46-基板に作用する応力</p> <p>図47-基板に作用する応力</p> <p>図48-基板に作用する応力</p> <p>図49-基板に作用する応力</p> <p>図50-基板に作用する応力</p> <p>図51-基板に作用する応力</p> <p>図52-基板に作用する応力</p> <p>図53-基板に作用する応力</p> <p>図54-基板に作用する応力</p> <p>図55-基板に作用する応力</p> <p>図56-基板に作用する応力</p> <p>図57-基板に作用する応力</p> <p>図58-基板に作用する応力</p> <p>図59-基板に作用する応力</p> <p>図60-基板に作用する応力</p> <p>図61-基板に作用する応力</p> <p>図62-基板に作用する応力</p> <p>図63-基板に作用する応力</p> <p>図64-基板に作用する応力</p> <p>図65-基板に作用する応力</p> <p>図66-基板に作用する応力</p> <p>図67-基板に作用する応力</p> <p>図68-基板に作用する応力</p> <p>図69-基板に作用する応力</p> <p>図70-基板に作用する応力</p> <p>図71-基板に作用する応力</p> <p>図72-基板に作用する応力</p> <p>図73-基板に作用する応力</p> <p>図74-基板に作用する応力</p> <p>図75-基板に作用する応力</p> <p>図76-基板に作用する応力</p> <p>図77-基板に作用する応力</p> <p>図78-基板に作用する応力</p> <p>図79-基板に作用する応力</p> <p>図80-基板に作用する応力</p> <p>図81-基板に作用する応力</p> <p>図82-基板に作用する応力</p> <p>図83-基板に作用する応力</p> <p>図84-基板に作用する応力</p> <p>図85-基板に作用する応力</p> <p>図86-基板に作用する応力</p> <p>図87-基板に作用する応力</p> <p>図88-基板に作用する応力</p> <p>図89-基板に作用する応力</p> <p>図90-基板に作用する応力</p> <p>図91-基板に作用する応力</p> <p>図92-基板に作用する応力</p> <p>図93-基板に作用する応力</p> <p>図94-基板に作用する応力</p> <p>図95-基板に作用する応力</p> <p>図96-基板に作用する応力</p> <p>図97-基板に作用する応力</p> <p>図98-基板に作用する応力</p> <p>図99-基板に作用する応力</p> <p>図100-基板に作用する応力</p>	
<p>くり返し圧子圧入試験と曲げ強度</p> <p>■ 降伏応力 $P_V/\pi a^2$ 軸受への応用がなされている Si_3N_4セラミックスに適用----</p> <p>■ き裂発生臨界応力 $P_C/\pi a^2$</p> <p>Sample A: $P_V=1.15N$, $P_C=1.15N$</p> <p>Sample B: $P_V=1.15N$, $P_C=1.15N$</p> <p>Hertzian stress / GPa</p> <p>圧子圧入試験後の残留強度 ... 3点曲げ試験</p>	

■ A6 【パワーモジュール実装材料 (セラミックス)】 多々見講師



■ A6【パワーモジュール実装材料（セラミックス）】多々見講師

<p>おわりに</p> <p>無機基板材料の基礎と、特に最近注目されているいくつかのセラミックスについて概説した。セラミックスと言っても、プロセス、微構造などによってその特性は様々である。今後、高強度と高熱伝導率化の両立を目指して、さらに材料の研究開発は進んでいくと思われる。</p>	