

# 黒鉛垂直配向の熱伝導シート

(2011 年～現在)

Thermal Interfacial Material (TIM) は半導体パッケージにおいて発熱体と放熱体の間を接続し、集積回路が発する熱を効率的に系外に逃がすための伝熱経路を構築する材料である。その用途から高い伝熱特性に加えて上下部材の反りに対する追従性・耐久信頼性が求められる TIM には、アルミナなどの高熱伝導フィラーを軟質マトリクス樹脂に分散させた熱伝導グリースやシートが広く用いられている。昨今の大型化・高消費電力化が進む半導体パッケージにおいて、TIM に対する機能要求もますます厳しくなるが、本稿ではその解決一例として現在上市されている、黒鉛フィラーを軟質樹脂中に垂直配向させることで高い熱伝導率と反り追従性を実現した熱伝導シートを紹介する。

## 1. 製品適用分野

半導体パッケージ<sup>注1</sup> (スマートフォン、家庭用パソコン、家電機器、サーバーなどの電子機器に搭載される CPU や GPU などの集積回路を運用する機能単位)

## 2. 適用分野の背景

IoT・5G などの高速通信技術、高度な自動運転 (ADAS)、生成 AI など高度情報社会の発展は、基盤となる半導体技術の歩みに支えられている。集積回路である IC チップと周辺部材で組み上げられる半導体パッケージは、相互配線・電力供給・環境からの保護・放熱などの機能体が付与された単位モジュールであり、サーバーやデータセンターなどの先端分野を中心に今後ますます肥大する大型化・高消費電力化に対応するべく、熱マネジメント設計の重要性が増してきている。

パッケージを構成する要素において、熱源である IC チップからヒートシンクに至るまでの部材間の熱接触を高めるために使用する材料を Thermal Interfacial Material (TIM) と呼ぶ。TIM に求められる機能特性としては、高い伝熱特性のみならず、実装・運用時の温度変化で生じるパッケージ部材の反りに追従する柔軟性があげられる。伝熱特性と柔軟性は本質的にトレードオフの関係にあり、他方を損なわずに両特性を保持・伸長させていくことが材料開発の重要なポイントとなる。

## 3. TIM の特徴

TIM は対象パッケージや目的・用途に応じて熱伝導グリースや熱伝導シートまたは金属インジウムなどさまざまなタイプが存在する。その中で幅広く使用される熱伝導グリースやシートは、一般的に伝熱特性向上のためにアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) や酸化亜鉛

( $\text{ZnO}$ ) などの高熱伝導セラミックスフィラー<sup>注2</sup> を樹脂に分散させたコンポジット材料である。

また TIM はパッケージ中の挿入部位によって細分化される。図 1 に示すヒートスプレッド<sup>注3</sup> 付きのパッケージにおいては、IC チップとヒートスプレッド間に挿入される用途は TIM1、ヒートスプレッドとヒートシンクの間に挿入される用途は TIM2 と分類され、一方ヒートスプレッドレス型のパッケージにて IC チップとヒートシンクを直接熱接合する用途は TIM1.5 と呼ばれる。従来 IC チップに直接接続する TIM1 や TIM1.5 に対しては対象を破壊しない低圧実装条件での密着可能かつ最小厚みで伝熱特性を発揮できる熱伝導グリース型が用いられ、一方 TIM2 に対してはある程度の厚みを有するためにパッケージ部材の反りに対する追従性・耐久信頼性を担保できる熱伝導シートが用いられてきた。

しかし近年のパッケージの大型化・高消費電力化により、TIM1 用途においてセラミックスフィラー分散タイプのグリース型では伝熱特性の不足、また接触面積の増大に伴う IC チップ/ヒートスプレッドとの剥離が問題となっている。高熱伝導フィラー分散系のコンポジット材料ではフィラーの充填率を上げることで熱伝導率の向上が期待できるが、高充填化自体に技術・製法上の課題があり、また高弾性化による反り追従性の損失など他特性への悪影響も生じる。このような背景の中、従来伝熱特性で

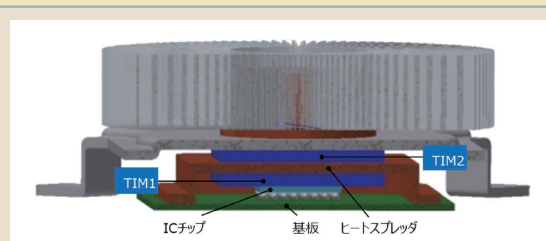


図 1 半導体パッケージと TIM1 および TIM2 の構成レイアウト

TIM1 は IC チップ（熱源）とヒートスプレッドの間、TIM2 はヒートスプレッドとヒートシンクの間に配置し、伝熱効率を向上させるために使用する。

**Key-words** : 半導体パッケージ、熱伝導シート、熱伝導フィラー、黒鉛の異方性・配向技術

**注 1** 半導体製造工程においては、シリコンウェハ上に集積回路を描写する工程を前工程、集積回路のチップを周辺部材と半導体パッケージとして組み上げる工程を後工程と呼ぶ。

**注 2** 一般に半導体パッケージの構成素材においては、導通不良を生じないアルミナなどの絶縁セラミックス材料が選択されるが、IC チップの裏面に配置される TIM においては金属や黒鉛などの導電材料の選択も有効となる。

**注 3** Lid, hat, cap 等の呼称もある。IC チップとヒートシンクの間に配置される金属材料で、熱の拡散に加えてチップの保護やパッケージ全体の硬直性を補強し反りを軽減するなどの機能を持つ。ヒートスプレッドを用いないタイプのパッケージでは、硬直性の補強を目的とするステイフナー（リングとも呼ぶ）が IC チップを囲むように配置される。

は不利とされてきた熱伝導シートに対して、黒鉛フィラーを垂直配向させることにより高い伝熱特性と柔軟性を両立させた黒鉛垂直配向熱伝導シートが開発され、最先端半導体パッケージにおけるTIM1用途への適用が開始された。

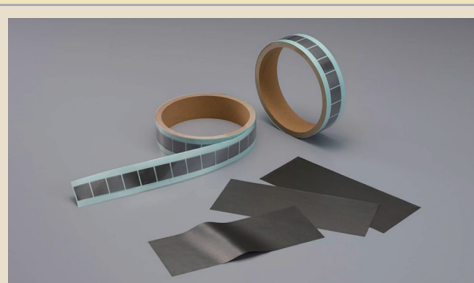


図2 黒鉛垂直配向熱伝導シート・TCシリーズの外観写真

黒鉛フィラー由来の黒色外観を有するシート形状である。

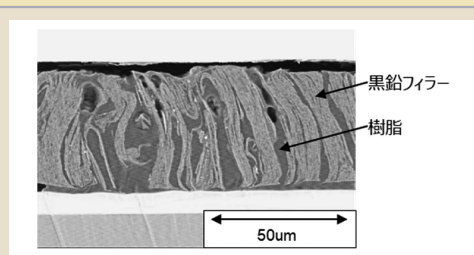


図3 黒鉛垂直配向熱伝導シート・TC-CWP04の断面SEM画像

マトリクス樹脂（暗色部位）中に黒鉛フィラー（明色部位）が垂直に配列されているシート構造である。

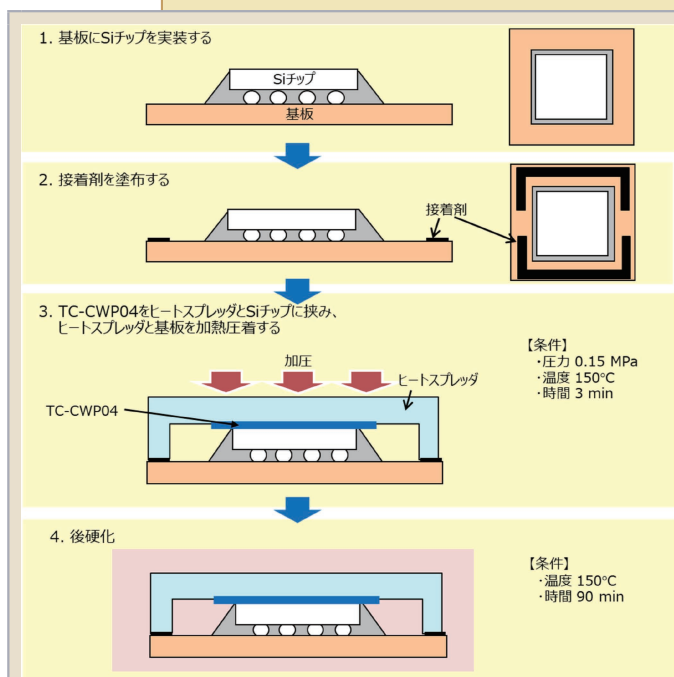


図4 TC-CWP04の評価パッケージ組立プロセス  
実際のパッケージ構造を模擬した簡易構成にて評価を実施している。

#### 4. 製品

ここからは具体例として弊社が上市するTIM1用途の黒鉛垂直配向熱伝導シート・TC-CWP04を紹介する。図2にTCシリーズ製品の一般外観写真を示す。本シートは大粒径の黒鉛粒子と軟質樹脂分からなるコンポジット材料である。フィラーとして用いられる黒鉛は異方性を有し、その六角面方向においては特に高い熱伝導率を示すため、図3の断面SEM像のように大粒径の黒鉛フィラーを垂直方向に配向させたシートは目的となる厚み方向に対し最大90 K/mWの高い熱伝導率を有している。

#### 5. 製法

##### ①黒鉛シート

黒鉛垂直配向熱伝導シートの製法は、原材料の混合→薄膜化による成型工程を経て作製される。

#### 6. 製品性能・スペック

##### (1) 評価用パッケージの組立条件

図4に厚み0.2 mmサイズのTC-CWP04を用いたTIM1レイアウト評価パッケージでの組立例を示す。評価パッケージは基板サイズ45×45 mm、Siチップサイズ20×20 mmの構成である。まずシートに先立って基板上にSiチップを実装し、続いてSiチップ周囲の基板上にヒートスプレッド固着用の接着剤を塗布する。その後TC-CWP04をSiチップとヒートスプレッド間に挟み込む形で配置し、全体を0.15 MPa、150℃の条件で加熱圧着する。最終的に150℃で接着剤を後硬化させることにより部材を固定化し本工程を完了する。

##### (2) 反り追従性の評価

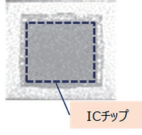
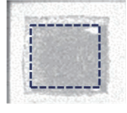
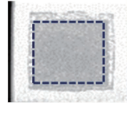
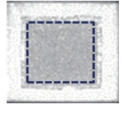
表1に本パッケージに対するTC-CWP04の密着性評価結果を示す。密着性評価は超音波探傷画像の密着面積を用いて実施した。図5に本パッケージのSiチップ部の反り量を示す。反り量約70μmのSiチップに対して、本シートの実装工程直後の密着面積は99%であった。以上の結果からTC-CWP04は実装工程におけるパッケージの反りに追従し、Siチップおよびヒートスプレッドに対してよく貼り付いていることが確認できた。

##### (3) 耐久信頼性の評価

続いて表1に(a)高温保存試験 High Thermal Storage Test (HTSL) 150℃ 1000時間、(b)ヒートサイクル試験 Thermal Cycling Test (TCT) -55⇔125℃ 1000サイクル (c)高加速寿命試験 High Accelerated Stress Test (HAST) 130℃ 85% RT192

表 1 Si チップと TC-CWP04 の実装直後および耐久信頼試験後の密着性

反射像で観察しているため黒く見えるところが部材間の密着部、白く見えるところで剥離（空隙・ボイド）が存在する箇所である。

| 項目       | TC-CWP04 板厚 0.2 mm                                                                |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|          | 実装直後                                                                              | 耐久試験                                                                              |                                                                                   |                                                                                     |
|          |                                                                                   | (a) 高温保存試験 (HTSL)<br>150 °C 1000 h                                                | (b) ヒートサイクル試験 (TCT)<br>-55 ⇄ 125 °C 1000 cycle                                    | (c) 高加速寿命試験 (HAST)<br>130 °C 85% RH 192 h                                           |
| 超音波探傷画像  |  |  |  |  |
| 密着面積 (%) | 99                                                                                | 95                                                                                | 99                                                                                | 98                                                                                  |

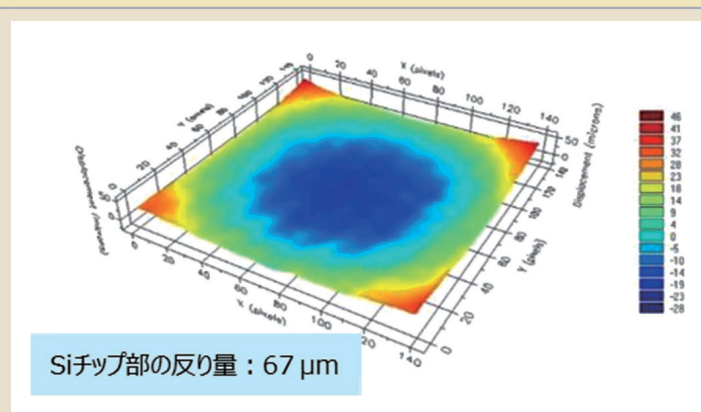


図 5 評価用 Si チップの反り量

評価用パッケージの Si チップ部の反り量をシャドーモアレで測定した。

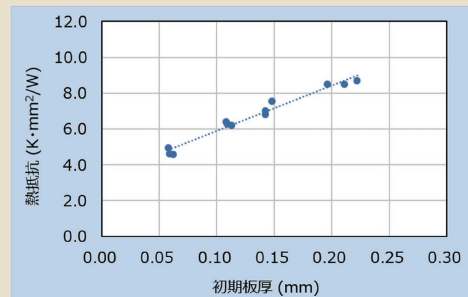


図 6 TC-CWP04 の熱抵抗値と板厚の関係

熱抵抗値 ( $\text{Kmm}^2/\text{W}$ ) は板厚 (mm) / 熱伝導率 ( $\text{W}/\text{mK}$ ) であるため薄膜化に伴い低下する。

時間、3つの信頼性試験の結果を示す。いずれの試験後も実装直後と同程度の密着面積が維持されており、本パッケージに対し TC-CWP04 の高い耐久信頼性が確認できた。

#### (4) 熱抵抗の改善

パッケージ評価で重要な伝熱特性は熱抵抗である。TC-CWP04 の熱抵抗と厚みの関係を図 6 に示す。熱抵抗は薄膜化に比例して減少し、厚みを 0.2 mm から 0.06 mm まで薄くすると、熱抵抗は約  $8 \text{ Kmm}^2/\text{W}$  から  $5 \text{ Kmm}^2/\text{W}$  まで低減できることを確認した。一般的に熱伝導シートを薄くすると反り追従性には不利となるため、パッケージとしてのパフォーマンスは熱抵抗と密着性・信頼性の両面から考慮する必要があるが、極限の性能を追求する先端領域においては TIM の薄膜化は有効な設計指針となる。

### 7. 現在・将来展望

今後ますますの大サイズ化・高消費電力化が進む半導体パッケージにおいて、その適切な熱マネジメ

ントは半導体の性能向上の重要因子となる。故に半導体の発展速度に合わせた TIM の性能向上が必須となる。一方で従来の素材選択や単純な薄膜化においてはその性能改善に限界も見えてくるため、既存の枠に囚われない柔軟な材料開発の姿勢が重要である。本稿では TIM1 用途における従来のセラミックスフィラーから黒鉛フィラー垂直配向技術への置き換えを紹介したが、コンポジット材料としては高熱伝導フィラーの開発・フィラーの高充填化・効率的な熱パス構築など種々の観点から技術的向上の余地がある。各々の素材の活用法や組み合わせを見出し、今後の技術開発の活路を見出すことが、将来の高度情報社会の発展に貢献するものと考えられる。

[連絡先] 杉原 佑介（すぎはら ゆうすけ）  
株式会社レゾナック エレクトロニクス事業本部 開発センター  
〒300-4247 茨城県つくば市和台 48