

Revision: 01

Issue date: 2018-01-19

Prepared by: Paul Drexhage

Approved by: Peter Beckedahl

Keyword: thermal interface material, TIM, thermal paste, thermal grease

サーマルペースト塗布

1. はじめに.....	2
2. 熱伝導材料(TIM)の目的.....	2
3. サーマルペーストの選択.....	3
3.1 ペーストの特性.....	3
3.2 キャリアおよびフィラー.....	4
4. サーマルペースト塗布.....	4
4.1 概要.....	4
4.1.1 推奨ペースト厚さ.....	4
4.1.2 ヒートシンク仕様.....	5
4.1.3 モジュールへの塗布対ヒートシンクへの塗布.....	5
4.1.4 ペーストの調合.....	5
4.2 ローラー.....	5
4.2.1 工程.....	6
4.3 スクリーン印刷.....	7
4.3.1 材料.....	7
4.3.2 メッシュ数およびメッシュのサイズ.....	7
4.3.3 工程(手作業).....	8
4.4 ステンシル印刷.....	10
4.4.1 ステンシル設計.....	11
4.4.2 工程(手作業).....	12
4.5 スクリーン対ステンシルの適用.....	12
4.6 スクリーンおよびステンシルの摩耗.....	13
4.7 やり直しおよび洗浄.....	13
4.8 ペーストの保管および取扱い.....	13
5. 測定.....	14
5.1 湿式膜厚ゲージ.....	14
5.1.1 くし型タイプ.....	14
5.1.2 ローラータイプ.....	15
5.2 光学検査.....	15
5.3 重量.....	16
6. 評価.....	16
6.1 基板の割れの確認.....	16
6.2 熱サイクル.....	17
6.3 R_{th} 測定.....	17
6.4 外観検査.....	17
7. 寿命.....	18
7.1 排出.....	18
7.2 ヒートシンクの変色.....	19

8. 故障モード	20
8.1 加熱	20
8.2 セラミック基板のクラック.....	20

1. はじめに

本資料はパワー半導体モジュールとヒートシンク間の熱伝導材料(TIM)として、サーマルペースト(グリース)の塗布について記述しています。相変化材料(PCM)、コーティングされた箔基板やサーマルパッドといった他の TIM は含まれていません。セмикロン製品の塗布済み TIM に関する情報は[3]およびモジュール個別の技術説明書を参照して下さい。本アプリケーションノートは[6]に取って代わります。

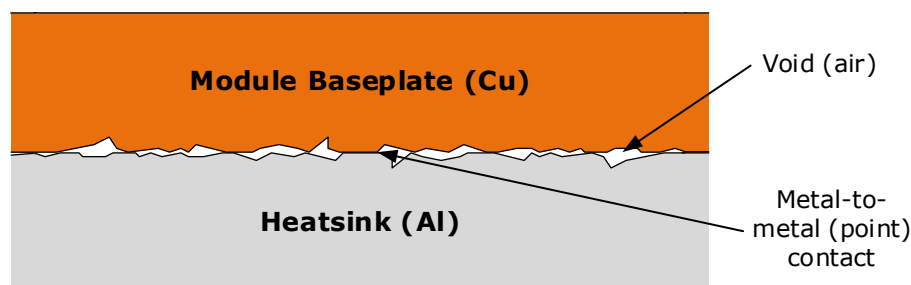
2. 熱伝導材料(TIM)の目的

半導体により発生した熱は冷却材(空気または液体)に到達し、システムの外に排出される前に、様々な材料や界面を通過する必要があります。これらの各材料は、次の様に定義される特性を有しています。

熱伝導率、 λ : ワット/メートル・ケルビン [$W/(m \cdot K)$] が単位となる、材料の熱伝導能力の尺度です。

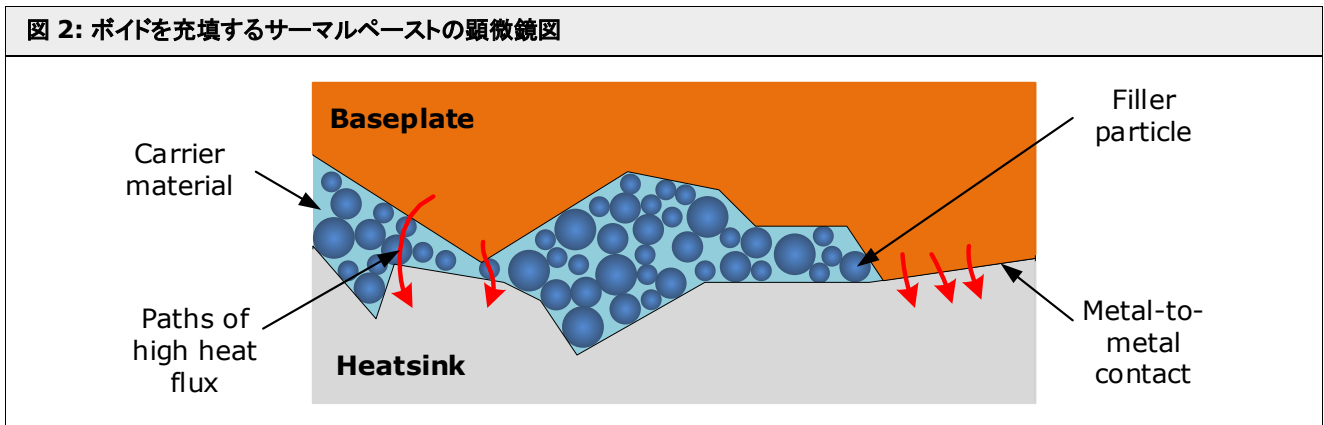
パワー半導体システムでは、熱伝導率が高い銅 ($\lambda_{Cu} \approx 390 W/(m \cdot K)$) やアルミニウム ($\lambda_{Al} \approx 200 W/(m \cdot K)$) などの金属が選定されています。理想的には、これらの材料が接触する場所に関わらず、金属対金属が完全に接触した均一な表面になります。実際には、パワー半導体モジュールがヒートシンクに組み付けられた場合など、界面は均一ではありません。図 1 に示す様に、顕微鏡レベルでは、接触する材料のそれぞれに多くのボイドがあります。これらのボイドは、熱伝導率 ($\lambda_{air} \approx 0.03 W/(m \cdot K)$) が比較的低い空気で満たされています。熱伝導材料の目的は、可能な限り金属対金属の接触を維持しながら、この空気を高い熱伝導率 ($\lambda_{paste} \approx 0.5-6 W/(m \cdot K)$) を有する材料で置き換える事です。

図 1: TIM を使用しないベースプレート-ヒートシンクの境界面の顕微鏡断面図(誇張)



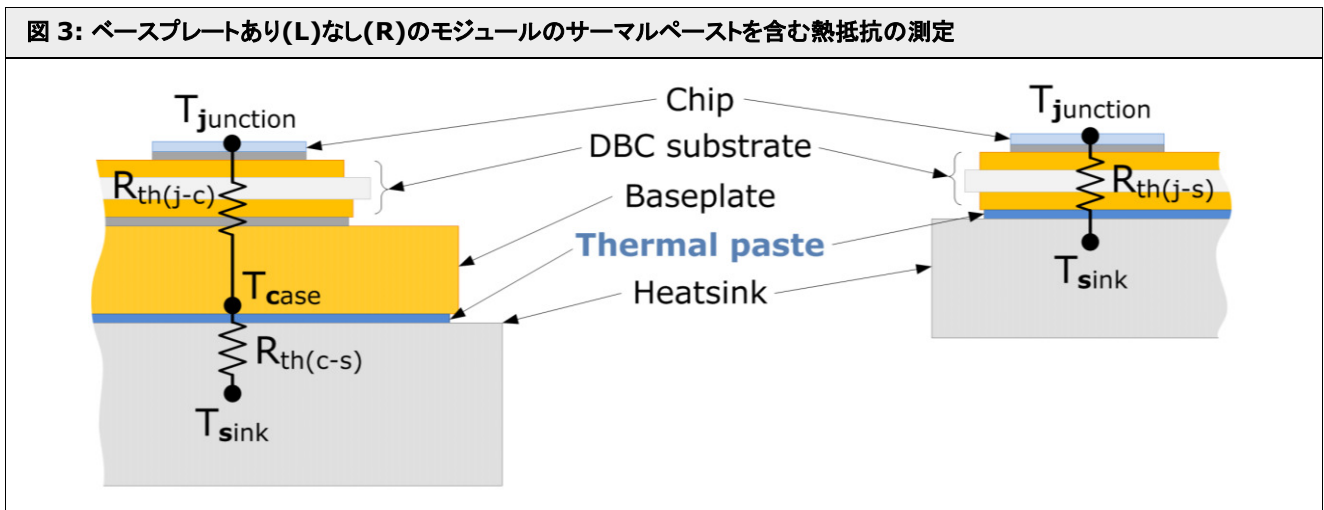
サーマルペーストはキャリア媒体にけん濁された、熱伝導粒子で構成されています(図 2)。これらの粒子はボイドを埋め、熱の逃げ道を形成します。この図より、粒子のサイズ、粒子のサイズのばらつき、および粒子分布の全てが、ペーストが界面のボイドをどの程度うまく埋めるかに、重要な役割を果たしている事は明らかです。

図 2: ポイドを充填するサーマルペーストの顕微鏡図



熱伝導率は材料の特性を表し、界面の全体的な性能は接合-ヒートシンク間熱抵抗(R_{th})として定義されます。モジュールの構造(図 3)に応じて、サーマルペーストの効果は $R_{th(case-sink)}$ または $R_{th(junction-sink)}$ のいずれかに含まれます。熱抵抗の詳細については、[4]を参照して下さい。

図 3: ベースプレートあり(L)なし(R)のモジュールのサーマルペーストを含む熱抵抗の測定



熱抵抗は、ペースト単独の熱伝導率以上のものによって決まります。以下は最終的な $R_{th(c-s)}$ / $R_{th(j-s)}$ の値に影響します。

- a. ヒートシンクの表面仕上げ
- b. サーマルペーストの塗布厚さ
- c. 組付け後の熱サイクル
- d. ヒートシンクへのモジュールの組付け圧力
- e. モジュールの設計(ベースプレートの形状、チップの配置、ベースプレート材料、その他)

3. サーマルペーストの選択

3.1 ペーストの特性

このアプリケーションノートの長さから分かる様に、サーマルペーストを選択する際に考慮すべき点が数多くあります。最も重要な特性の概要を表 1 に示します。

表 1: サーマルペーストを選択する際の考慮事項

特性	考慮事項	評価方法
熱伝導率 → 熱抵抗	データシートに記述されているペーストのバルク熱伝導率は、最終的な有効 $R_{th(j-s)}$ ほど重要ではありません。	パワーエレクトロニクスアセンブリの静的熱特性試験
粘度	ペーストの粘度が高いと、ベースプレートのないモジュールで基板にクラックが生じる可能性があり、スクリーン印刷が困難になります。	組立て試験、生産ラインの認定
ユーザーの要件との適合性	特定の業界では特定の物質(例:シリコン)の使用が制限されています。	ペーストのデータシートの調査
排出の弾力性	特定のペーストおよびモジュールタイプ(ベースプレート)は、モジュールの下から「排出される」可能性が高くなります。	パワーサイクル
乾燥の弾力性	特定のペーストは、時間の経過と共に乾燥しやすくなります。	熱/環境サイクル

3.2 キャリアおよびフィラー

ペースト中のキャリア材料は、一般的にシリコンと非シリコンタイプに分類されます。一般的にセミクロンでは十分に確立されていて、低コスト、高性能で信頼性が高いシリコンベースのペーストの使用を推奨しています。しかし、最新の製造設備(特に塗装や他の化学的に敏感な工程に関連する設備)では、シリコンを使用しない事が求められます。従って、キャリアが合成流体の混合物からなるシリコンフリーのペーストが入手可能です。

ほとんどのペーストのフィラーは、金属酸化物(ZnO , BN , Al_2O_3)、銀、またはグラファイトです。フィラーは重要ですが、同様に重要なのは、フィラーとキャリアの比率および粒子のサイズ(上記参照)です。高性能ペーストでは、比較的大きな粒子(例: $\sim 50\mu m$)が使用される事が多く、その為ペーストの最小厚さが制限される可能性があります。さらに、金属フィラーの含有量が高いペーストは非常に粘度が高くなり、モジュール-ヒートシンク間で押し付けられた場合、ペーストが「流出する」可能性が低くなる為、ベースプレートのないモジュールで問題が発生します。(セラミック基板のクラック参照)。塗布工程の粘度を下げる為に、少量(例: 1%)の蒸発性溶剤を含むペーストもあります。これらのペーストは、溶剤の安定性がキャリア材料よりも低い為、保管および取扱いの要件により敏感です。溶剤が蒸発すると、ペーストの塗布がより困難となり、意図した通りにボイドを埋める事ができなくなります。

4. サーマルペースト塗布

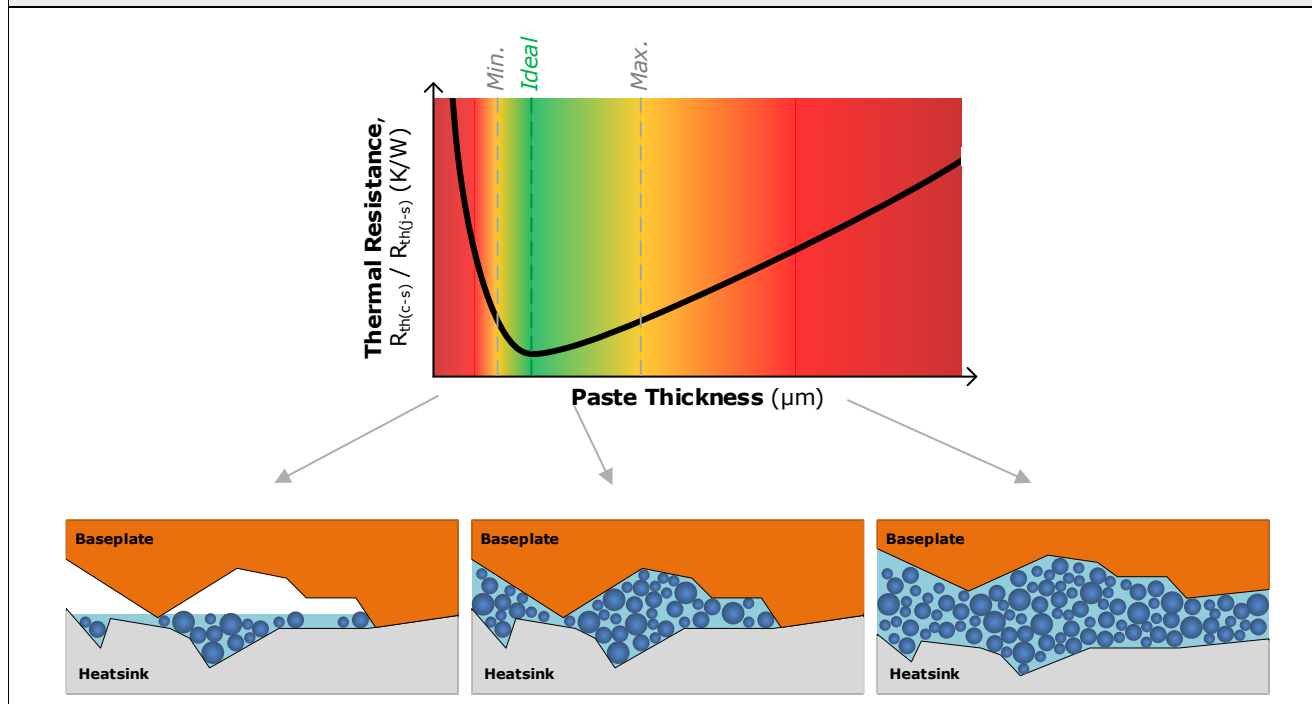
4.1 概要

4.1.1 推奨ペースト厚さ

熱抵抗に影響を与える様々なパラメータを考えると、目標ペーストの厚さはモジュールのタイプによって変化すると理解する必要があります。パワーモジュールのメーカーは、産業標準のサーマルペーストを使用してモジュールを認定し、厚さを指定する必要があります。セミクロンの場合、伝統的にこのペーストはワッカーP12で、目標の厚さは、当該製品ライン(例: MiniSKiiP、SEMİTOP、その他)のそれぞれの技術説明書/組付け説明書に記述されています。これらの厚さは、ワッカーP12と類似の物理的特性を有する、あらゆるサーマルペースト(つまり、酸化物キャリアを含み、密度が約 $2.1g/cm^3$ であるシリコンペースト)に有効であり、通常は $5\sim 20\mu m$ の広い範囲で規定されます。

ここまでの記述から、空気で満たされたボイドを埋める為に、十分なペーストのみを塗布する必要がある事が分かります。ペーストの薄い層を追加するだけで、システムの熱抵抗はすぐに低下しますが、これを超えてペーストを追加すると、ペーストの熱伝導率が界面の2つの金属よりも低い為、熱抵抗は徐々に上昇します(図4)。

図 4: ペーストの厚さとシステムの熱抵抗の関係



4.1.2 ヒートシンク仕様

ヒートシンクの表面仕上げは界面の重要な部分です。粗さ(Rz)、平面度、および許容「段差」の仕様は、様々なモジュールタイプ(ベースプレートまたはベースプレートなし)ごとに示されています。セмикロン製品の場合、ヒートシンクの表面仕上げ要件は、該当する製品ライン(例: SEMiX、SEMİTOP、その他)のそれぞれの「組付け説明書」に記述されています。これらの仕様はヒートシンクの機械加工用に使われる図面に記述する必要があり、使用前に仕上がったヒートシンクで確認する必要があります。これは光学検査方法を使用して行う事ができます。

4.1.3 モジュールへの塗布対ヒートシンクへの塗布

最初にペーストをモジュールに塗布するかヒートシンクに塗布するかは、製品の機械設計および製造工程の組立て順序に基づいて決定されます。一般的に、ヒートシンクにペーストを塗布するにはスクリーン/ステンシルが使用されます。物理的に簡単であり、スクリーン/ステンシルは複数のモジュールのパターンを一度にサポートできる為です。この為、次のスクリーン/ステンシルの例ではヒートシンクへのペースト塗布を示しますが、この工程はモジュールに直接塗布する様に適合させる事もできます。

4.1.4 ペーストの調合

ほとんどのペーストは、塗布前に基本的な混合を行う事でキャリアとフィラーの均質化をチェックし、保管されているペーストの粘度に重大な変化が生じた場合に作業者に知らせる事ができます。これは、生産ラインに分注する前に出荷用コンテナ内でペーストを攪拌するという単純なものから、完全自動スクリーン印刷で使われる自動ミキサーに材料を通すような複雑なものまであります。よく混合されたペーストは、キャリア材料(油など)が残っていても、均一な色と粘度を示す必要があります。溶剤を含むペーストは、溶剤が均一に分散される様にメーカーごとに混合する必要があります。

4.2 ローラー

試作および少量生産の場合、ローラーを使用してモジュールの底部にサーマルペーストを直接塗布できます(図 5)。この方法は低コストですが、厚さが不均一になり、取扱いが面倒になります。モジュールを組み付ける前にサーマルペースト層の厚さを直接測定できるという利点があります。

中程度の硬度計(ショア硬度 50A~70A)のゴムローラー(美術/印刷業界では「プレイヤー」とも呼ばれます)が推奨されます。このゴムは十分に硬いので、異物が入り込みにくいです。ローラーはペースト状の洗浄剤と互換性があり、古いペーストや汚れが蓄積す

るような機械的機能を備えていない必要があります。ローラーの幅は、ベースプレートにはみ出さずに収まる程度に狭く、ペーストの均一な層を塗布できる程度の幅にする必要があります。

図 5: ローラー例



4.2.1 工程

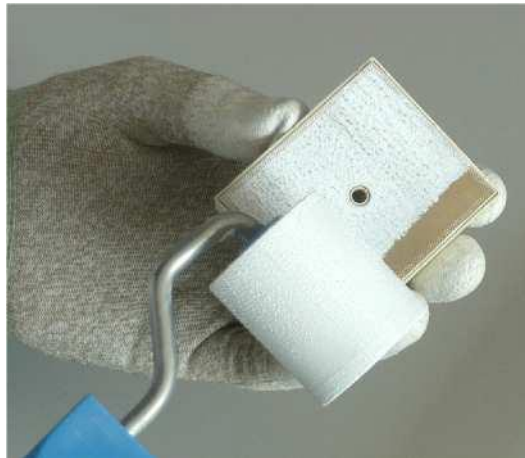
1. ペーストは、ガラス板や硬質プラスチックのトレイなど、清潔で硬くて平らな表面に塗布されます。
2. 薄い層がローラー全体に均一に広がるまで、ローラーを前後に動かします(図 6)。ローラーがペーストを引き上げる際にペーストの表面張力が壊れる為、通常、甲高いパチパチという音が伴います。

図 6: 硬質プラスチックトレイを使用して、ローラー上にペーストを塗布



3. ローラーをモジュールのベースプレートに軽く圧力を加え、最初は一方向(図 7)、次に垂直方向(つまり、X 軸と Y 軸の両方)に薄く、均一な層がベースプレート全体に塗布されるまで、前後に動かします。

図 7: MiniSKiiP モジュールへのペースト塗布



4. 層の厚さがチェックされます(測定参照)。
5. ローラー上のペーストが多すぎる場合、ガラス板の乾燥部分にローラーを走らせる事によりペーストを除去できます。

4.3 スクリーン印刷

スクリーン印刷は、布地および印刷業界でインクを印刷する確立された方法で、ペーストの塗布に適しています。布地のメッシュがフレーム全体に張られ、モジュールのベースプレートのサイズの長方形の開口部が、フォトレジストインクを使用してメッシュ状に印刷されます。次にスクリーンをペーストで事前に湿らせます(「浸漬」)。最後に、スクリーンをヒートシンクまたはモジュールの上にわずかな距離を置いて配置し、合成ゴムのスクレーパー(「スキージー」)で事前に設定した角度と圧力でスクリーン全体に引きます。スクリーンが印刷される表面と接触すると、ペーストがメッシュを通して押し出され堆積されます。得られるペースト層は均一(パターンなし)である為、ペーストの厚さを直接測定できます。

スクリーンの高さ、位置およびスクレーパーに加える圧力を制御する半自動装置もあります。

4.3.1 材料

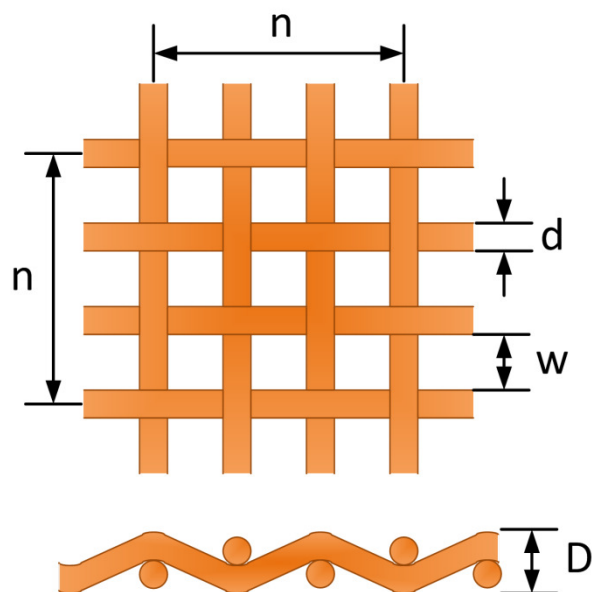
伝統的に「シルクスクリーン」として知られていますが、最新の高性能スクリーン素材はポリイミド系(ナイロン)、ポリエチレンテレフタレート(PET)や、その他のポリエステルおよびモノフィラメントなどのプラスチックで作られています。スクリーンの寿命を延ばす為にステンレスメッシュも利用できます。

スクレーパーは、中程度の硬さ(ショア硬度 60A~80A)のゴムブレードがボルトで固定された、押し出しアルミニウムのハンドルで構成されています。より粘度の高いペーストには、より硬いゴム(80A)が使用されます。

4.3.2 メッシュ数およびメッシュのサイズ

メッシュを定義する為の最も一般的なパラメータは、単位面積あたりの糸の数量および糸の直径です(図 8)。命名法は測定単位(cm 対インチ)および材料構造(単繊維対多繊維)によって異なる為、地域(米国対ヨーロッパ)に応じてメッシュ数を規定する場合は注意が必要です。一般的に、サーマルペーストを印刷する場合のメッシュ数は、印刷で使用されるメッシュ数よりもはるかに「粗く」なります。これは、得られる材料の厚さが厚くなり、形状の詳細があまり考慮されない為です。

図 8: メッシュパラメータの定義



$$\text{開口面積の割合: } a_o = \left(\frac{w}{w+d}\right)^2 \cdot 100\%$$

$$\text{およそのペースト量: } V_{paste} = \sim 0.75 \cdot D \cdot \left(\frac{w}{w+d}\right)^2$$

セмикロンは PET メッシュおよびワッカーP12 サーマルペーストを使用して、いくつかのテスト例を行いました(表 2)。

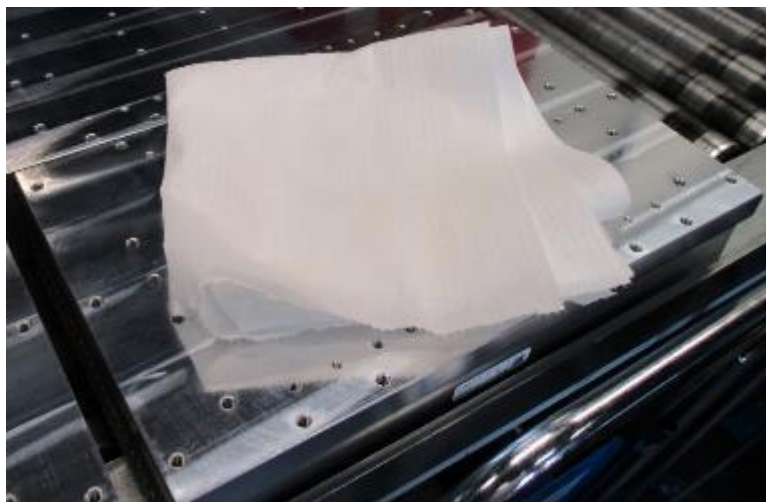
表 2: 実験結果

項目 (DIN 規格)	77-55	43-80	27-140
メッシュ数、n	77 threads/cm ²	43 threads/cm ²	27 threads/cm ²
ネジの直径、d	55μm	80μm	140μm
得られるペーストの厚さ	20-30μm	40-50μm	70-80μm

4.3.3 工程 (手作業)

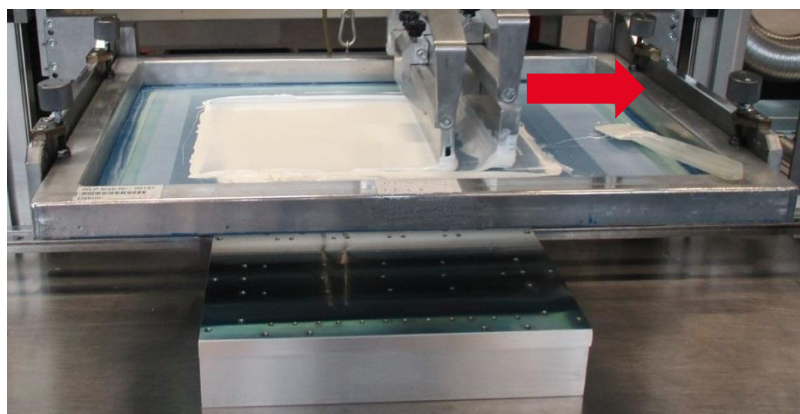
1. 洗浄したヒートシンクをスクリーン下の所定の位置に置きます。ヒートシンクは機械加工の一部として脱脂する必要がありますが、スクリーン印刷工程の直前に、イソプロピルアルコールなどの弱い溶剤で糸くずのでない布を使用して、指紋、ほこりやその他の残留物を取り除く事が重要です。

図 9: 脱脂したヒートシンクおよび糸くずの出ない布



2. ヘラを使用して、ステンシルの遠端にペーストの太い線を置きます。軽い圧力で(ヒートシンクには接触させずに)スクレーパーをスクリーン全体に引っ張る事で、スクリーンを「浸水」させます。

図 10: スクリーンの浸水 (左から右へ)



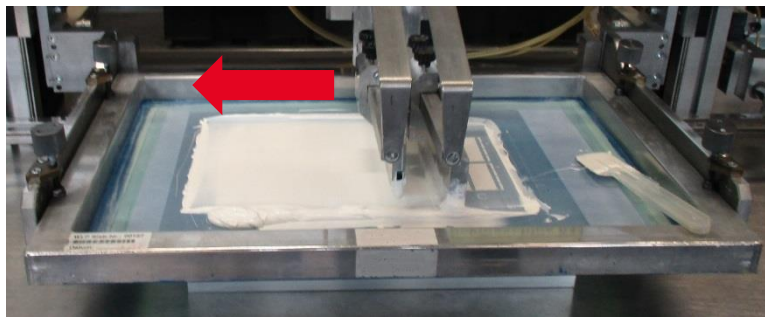
3. スクリーンを最終印刷位置まで下げます(通常、スクリーンの張力に応じてヒートシンク表面から 4~7mm 上)。

図 11: 隙間が見えるスクリーンの下側



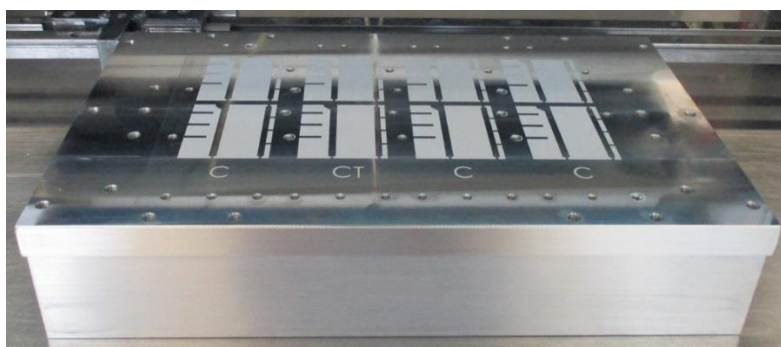
4. スクレーパーを高圧でスクリーン全体に一度引っ張り、スクリーンをヒートシンクに押し付けて、ペーストの層を堆積させます。

図 12: ペーストの塗布(右から左)



5. スクリーンを持ち上げ、ヒートシンクを取り外して検査します。

図 13: 完成したペーストパターン

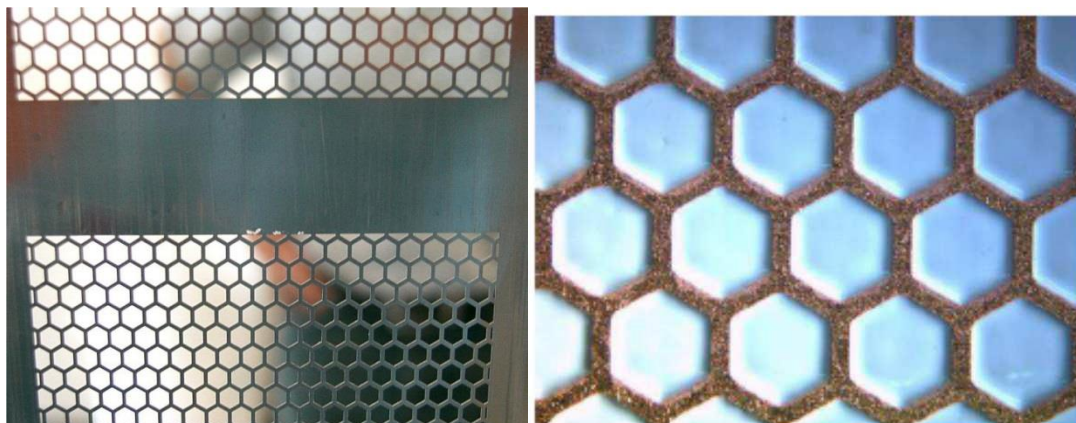


4.4 ステンシル印刷

ペーストを塗布するステンシル法はスクリーン印刷と非常によく似ています。ただし、布製スクリーンの代わりに、パターンが切り取られたスチール製のステンシルが使用されます(図 1414)。スクレーパーを使用して、ペーストをステンシルフィーチャーに押し込みます。パターンを使用する事で、スクレーパーが全ての点でヒートシンクと平行になる様にします。パターンは、モジュールが押し下げられて温度サイクルが行われるまで表面に残り、その時点でペーストが流れてボイドを埋めます。穴の形状、サイズ、間隔とステンシルの厚さによって、モジュールが組み付けられた後のペーストの厚さが決まります。従って、モジュールを組み付ける前にペーストの厚さを直接測定する事はできません。ステンシル印刷法には、次の様ないくつかの利点があります。

- a. スクリーン印刷業界に詳しくない人でも、ステンシルの設計および仕様が簡単になります。
- b. チップの位置およびベースプレートの曲率に合わせて最適化された、複雑なサーマルペーストの分布を使用できる様になります(通常、事前に塗布されたTIMを供給する場合、モジュールメーカーによってのみ行われます)。
- c. ステンシルは通常、布製スクリーンより耐摩耗性が高い為、機器の寿命が長くなります。

図 14: ステンレス鋼ステンシルおよびモジュール底部のペーストパターン

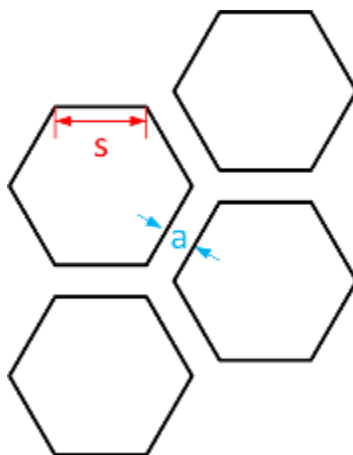


4.4.1 ステンシル設計

強度および耐溶剤性の点から、ステンシルの材料には通常ステンレスが使用されます。パターンはレーザーまたは他の工程を使用してスチールにカットされ、ステンシルの形状にきれいなエッジが得られます。スタンピングなどの工程は、エッジの丸みや鋭利な部分が残し、ステンシルが面に配置されなかったり、ヒートシックの表面に傷がついたりする可能性がある為、避けて下さい。

ステンシルの形状は、スクレーパーエッジの真直さがペースト厚さに影響を与えない様に、十分に小さい必要があります(つまり、広い開口部は避けるべきです)。ハニカムパターンは、均一な分布を与え、2次元を使用して図面上で簡単に指定できる為、最も一般的です(図 15)。

図 15: ハニカムパターンの仕様



目標以上の厚さを達成する為の「正しい」ハニカムパターンは、ステンシルの厚さ、ペーストの種類、モジュールのサイズによって異なります(表 3)。

表 3: MiniSKiiP モジュールのハニカムパラメータの例

モジュール タイプ	ハニカムエッジ長さ "s" (mm)	ハニカムピッチ "a" (mm)	ステンシル厚さ (μm)	標準ペースト厚 ワッカーP12 (μm)
MiniSKiiP 1	0.75	0.7	75	30
MiniSKiiP 2	1.1	0.5	100	55
MiniSKiiP 3	0.85	0.55	100	40

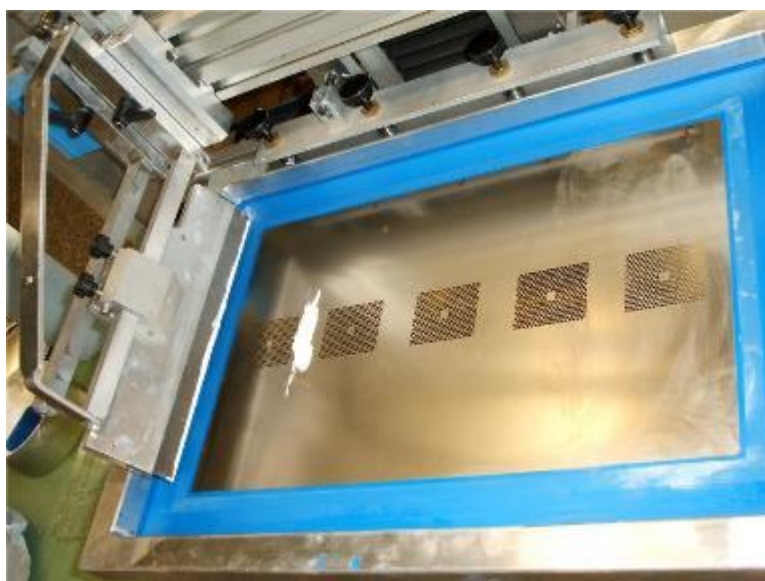
4.4.2 工程 (手作業)

全体のステンシル印刷工程はスクリーン印刷工程と非常に似ていますが、2つの顕著な違いがあります。

- ステンシルは、ステンシルされる表面に接触して配置されます。
- パターンはスクレーパーを使用して1回のパスで印刷されます(ステンシルの「浸水」は不要です)。

ステンシル印刷の一般的な手順は次の通りです。

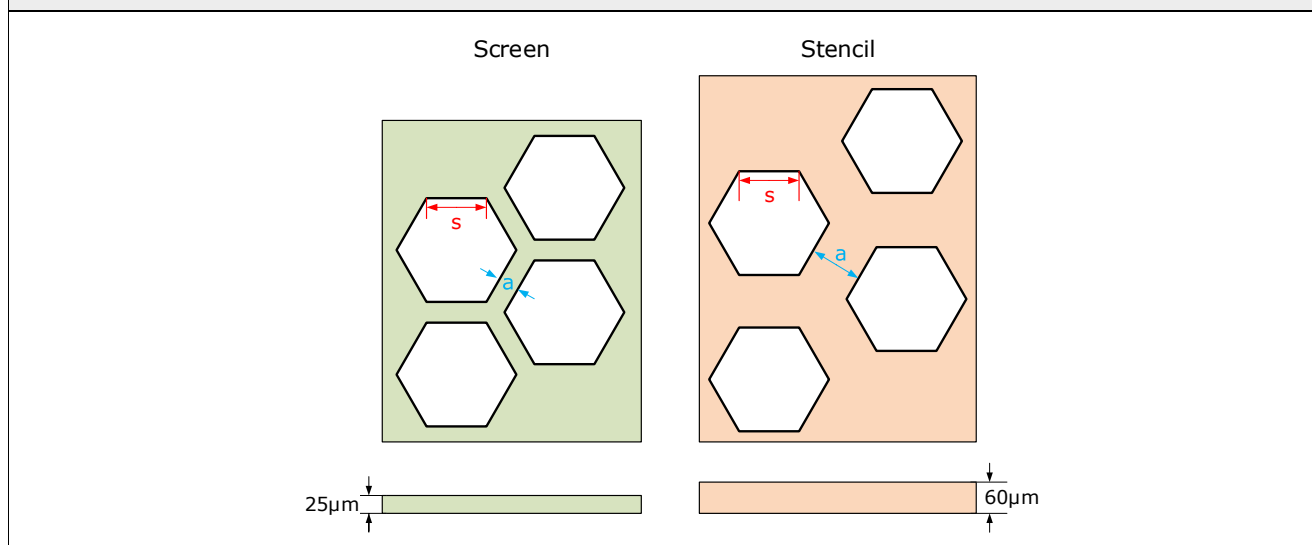
- 洗浄したヒートシンクをステンシルの下の所定の位置に置きます。
- ステンシルを所定の位置まで下げ、ヒートシンクと接触させます。ヘラを使用して、ステンシルの一端のスクレープの前にペーストの線を塗布します。
- スクレーパーを高圧でステンシル全体に1回引き、ペーストをステンレスフィーチャーに押し込みます。
- ステンシルを持ち上げ、ヒートシンクを取り外して検査します。

図 16: ステンシル全体にスクレーパーを引く前に塗布されたペーストの線


4.5 スクリーン対ステンシルの適用

ステンシルを使用するかスクリーンを使用するかは、必要なペーストの厚さによって異なります。60 μm より薄い金属ステンシルは一般的ではない為、ペーストの厚さが薄い場合はスクリーンの方が適している可能性があります。例えば、20 μm 未満の有効厚さに達するには、より薄いスクリーンによって達成できるのと同じ厚さに達する為に、開口部間の距離「a」を増加する必要があります。これにより、ペーストが不均一に分布するリスクが高まります。図 17 は、ハニカムパターンをシルクスクリーンに適用し、目標の厚さを達成する為に、ステンシル上の同等のパターンと比較する仮想的な比較を示しています。前述の様に、スクリーン印刷では通常、そのようなパターンは必要ありません。

図 17: 同じペースト厚さを実現する為に、必要なスクリーンパターンとステンシルパターンの仮定の比較



さらに、モジュールがペーストを印刷する為に柔軟な材料を必要とする場合(機械的設計の為)、スクリーンの使用が推奨されます。

4.6 スクリーンおよびステンシルの摩耗

他のツールと同様に、スクリーンおよびステンシルは両方共、繰り返しの摩耗により時間の経過と共に摩耗します。生産工程に於ける統計的工程管理(SPC)の一環として、結果として得られるペーストの厚さを定期的に評価し、記録する必要があります(測定参照)。得られたペーストの厚さが変化している、またはペーストのパターンが鮮明でなくなっている事に気付いた場合は、スクリーン/ステンシルの摩耗を検査し、必要に応じて交換する必要があります。

4.7 やり直しおよび洗浄

誤って塗布されたペーストは、再塗布する前に完全に除去する必要があります。ほとんどのペーストは石油系の溶剤(例:揮発油、トルエン、灯油、その他)に可溶ですが、正確な推奨溶剤はメーカーのデータシートに記載されています。しかしながら、毒性が低く残留物が少ない為、イソプロピルアルコールが一般的に使用されます。エレクトロニクス業界では既に一般的に使用されている為、組付け前のヒートシンクの洗浄およびサーマルペーストの除去の両方に推奨されます。

モジュールとヒートシンクの間には粒子が入らない様に、糸くずのでない使い捨て布の仕様を強く推奨します。

スクリーンおよびステンシルは自動洗浄機を使用できます。手洗いで洗浄する場合は、パターンが曲がったり歪んだりしない様に注意して下さい。スクリーン/ステンシルは溶剤で軽くこすり洗いし、圧縮空気で洗浄する事がよくあります。

4.8 ペーストの保管および取扱い

サーマルペーストは貯蔵寿命があります。それを過ぎると、フィラーおよびキャリア材料が分離すぎて、塗布の為に効果的に再混合できなくなる可能性があります。他の製品と同様に、保存期間は保管条件(例:温度、湿度)に影響されます。ペーストの製造業者は、保存期間(例:標準的なシリコンタイプのペーストの場合 5年)および保管条件(つまり、温度および相対湿度)を提供する必要があります。

ペーストが組付けラインに導入されると、異物(塵、汚れ、粒子)によるペーストの汚染が懸念されます。従って、ペーストを定期的(生産稼働またはシフトごとに)に交換する計画を立て、推奨される溶剤を使用して徹底的に工具を洗浄する事を強く推奨します。

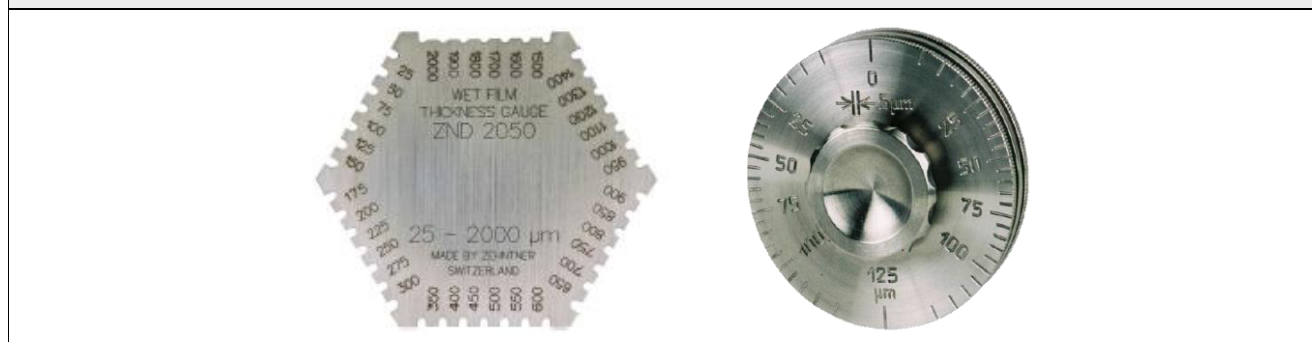
5. 測定

セмикロン製品の技術説明書に記載されている推奨厚さは、組付け前にモジュールまたはヒートシンク上に均一なペースト層が存在する場合に有効です。

5.1 湿式膜厚ゲージ

「湿式膜厚計」を使用して、サーマルペーストの厚さを直接測定できます。最も低コストで最も一般的なゲージは、ローラーとくし型の2つの手持ちタイプです。

図 18 湿式膜厚ゲージ くし型タイプ(L)およびローラータイプ(R)



5.1.1 くし型タイプ

くし型ゲージは、様々な長さの測定歯がカットされた金属またはプラスチックのプレートで構成されています。歯はヒートシンクの表面から一定の距離だけ離れています。ゲージは測定面に垂直に配置され、ペースト内を移動します(図 19)。ペーストは、少なくともペーストに接触する歯と同じ厚さになります。

図 19: くし型ゲージの操作(側面図)

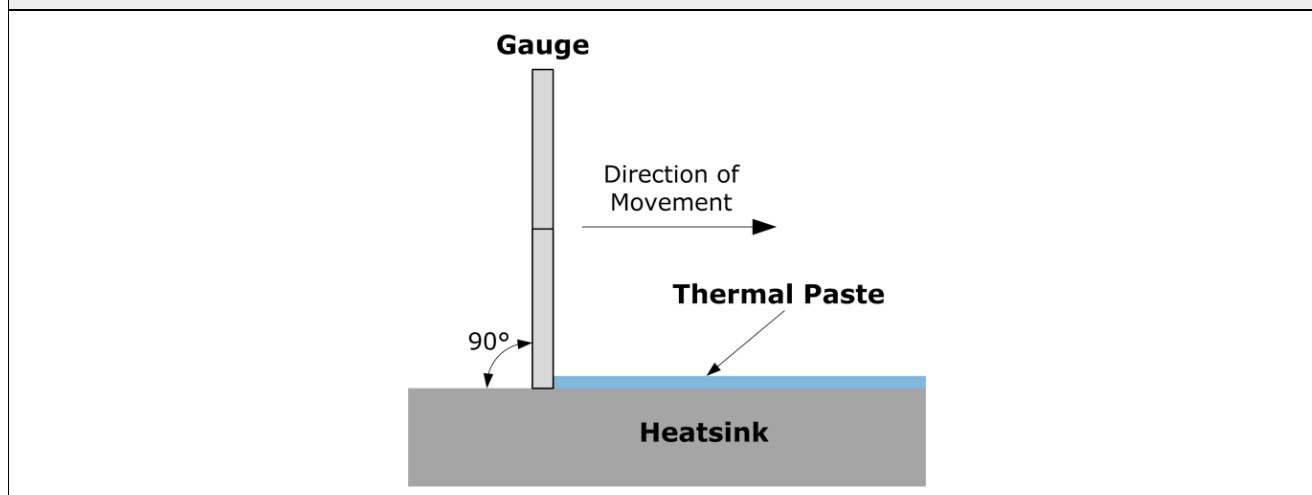
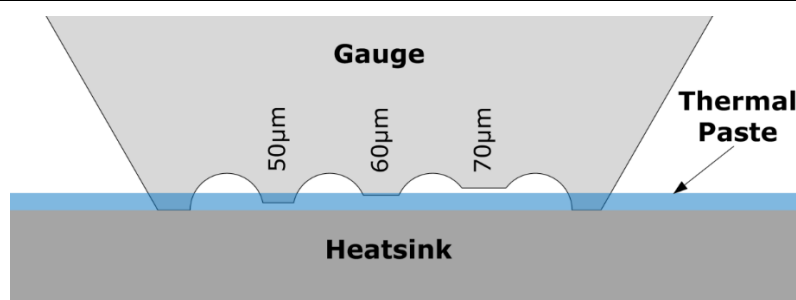


図 20: くし型ゲージの使用例。この図では、ペーストの厚さは 60~70 μm の間です(ペーストの厚さが均一であると仮定)



くし型ゲージは低コストですが、次の様な欠点があります。

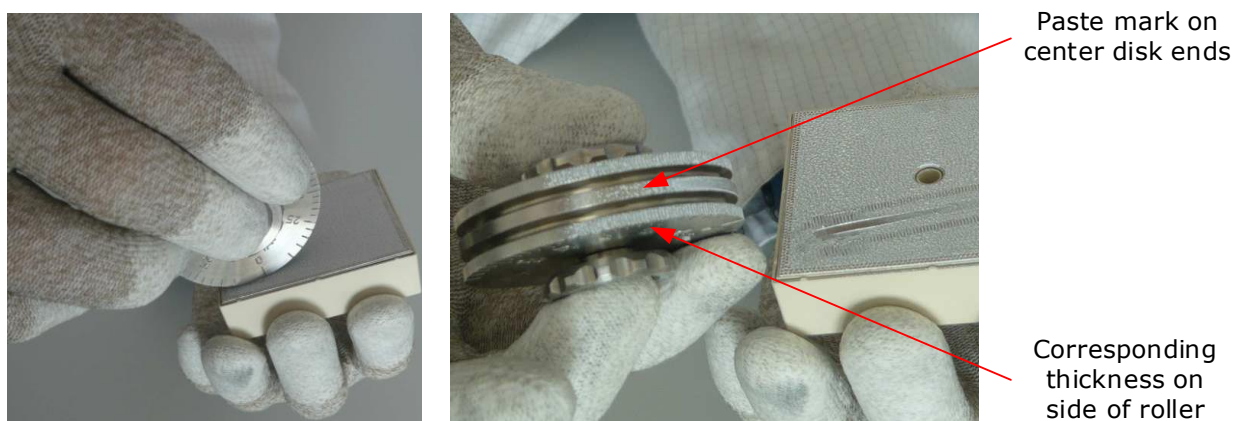
- くしを表面に対し正確に 90° (垂直) に保つ必要があります。
- ペーストの厚さは均一であると想定されている為、ペースト内の高い箇所や低い箇所があると、測定が歪む可能性があります。

これらの欠点がある為、ペーストの厚さを狭い範囲内に収める必要がある用途(ベースプレートなしモジュールなど)で、くし型ゲージを使用する事は推奨できません。

5.1.2 ローラータイプ

ローラータイプのゲージは、同一直径の 2 枚のディスクの間に、徐々に半径が小さくなる偏心ディスクが取り付けられています。ディスクは親指と人差し指で挟んだ軸を中心に回転します。ゲージはペーストの均一な層に一度転がされ、検査されます。ペーストマークが終了する中央ディスクの点が、測定された厚さに対応します。測定くしと同様に、ペーストの厚さが不均一であると測定が歪む可能性があります。一般的に、ローラーゲージは外側の 2 つのホイールによって、測定エッジが測定面に対して垂直に保てる為、くしよりもさらに正確です。

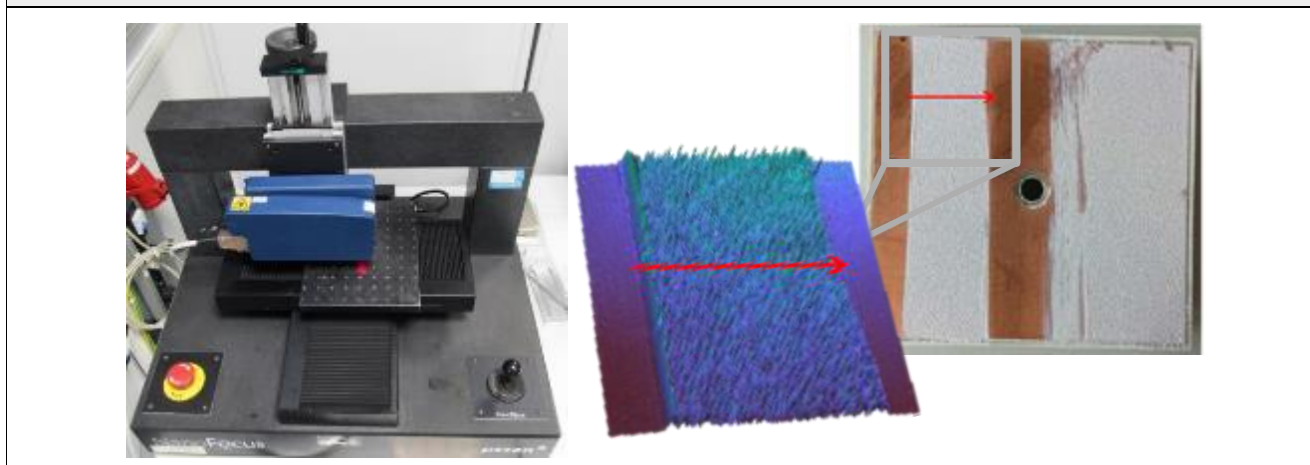
図 21: ローラーゲージを使用して MiniSKiiP モジュール上のペーストの厚さを測定



5.2 光学検査

光学 3D 形状測定は、膜厚を評価する最も先進的な方法を提供します。サンプルにペーストが塗布されると、ペーストの一部が除去され、スキャン装置の基準点が与えられます。サンプルを装置に置き、レーザーが徐々に移動して表面のプロファイルを測定します(図 22)。その結果、ペースト表面の詳細なプロファイルが得られ、そこからペーストの平均厚さを推定する事ができます。ペースト表面全体を評価するには時間のかかるフル 3D スキャンが必要な為、この方法は、通常、認定や学術研究用に確保されています。

図 22: ペンチトップ表面形測定装置システム(L)および MiniSKiiP モジュールでのスキャン結果(R)

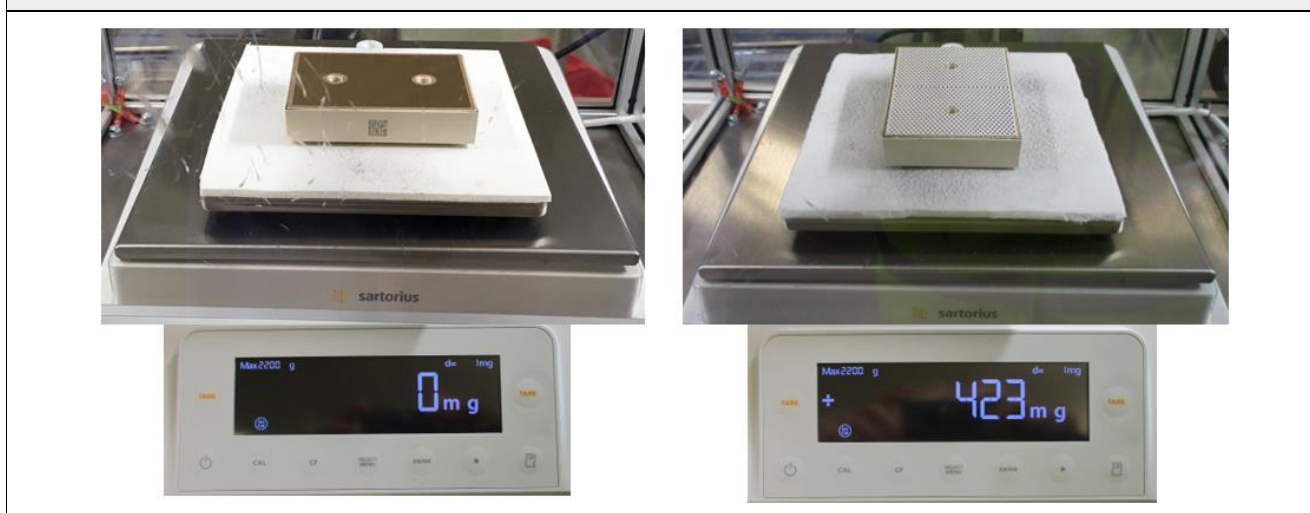


5.3 重量

ペーストパターンの場合、実効厚みを直接測定する事はできません。しかし、ペーストの重量を測定すると、正しい量が適用されたかどうかの指標が得られます。より小さなモジュールはデジタルスケール上に配置され、ゼロ設定されます(図 23L)。ペーストが塗布され、モジュールの重量が再測定されます(図 23R)。ペーストの有効厚さ(均等に分布していると仮定)は次の様に推定できます。

$$\text{有効ペースト厚さ} = \frac{(\text{ペースト重量})}{(\text{ペースト密度}) \cdot (\text{印刷面積})}$$

図 23: ペースト塗布前(L)および塗布後(R)のモジュール重量の測定



6. 評価

6.1 基板の割れの確認

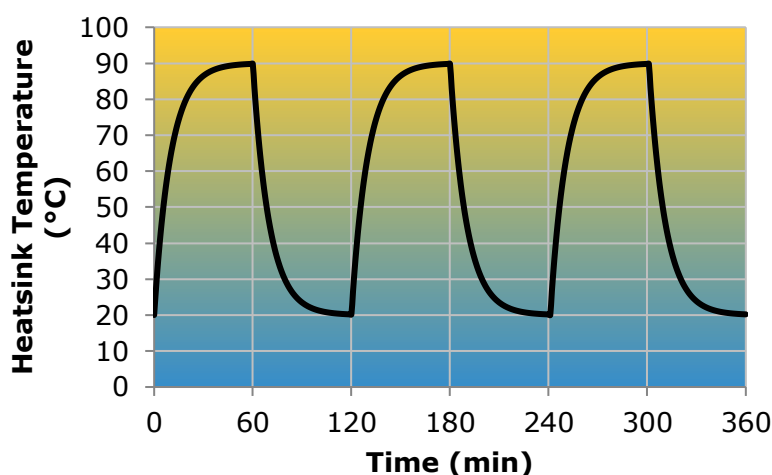
不適切な組付けに敏感なモジュールの場合、耐電圧試験により、多すぎるペースト(または組付け工程に於ける問題)の結果、ダイレクトボンデッド銅(DBC)基板のセラミックに亀裂が入ったかどうかを判断します。主端子-ヒートシンク間に高電圧を印加し、DBC基板の上面からヒートシンクに電流が流れる様な、小さな亀裂が形成されているかどうかを判断できます。この高電圧試験は通常、政府機関の規格(例:UL)に準拠した製品の製造試験の一部として必要です。[5]に記述されている「ルーチン試験」を参照して下さい。

6.2 熱サイクル

サーマルペーストは、組付け直後には最適な分布(従って性能)に達しません。過熱および冷却によりヒートシンクとベースプレートの金属が膨張および収縮し、その結果、モジュール下にペーストが移動します。従って、モジュールが組み付けられたら、ペーストの分布および熱的性能をチェックする前に、モジュールを熱サイクルする必要があります。

熱サイクルでは、ヒートシンクの温度を室温(約 20°C)から 90±10°C まで上昇させ、室温に戻す事を 3 回繰り返します。システムが熱平衡に達するまでの加熱/冷却時間は通常 1 時間です。モジュールが組み付けられているヒートシンクを直接加熱冷却する事で、最も一貫した結果が得られます。

図 24: 熱サイクル(3 サイクル)のヒートシンク温度プロファイル



6.3 R_{th} 測定

図 3 が示す様に、サーマルペーストの有効性を最も直接的に評価するのは、熱抵抗への寄与です。ベースプレートを備えたモジュールでは、これには、ケース(ベースプレート)の温度をヒートシンク上の適切な基準点と共に測定できる、準備されたヒートシンク上の標準モジュールが含まれます。既知の電力損失に対して、 $R_{th(c-s)}$ / $R_{th(j-s)}$ を計算し、シミュレーション結果または様々なペースト間で比較できます。

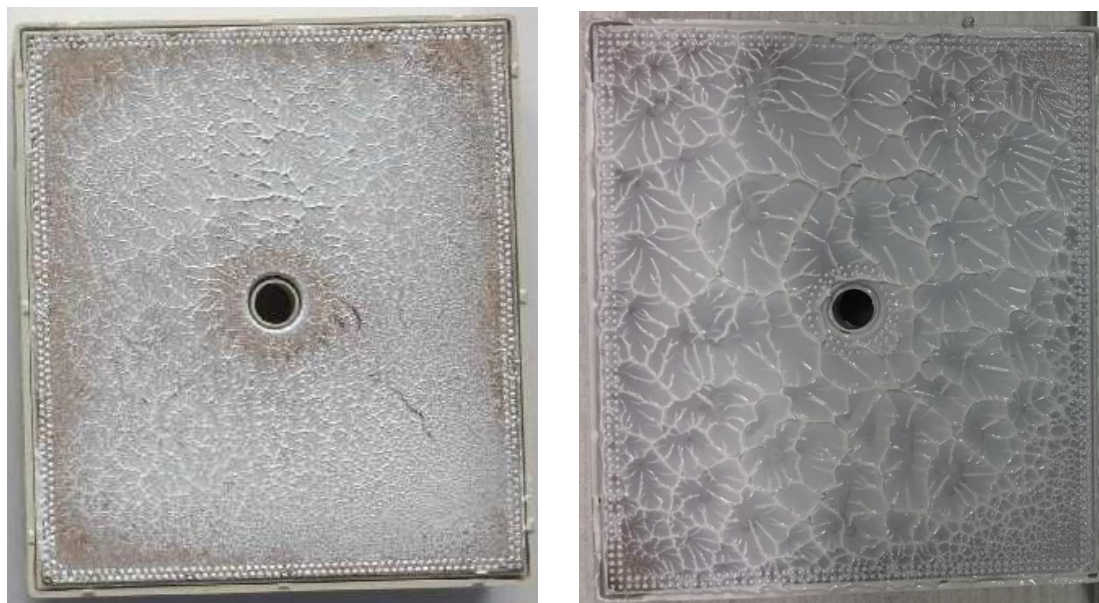
ベースプレートのないモジュールの場合、モジュール内の基準点(接合または基準点)を知る必要がある為、これはさらに複雑になります。これには、サーミスタとセンサーから基準点までの既知の R_{th} を備えたモジュール、またはチップ上の熱電対または赤外線カメラ (例: FLIR)へのアクセスを備えた特別に準備されたモジュールが必要です。両方のモジュールタイプの適切な基準点については、[4]に記述されています。

6.4 外観検査

モジュールを熱サイクルした後、モジュールを取り外して、ペーストが適切に分布しているかどうかを確認できます。モジュールを再使用または電氣的に評価する必要がある状況とは対照的に、この場合はペーストパターンを保存する為にモジュールを真っすぐにこじ開ける事が許可されます。この工程には、鋭利なプラスチック製のヘラを推奨します。ヘラをモジュールの端の少し下挿入し、少量の力を加えます。グリースの表面張力が解けるまでには時間がかかります。その時点でヘラをひねってモジュールをヒートシンクから真っすぐに持ち上げます。

適切な分布は、モジュール下面のペースト色が均一であり、ボイドがない事によって示されます(図 25L)。組付け穴の近くまたはモジュールの端の周りのペーストは通常、薄くなります。不適切な分布により、ペーストの濃度が高くなるとボイドや独特のパターンが生じます(図 25R)。余分なペーストがモジュールの端の周囲に存在したり、組付け穴に押し込まれたりする事もあります。許容できるペーストパターンと許容できないペーストパターンのその他の写真については、[3]を参照して下さい。

図 25: ペーストの正しい分布(L)および多すぎるペースト(R)



7. 寿命

7.1 排出

ペーストを沈降させるのと同じ加熱と冷却により、モジュールの下からサーマルペーストを押し出す、ポンプ作用も生じる可能性があります。ベースプレート金属の温度による膨張により、上下の動きが生じます(図 26 に示す簡略図)。ベースプレートのあるモジュールでは、ベースプレートのないモジュールよりも温度サイクル中のベースプレートの動きが大きくなる為、この影響は顕著になります。また、これは主にベースプレートが大幅な温度変化(ΔT)によって加熱および冷却される、十分な長い期間の高負荷サイクルに関連しています。

図 26: 排出を引き起す熱によるベースプレートの動きの誇張図

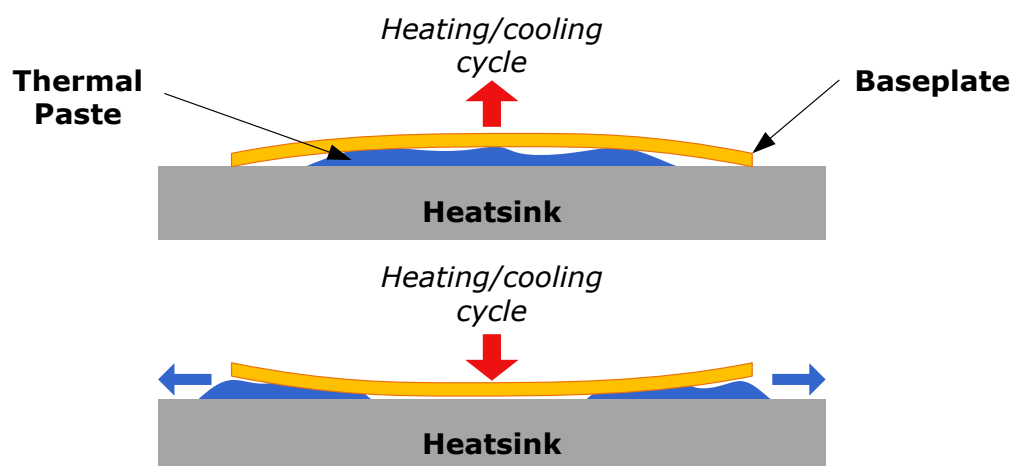


図 27: 熱サイクルを繰り返した後、SEMİTRANS モジュールの組付け位置に排出の兆候が見られる



排出に関連して、ペースト中のキャリアとフィラーが分離する現象が発生します。ペースト内では、個々のフィラー粒子がコーティング材料に包まれている為、キャリアオイルに結合したままになります。高温と湿度が高いと、このコーティングが破壊され、フィラーとキャリアが分離する可能性があります。上記の排出工程により、フィラーが移動します。図 28 で、モジュールの下側の光沢は、フィラーが分離して移動した後に、モジュールの底面に残ったシリコンオイルキャリアです。特定のペースト組成物は、他のペースト組成物よりもこの影響を受けやすい様です。長期にわたるパワーサイクル試験が、性能を評価する唯一の方法です。

図 28: 市場に於ける、高温動作後のキャリアオイルとフィラーの分離を示す SEMİTRANS モジュールの裏面



7.2 ヒートシンクの変色

熱サイクルによって生じる機械的動作の繰り返しにより、ヒートシンクとモジュール間の金属間の接触点が擦れる原因になります。アルミニウム製ヒートシンクの場合、これにより黒い跡や煤の色の粒子が形成される事がよくあります。図 29 は四隅の組付け穴の周囲にそのような跡が形成された事を示しています。これらの場所は、ネジの締め付け力により金属間の接触が最も強かった場所です。本質的に悪い事ではありませんが、このような跡の存在は激しい熱サイクルを示している可能性があります。

図 29: 激しい熱サイクルによるヒートシンクの黒い跡

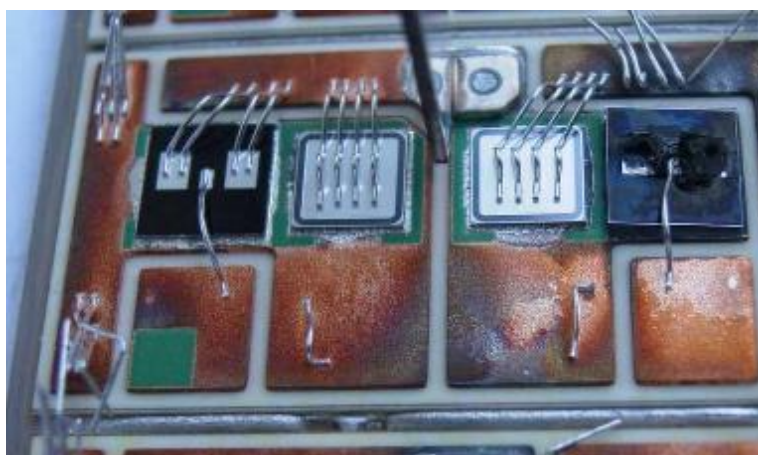


8. 故障モード

8.1 加熱

熱伝導材料が不適切に適用された場合、明らかな機械的損傷以外で最も一般的な症状は、モジュールが過熱する事です。温度センサーが組み込まれたモジュールは、動作中に警告できる場合がありますが、多くの場合、半導体チップに不具合が発生するまで加熱の兆候は見られません。不具合になったモジュールが分解されると、長時間にわたる過熱が銅の変色(図 30)や部分的に溶けて固まった(「リフロー」)はんだの形で見られる事があります。

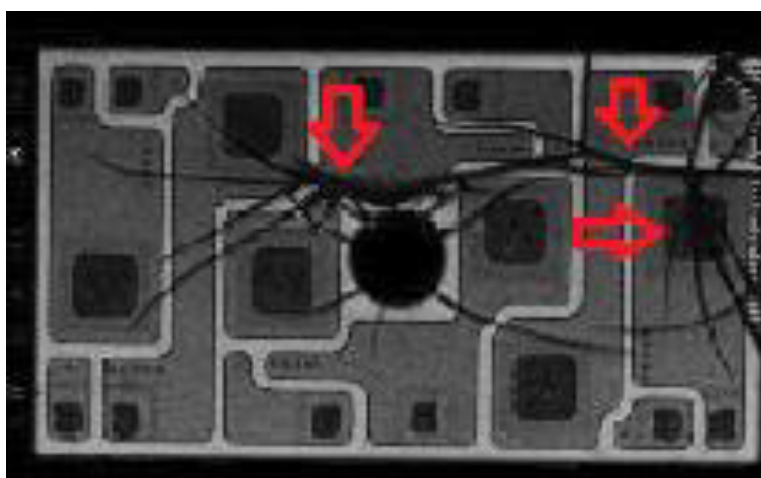
図 30: 長時間にわたる過熱による DBC 基板上的の銅の変色



8.2 セラミック基板のクラック

ペーストが多すぎると、熱的性能が損なわれるだけでなく、パワーモジュールに物理的な損傷を与える可能性もあります。ペーストを「押し出す」為に必要な力は、多くの場合、モジュールが設計された適切な組付け力よりも大きくなります。図 31 はモジュールの組付け前にヒートシンクに塗布された、サーマルペーストが多すぎる結果を示しています。余分なペーストは比較的非圧縮性である為、モジュールの下から逃げる事ができない場合、多大な圧力が蓄積する可能性があります。厚くて分散が不十分なペーストで形成される可能性のある、エアポケットにも同じ事が当てはまります。

図 31: 過度のサーマルペーストと不適切なネジ締め工程により、セラミック基盤にクラックが生じた SEMITOP3 モジュールの超音波顕微鏡(SAM) 画像。



ペーストの粘度とモジュールをネジ込む速度の組合せが、モジュールの基板にかかるストレスの程度に影響を与えます。粘度の高いペースト(混合が不十分、またはフィラーの含有量が多いもの)は、圧縮されても粘度の低いペーストほど速く動きません。従って、フィラー含有量が高いと想定される「高性能」ペーストを検討する場合は注意が必要です。さらに、自動ドライバーの速度に関する規則(モジュールの組付け説明書に記述)に従う必要があります。ドライバーの速度が速くなると、ペーストが流れる時間が短縮され、モジュール内の応力が増加します(図 32)。

図 32: ペーストが濃すぎる/粘度が高すぎる為に生じる、ベースプレートのないモジュール内の応力点(赤い矢印)

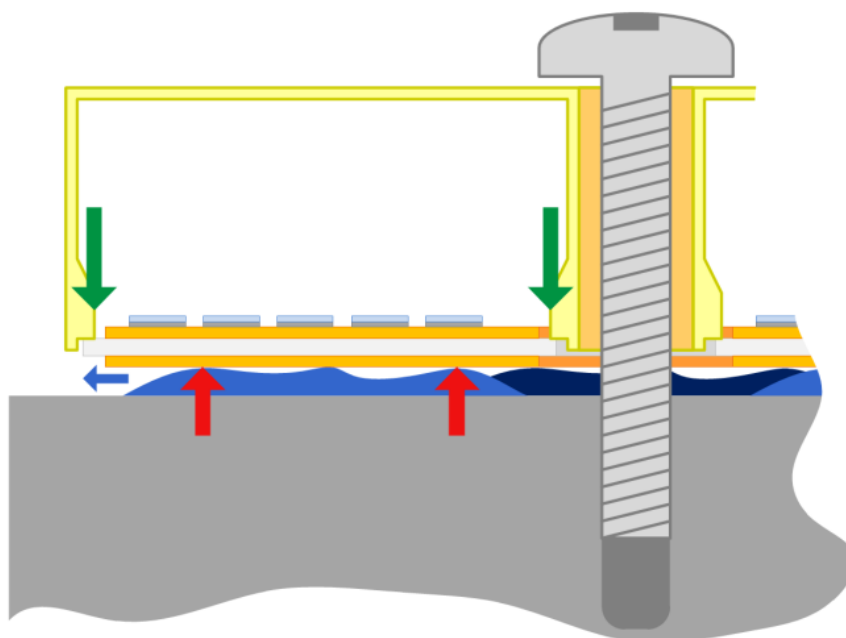


図 1: TIM を使用しないペースプレート-ヒートシンクの境界面の顕微鏡断面図(誇張)	2
図 2: ボイドを充填するサーマルペーストの顕微鏡図	3
図 3: ペースプレートあり(L)なし(R)のモジュールのサーマルペーストを含む熱抵抗の測定	3
図 4: ペーストの厚さとシステムの熱抵抗の関係	5
図 5: ローラー例	6
図 6: 硬質プラスチックトレイを使用して、ローラー上にペーストを塗布	6
図 7: MiniSKiiP モジュールへのペースト塗布	7
図 8: メッシュパラメータの定義	8
図 9: 脱脂したヒートシンクおよび糸くずの出ない布	9
図 10: スクリーンの浸水 (左から右へ)	9
図 11: 隙間が見えるスクリーンの下側	9
図 12: ペーストの塗布(右から左)	10
図 13: 完成したペーストパターン	10
図 14: ステンレス鋼ステンシルおよびモジュール底部のペーストパターン	11
図 15: ハニカムパターンの仕様	11
図 16: ステンシル全体にスクレーパーを引く前に塗布されたペーストの線	12
図 17: 同じペースト厚さを実現する為に、必要なスクリーンパターンとステンシルパターンの仮定の比較	13
図 18: 湿式膜厚ゲージ くし型タイプ(L)およびローラータイプ(R)	14
図 19: くし型ゲージの操作(側面図)	14
図 20: くし型ゲージの使用例。この図では、ペーストの厚さは 60~70 μ m の間です(ペーストの厚さが均一であると仮定)	15
図 21: ローラーゲージを使用して MiniSKiiP モジュール上のペーストの厚さを測定	15
図 22: ペンチトップ表面形測定装置システム(L)および MiniSKiiP モジュールでのスキャン結果(R)	16
図 23: ペースト塗布前(L)および塗布後(R)のモジュール重量の測定	16
図 24: 熱サイクル(3 サイクル)のヒートシンク温度プロファイル	17
図 25: ペーストの正しい分布(L)および多すぎるペースト(R)	18
図 26: 排出を引き起す熱によるペースプレートの動きの誇張図	18
図 27: 熱サイクルを繰り返した後、SEMITRANS モジュールの組付け位置に排出の兆候が見られる	19
図 28: 市場に於ける、高温動作後のキャリアオイルとフィルターの分離を示す SEMITRANS モジュールの裏面	19
図 29: 激しい熱サイクルによるヒートシンクの黒い跡	20
図 30: 長時間にわたる過熱による DBC 基板上的銅の変色	20
図 31: 過度のサーマルペーストと不適切なネジ締め工程により、セラミック基盤にクラックが生じた SEMITOP3 モジュールの超音波顕微鏡(SAM) 画像	21
図 32: ペーストが濃すぎる/粘度が高すぎる為に生じる、ペースプレートのないモジュール内の応力点(赤い矢印)	21
表 1: サーマルペーストを選択する際の考慮事項	4
表 2: 実験結果	8
表 3: MiniSKiiP モジュールのハニカムパラメータの例	12

記号と用語

記号	用語
λ	熱伝導率
$R_{th(x-y)}$	熱抵抗、点 x から点 y まで測定

用語と記号の詳細な説明は、「アプリケーションマニュアル パワー半導体」[2]を参照して下さい。

参考文献

- [1] www.SEMİKRON.com
- [2] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, "Application Manual Power Semiconductors", 2nd edition, ISLE Verlag 2015, ISBN 978-3-938843-83-3
- [3] S. Hopfe, "Technical Explanation Thermal Interface Materials", Rev. 01, SEMİKRON INTERNATIONAL GmbH 2016
- [4] A. Wintrich, "Thermal resistance of IGBT Modules – specification and modelling", AN-1404, Rev. 01, SEMİKRON INTERNATIONAL GmbH 2014
- [5] R. Weiss, "High voltage testing", AN 16-002, Rev. 00, SEMİKRON INTERNATIONAL GmbH 2016
- [6] D. Esau, "Thermal Paste Application", AN-10-001, Rev. 0, SEMİKRON INTERNATIONAL GmbH 2010

重要な情報および警告

本資料に記載されている情報は、製品の特性を保証するものではありません。本資料では、標準的なアプリケーションで期待されるセмикロンダンフォス製品の通常の特性のみを説明しますが、特定のアプリケーションによっては異なる場合があります。従って、製品は前もってそれぞれのアプリケーションに対して試験する必要があります。この結果、あらゆる種類のアプリケーションの調整が必要になる場合があります。セмикロンダンフォス製品のユーザーは、セмикロンダンフォス製品を組み込んだアプリケーションの安全性について責任を負い、セмикロンダンフォス製品が故障した場合でも、アプリケーションが人身事故、火災、その他の問題を生じさせない様に適切な安全対策を講じる必要があります。ユーザーはアプリケーションの設計および実現が、アプリケーションの範囲に適用される全ての法律、規則、規範、標準に準拠している事を確認する責任を負います。セмикロンダンフォスの認定代表者が署名した書面による、セмикロンダンフォスの明示的な承認がない限り、セмикロンダンフォスの製品は、製品の故障またはその使用による結果が、人身傷害に影響を及ぼす事が合理的に予想されるアプリケーションで使用する事はできません。

ここに記載されている情報の正確性、完全性、および/または使用に関して、第三者の知的財産を侵害していない事の保証を含むがこれに限定されない、いかなる表明も行われず、また責任も負いません。セмикロンダンフォスは、ユーザーのアプリケーションから生じる可能性がある、自社または第三者の特許権、著作権、企業秘密、その他の知的財産権を侵害していない事についていかなる表明も保証も行いません。本資料は、同等の内容および範囲を有する以前の全てのセмикロンダンフォスの情報に優先し、置き換えます。セмикロンダンフォスは、いつでも本文書を更新/または改訂する事があります。

Semikron Danfoss International GmbH
 Sigmundstrasse 200, 90431 Nuremberg, Germany
 Tel: +49 911 65596663
 sales@semikron-danfoss.com, www.semikron-danfoss.com