

平成27年度
革新的ものづくり産業創出連携促進事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「高効率冷却フィン・高温動作パワーモジュール構造の開発」

研究開発成果等報告書

平成28年11月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 公益財団法人ふくい産業支援センター

目 次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	3
1-3 成果概要	3
1-4 当該研究開発の連絡窓口	4
第2章 本論	5
2-1 サブテーマ【1】：TSV 冷却フィンの開発	5
2-2 サブテーマ【2】：DCP 基板の開発	8
2-3 サブテーマ【3】：高温耐性 IC チップ接合めっきの開発	11
2-3-1 【3-1】 高温耐性無電解 Ni-W-P/Au めっき条件の確立	11
2-3-2 【3-2】 高温 Pb フリーはんだ電解 SnSb めっき条件の確立	15
2-3-3 【3-3】 接合条件の確立	17
2-4 サブテーマ【4】：小型パワーモジュール構造の開発	18
第3章 全体総括	23
3-1 補助事業の成果及びその効果	23
3-2 補助事業の成果に係る事業化展開について	23

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

世界の電力消費拡大に伴い、省エネに不可欠なパワーデバイスの需要は今後ますます増加している。これまでパワーデバイスには主としてシリコン（Si）半導体が使用されてきたが、高電圧分野で使用できるような特性を得るには、材料自体の特性限界を迎えている。そこで注目されているのが、炭化ケイ素（SiC）に代表されるワイドギャップ半導体デバイスである。この半導体デバイスは、「高耐圧」、「低損失」、「高温動作」の特性を持ち合わせており、高電圧分野での使用も可能となる。また、電源部分の小型化にもつながるメリットもある。このSiCデバイスの特性を活かすためには、コンパクトな実装技術、効率的な放熱技術、高温耐性をもつ材料の技術開発も併せて必要となる。

このような市場要求、顧客要求を満たすために、本事業では、新冷却フィン構造を特徴とするパワーモジュールの製造技術の開発を行った。

当社の有するシリコン貫通孔（Through Silicon Via；TSV）へのめっき技術を適用することで、微小突起からなる新規冷却フィンを作製し、小型化でのSiCデバイスの冷却効率を高めることを目的とした。また、接合に関わるめっき膜そのものに耐熱性を付与し、高耐熱性材料によるコンパクトな実装技術を実現させることを図った。最終数値目標として、モジュール構造において、熱抵抗 $3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 以下を達成することとした。

本事業の実施においてその基礎となるノウハウや知見は、平成15～20年度に実施した文部科学省の都市エリア事業（福井まんなかエリア）を通して産学官連携活動により蓄積され、さらに現在は地域イノベーション事業（ふくいスマートエネルギーデバイス開発地域）の中で事業化に向けて取り組んできた内容から発展したものであり、共同研究、開発体制も信頼感を持って維持しており、迅速な事業推進を可能にしている。

1-2 研究体制

事業管理機関：公益財団法人ふくい産業支援センター

研究等実施機関・法認定事業者：清川メッキ工業株式会社（代表取締役社長：清川肇）

総括研究代表者： 技術部 課長・本多正二郎

副総括研究代表者： 第6製造部 主任・西出純一郎

サブテーマ【1】担当： 技術部 春木陽介、中川涼子

サブテーマ【2】担当： 技術部 小林侑樹

サブテーマ【3】担当： 第6製造部 主任・西出純一郎、主任・伊部敬史、
技術部 縫田知宏

サブテーマ【4】担当： 技術部 課長・本多正二郎、小林侑樹

アドバイザー：国立大学法人 福井大学、三社電機製作所

1-3 成果概要

本事業を推進するにあたり、検討内容を以下の4つのサブテーマに分けて検討を行った。

サブテーマ【1】TSV冷却フィンの開発

銅めっきによるTSV（Through Silicon Via）への充填めっき技術を活用し、3mm厚の小型銅（Cu）製冷却フィンを作製した。具体的には、貫通孔を有するSiウェハ基板に、

Cu による充填めっきを施し、その後 Si を化学的に除去することでフィン 1 層を形成し、そのフィンを 5 枚積層・接合することで、冷却フィンとした。

当初、従来当社で開発した工法を応用して充填めっきを行ったところ、Cu めっきの埋め込み性は良好であったものの、接合部が平坦にならず、積層構造が形成できなかった。そこで、接合性を改善した新たな工程（新工程）を開発し、条件検討を行った結果、埋め込み性と接合部の平坦性を両立したフィンの形成に成功し、それを用いることによって、冷却フィンの形成に成功した。

サブテーマ【2】DCP 基板の開発

TSV 冷却フィンと IC チップを搭載するための、Cu 貼り窒化アルミニウム (AlN) 基板を、めっきによって作製した。具体的には、AlN 基板の片面に、TSV 冷却フィンを接合するための Cu パッドを、もう一方の面に、IC チップを搭載するための Cu パッドを形成した。

まず、フォトリソグラフィーを用いてパターニングを行い、その低応力 Cu めっきを行うことで、Cu 厚さ 500 μm の、パターニングされた Direct Copper Plated (DCP) 基板を形成した。フォトリソグラフィーには、ドライフィルムレジスト (Dry Film Resist ; DFR) を用いて、厚さ 500 μm のパターニング条件の構築と検証を行った。Cu めっきに関しては、応力によって基板にクラックが入らないような、低応力のめっき液の選定と、特性評価を行った。

サブテーマ【3】高温耐性 IC チップ接合めっきの開発

従来用いられていたニッケル-リン合金 / 置換金 (Ni / Au) めっきに代わり、耐熱性の高い、ニッケル-タングステン-リン合金めっき / 置換金 (Ni-W-P / Au) めっきを採用するに当たり、Ni-W-P めっきの特性評価を行い、実際に IC チップを模した炭化ケイ素 (SiC) 基板にめっきを行った。その際、Ni-W-P めっきの条件を検討し、高温耐性やはんだ濡れ性、応力、プル強度といった諸特性を満足する皮膜を得た。

次に、高温接合材料として、スズ-アンチモン (Sn-Sb) 合金に着目し、接合のための合金めっきの条件検討と、めっき皮膜の高融点化を目指して検討を行ったが、高融点化は達成されなかった。その原因として、高融点化が不可能な合金形態であるという、物理的限界に起因していると結論付けた。

また、Sn-Sb 接合体の、接合強度試験についても未達成となっている。

サブテーマ【4】小型パワーモジュール構造の開発

接合材料の高融点化は達成されなかったが、TSV 冷却フィンと DCP 基板、および IC チップの接合条件の確立は実施し、小型パワーモジュール構造の構築に成功した。そして、パワーモジュールの実際の作動温度に合わせた接合部温度において熱抵抗試験を実施し、目標であった熱抵抗 3°C / W を下回ることを確認した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(間接補助事業者) 清川メッキ工業株式会社 技術部 課長 本多 正二郎
電話 0776-23-2918
FAX 0776-21-7402
E-mail honda@kiyokawa.co.jp

第2章 本論

2-1 サブテーマ【1】：TSV 冷却フィンの開発

本開発では、TSV 構造を活用した冷却フィンの開発を行った。 $\phi 100\ \mu\text{m}$ 、深さ $725\ \mu\text{m}$ の貫通孔を形成した 8 インチ Si ウェハに、TSV めっき技術を用いて電解 Cu めっきを充填し、下記の評価項目について評価した。

次に、電解 Cu めっき加工を終えた TSV ウェハについて、 70°C に加温した 30% 水酸化カリウム水溶液に 5 時間浸漬し、Si 部分を完全に溶解させ Cu フィン構造体を作製し、下記の評価項目について評価した。

<目標> 厚さ 3 mm の冷却フィンを作製する

<評価項目>

- ① 充填性： 貫通孔 Cu めっき内に $30\ \mu\text{m}$ 以上のボイド（空孔）なき事
（評価機器：X 線 CT）
- ② 膜厚均一性：貫通孔内の Cu めっき高さバラつきが $\pm 10\%$ 以内である事
（評価機器：レーザー顕微鏡）
- ③ Si 溶解性： Cu 埋め込み終えたウェハの Si 部を完全に溶解すること
（評価機器：拡大鏡）
- ④ 接合性： Cu フィン接合箇所にてボイド無き事
（評価機器：X 線 CT）

（評価結果①充填性）

貫通孔を有する Si ウェハに電解 Cu めっきを施し、X 線 CT 装置を用いて貫通孔内の Cu めっき充填性の確認を行った。図 1-1 にその結果を掲載する。

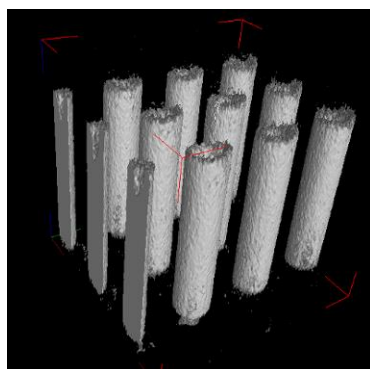


図 1-1 貫通孔部分の X 線 CT 像。

測定の結果、貫通孔内の Cu めっき皮膜中にボイド（空孔）などは確認されず、良好な Cu めっき充填性が得られていると判断した。

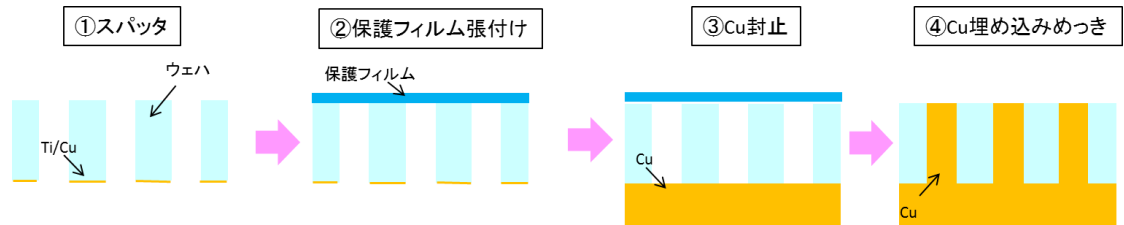
（評価結果②膜厚均一性）

8 インチ面内 5 点（ウェハ中央部 1 点、外周部 4 点）のビア上部の突出しためっき高さを測定した。高さ平均値 $55\ \mu\text{m}$ 、最大値 $105\ \mu\text{m}$ 、最小値 $-10\ \mu\text{m}$ となり、最大 133% の高さば

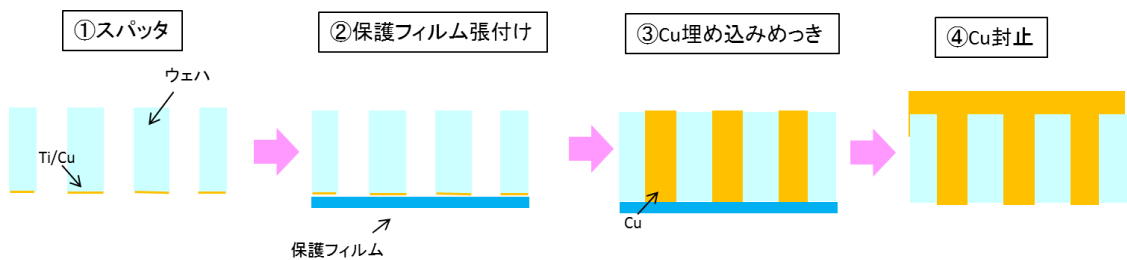
らつきが確認された。

膜厚均一性において、現状工法では評価基準の±10%を満足していない為、めっき工程の見直しを実施した。新工程フローについて、以下に記載する。

■従来工程



■新工程



新工程では、先にビア内に電解 Cu めっきを析出させた後、Cu 封止めつきを実施する。これによりビア内への Cu 埋め込みめっき時にビア上部高さバラつきが発生したとしても、Cu 封止めつきにより平坦化され課題とはならない。

追加評価として、同基板 $\phi 100 \mu\text{m}$ 、深さ $725 \mu\text{m}$ の貫通孔を形成した 8 インチ Si ウェハに、新工程にて電解 Cu めっきを行い、同様の評価を実施した。

(評価結果①充填性)

貫通孔を有する Si ウェハ上に新工程で電解 Cu めっきを施し、X 線 CT 装置を用いて貫通孔内の Cu めっき充填性の確認を行った。図 1-2 にその結果を記す。

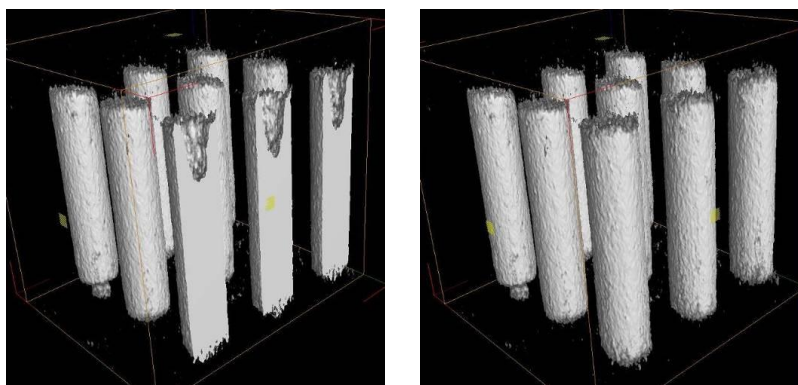


図 1-2 貫通孔部分の X 線 CT 像。

測定の結果、新工程においても貫通孔内の Cu めっき皮膜中に、ポイド（空孔）などは確認されず良好な Cu めっき充填性が得られている事が確認できた。

(評価結果②膜厚均一性)

8インチ面内5点(ウェハ中央部1点、外周部4点)のビア上部の突出しためっき高さを測定した。高さ平均値 $0.2\ \mu\text{m}$ 、最大値 $1\ \mu\text{m}$ 、最小値 $-2\ \mu\text{m}$ となり、最大6%の高さバラつきとなった。従来工程に比べ、新工程では、ビア上部突起の高さバラつきが軽減されていた。本結果より、めっき工程として新工程を採用することとした。

(評価結果③Si溶解性)

Si溶解処理後の外観を図1-3に記す。

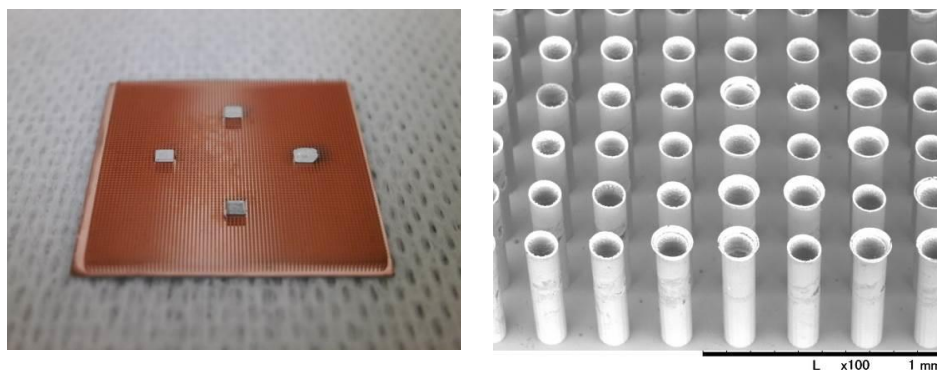


図 1-3 Si溶解後の全体像とフィンSEM像。

Cuフィン隙間のSiについても、拡大鏡にて全て溶解している事を確認した。また、Cuフィン構造の変形なども確認されなかった。但し、今回の新工程の場合、初期めっき成長過程よりフィン先端構造が擂鉢状になることが確認された。同構造となる要因として、初期めっき成長過程が影響しているものと推測される。初期めっき析出状態について、以下、図1-4にフィン先端のめっき析出状態の模式図を記す。

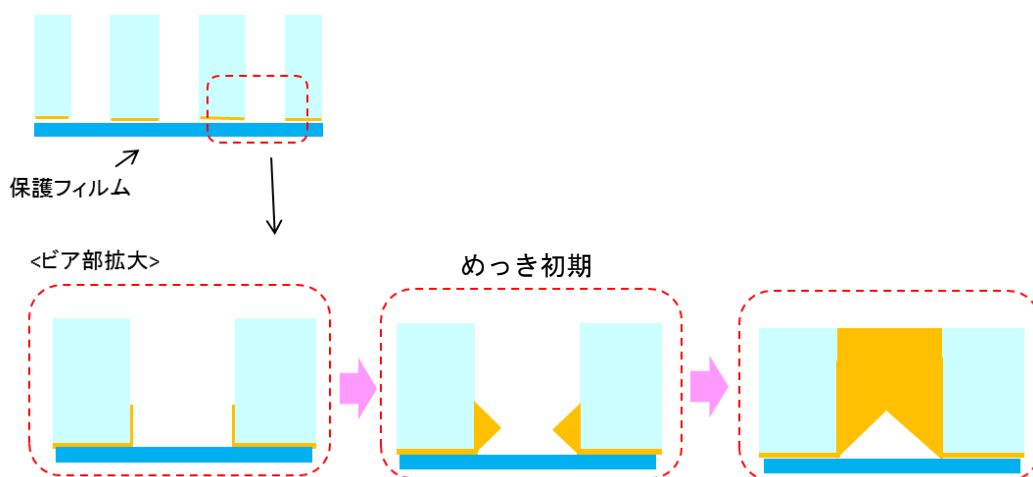


図 1-4 フィン先端構造の模式図。

次にSi溶解後のCuフィンを5層接合した。接合にはアニール装置を使用し、窒素雰囲気下にて 280°C 、30秒加熱処理を行った。得られたフィン構造体を図1-5に示す。各層が接合されており、脱落などが発生しないことを確認した。

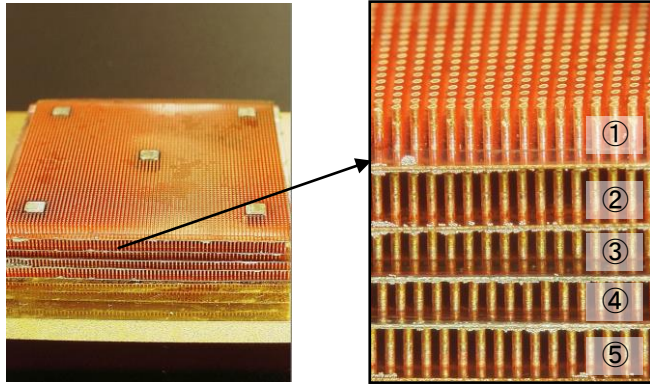


図 1-5 5層接合フィン構造体

(評価結果④接合性)

X線CT装置を用いて、Cuフィンチップ間の接合箇所について、接合性（ボイド有無）の確認を行った。図1-6にその結果を記載する。

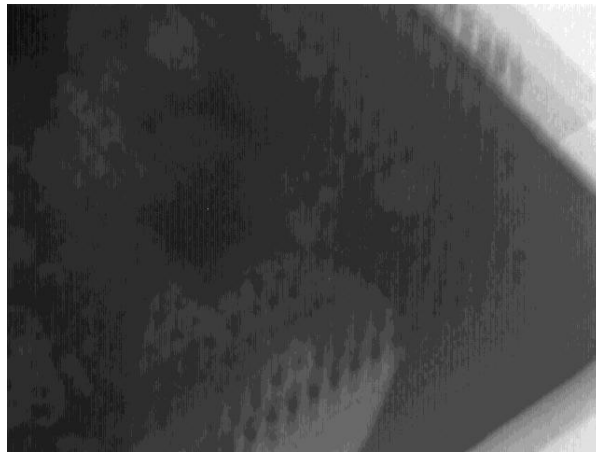


図 1-6 5層Cuフィン接合部のX線CT透視像。

フィン構造を積層しX線CT像を撮影した結果、各フィンが干渉し合う為、接合部の詳細な画像データを取得することが出来なかった。

<総括>

TSVへのめっき技術を応用し、高さ3mmの冷却フィン構造を形成することができた。5層フィン構造で接合後のX線CT撮影評価では、接合部の詳細なデータは取得することが出来なかった。ただし、特異な外観は確認されず、良好な接合性を有していると推測される。今後の課題として、各層の接合状態を確認するために、複数層構造におけるX線CT撮影条件の検討などが必要であると考えている。

なお、本検討によって得られた、接合性を改善したTSV新工程については、特許申請を行っており、権利化の手続きを進めている。

2-2 サブテーマ【2】：DCP基板の開発

本開発では、現行主流となっているDirect Copper Bonded (DCB)基板に比べ、放熱性や低応力の点で優位となるDCP基板の開発を行った。主要なポイントである、500μm以上の

DFR パターニング形成と、500 μm 厚の低応力銅めっきの実施について、検討を行った。

<目標> Cu 厚さ 500 μm の DCP 基板を作製する

<評価項目>



- ① パターン開口性 : パターン開口径狙い±10%以内である事
(評価機器：レーザー顕微鏡)
- ② 膜厚均一性 : めっき高さ狙い±20%以内である事
(評価機器：レーザー顕微鏡)
- ③ 電解 Cu めっき応力 : 1 kgf/mm² 以下であること
(評価機器：テストストリップ応力計)

AIN 基板の両面に厚さ 500 μm の DFR パターニングを施し、電解 Cu めっき及び電解 SnSb めっきを行った (SnSb めっきの詳細については後述する)。めっき膜厚測定には、レーザー顕微鏡を使用した。各評価結果を下記に記す。

(評価結果①パターン開口性)

電解 Cu めっきした AIN 基板両面の面内 5 点を測定した平均開口径結果を下表 2-1 に記す。

表 2-1 パターン開口径結果 (単位：mm)。



	パターン面	評価基準	実測値
大径面		開口径 縦25±10%以内 横25±10%以内	縦25.5 横25.7
小径面		開口径 縦11±10%以内 横11±10%以内	縦11.6 横11.5

評価基準を満たしており、良好な DFR レジスト開口径を有していると判断した。

(評価結果②膜厚均一性)

基板両面の面内 5 点を測定した平均値を下表 2-2 に記す。

表 2-2 電解 Cu めっき膜厚結果 (単位：μm)。

	パターン面	評価基準	実測値
大径面		高さ狙い 500±10%以内	489
小径面		高さ狙い 500±10%以内	512

面内めっき高さバラつきは約 18%であり評価基準を満たし、良好な膜厚分布を有していると判断した。

（評価結果③電解 Cu めっき応力）

テストストリップを用い、めっき直後の電解 Cu めっき皮膜応力の測定を行った。めっき液条件と応力測定結果を以下の図 2-1 に記す。電解 Cu めっき液中の添加剤濃度増加に伴い、めっき皮膜応力の増加傾向が確認された。目標値の 1 kgf/mm² 以下を満たす条件として、本工程のめっき条件は、添加剤無しめっき液を条件に選定した。

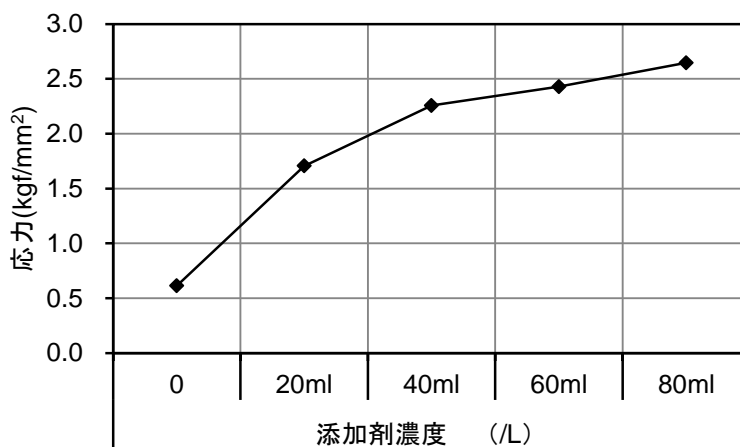


図 2-1 添加剤濃度によるめっき皮膜の応力変化。

電解 Cu めっき後電解 SnSb めっき成膜した AlN 基板を 35 mm 角にダイシング加工し、チップ化した。チップ化後の外観写真を以下の図 2-2 に記す。

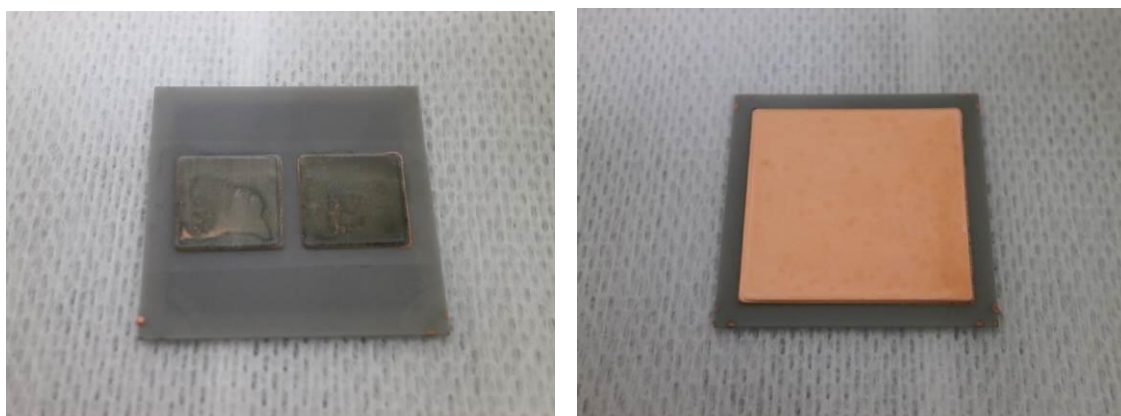


図 2-2 DCP 基板。

＜総括＞

AlN 基板に 500 μm の電解 Cu めっき膜及び電解 SnSb めっき膜を形成した。めっき形成後の AlN 基板にクラックなどは確認されず、Cu めっき 500 μm 厚の DCP 基板作製は可能であると判断した。

2-3 サブテーマ【3】：高温耐性 IC チップ接合めっきの開発

2-3-1 【3-1】 高温耐性無電解 Ni-W-P/Au めっき条件の確立

従来、Si デバイスの UBM としては Ni-P/Au が使用されているが、実装温度が 250°C を超える SiC デバイスの場合、Ni-P 皮膜にクラックが発生する。そこで、より耐熱性を見込める Ni-W-P/Au を Under Bump Metal (UBM) に用い、クラックを防止することを目的とした。また、はんだ接合を行った際に、十分なプル強度が得られることを確認した。

<目標> 250°C以上でクラック発生しないこと。

<評価項目>

- ① 高温耐性： 250°C熱負荷時にめっき皮膜クラックなき事
(評価機器：CCD)
- ② はんだ濡れ性： はんだ濡れ性が80%以上のこと
(評価方法：顕微観察)
- ③ はんだ喰われ量： Ni-W-P 残厚が 0.5 μm 以上のこと
(評価方法：断面 SEM)
- ④ 応力： 応力 100 kgf/N 以下のこと
(評価方法：テストストリップ法)
- ⑤ プル強度： 20 N/mm² 以上を達成すること
(評価方法：引っ張り試験器)

<サンプル作製>

SiC ウェハ上に Ti スパッタ膜 50 nm 及び Al スパッタ膜 1000 nm を成膜し、無電解 Ni-W-P めっき/Au めっきを行った。

(評価結果①高温耐性)

無電解 Ni-W-P めっき液温及び膜厚を各 3 水準設定したサンプル作製し、250°Cに加熱したホットプレート上に 30 分間放置した。めっき表面のクラック有無について CCD 像及び SEM 像にて観察を行った。下表 3-1 に結果を記す。

全てのサンプルにて NiWP めっき皮膜にクラックは確認されなかった。

作成したサンプルの高温耐性評価結果、約 250°C状況下にてクラックの発生しないめっき皮膜を有していると判断できた。

表 3-1 Ni-W-P 膜厚の外観。

		めっき膜厚		
		1um	2um	3um
NiWPめっき温度	70°C			
	80°C			
	90°C			

(評価結果②はんだ濡れ性)

NiP/Au めっき品と NiWP/Au めっき品のはんだ濡れ性及び喰われ量を比較した。めっき品にはんだボール(千住金属製)をのせ、約 280°Cにてリフロー処理を実施した。リフロー後のはんだ幅及び高さよりのはんだ濡れ性を算出した(図 3-3)。

$$\text{はんだ濡れ性} = (\text{はんだ幅} - \text{はんだ高さ}) / \text{はんだ幅}$$

各サンプルのはんだ濡れ性評価結果を表 3-2 に示す。評価の結果、評価基準を達成していた。

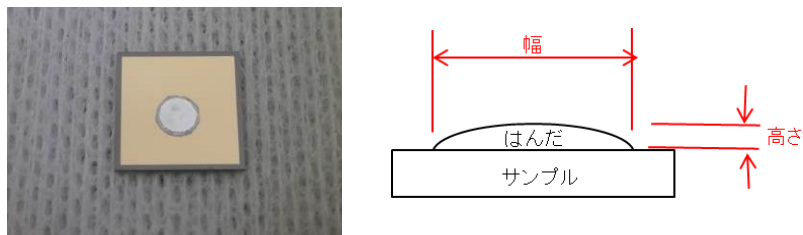


図 3-3 はんだ濡れ性評価中サンプルと、濡れ性算出の模式図。

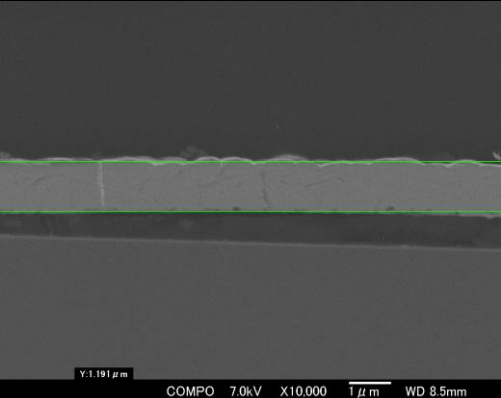
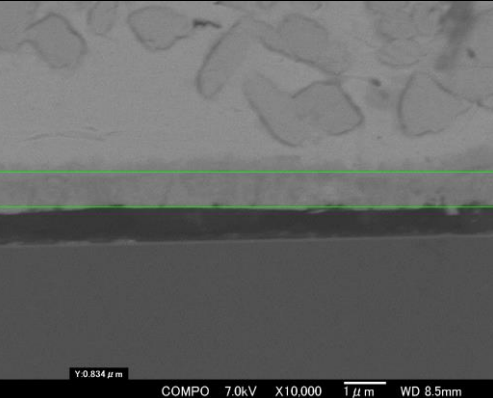
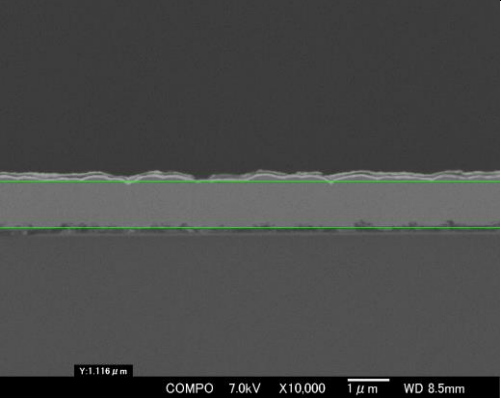
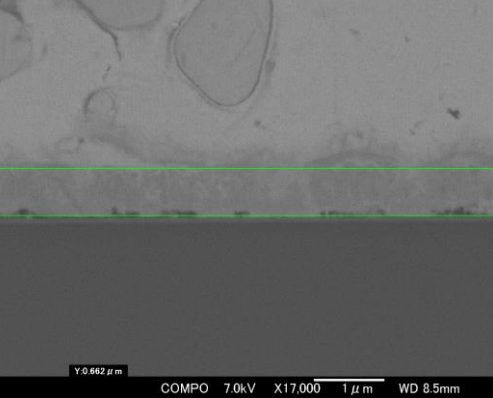
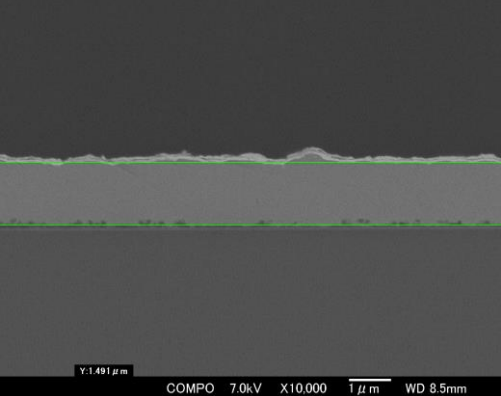
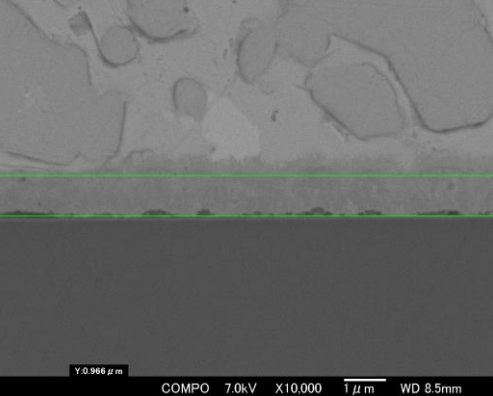
表 3-2 半田濡れ性評価結果。

NiWPめっき条件		はんだ濡れ性(%)		結果
液温	膜厚	測定値	判断基準	
70°C	1um	94.1	80%以上	合格
	2um	93.5		合格
	3um	94.4		合格
80°C	1um	93.7		合格
	2um	93.3		合格
	3um	94.4		合格
90°C	1um	94.1		合格
	2um	-		-
	3um	-		-

(評価結果③はんだ喰われ量)

評価②はんだ濡れ性評価サンプルにて、はんだ喰われ量の測定を行った。リフロー前後での NiWP めっき残膜厚を断面 SEM 像より確認し、はんだ喰われ量を算出した。各条件のはんだ喰われ量結果を表 3-3 に示す。

表 3-3 断面 SEM 像と、はんだ喰われ量測長結果。

	asplate	リフロー処理後	はんだ喰われ量 (μm)
70°C			0.357
80°C			0.454
90°C			0.525

はんだ喰われ量についても、リフロー後の NiWP めっき残厚 0.5 μm 程度が確認され、評価基準を達成できた。めっき液温度条件が高いほど半田喰われ量が増加する傾向が確認された。従来品の NiP めっき皮膜のはんだ喰われ量が約 1~2 μm 程度に対し、NiWP めっき膜の方が高温耐性に優れていることが確認された。

(評価結果④応力)

テストストリップ法にて NiWP めっき皮膜の応力を測定した。NiWP めっき液温度水準を 3 水準 (70°C, 80°C, 90°C) 比較検討した。その結果を図 3-4 に示す。

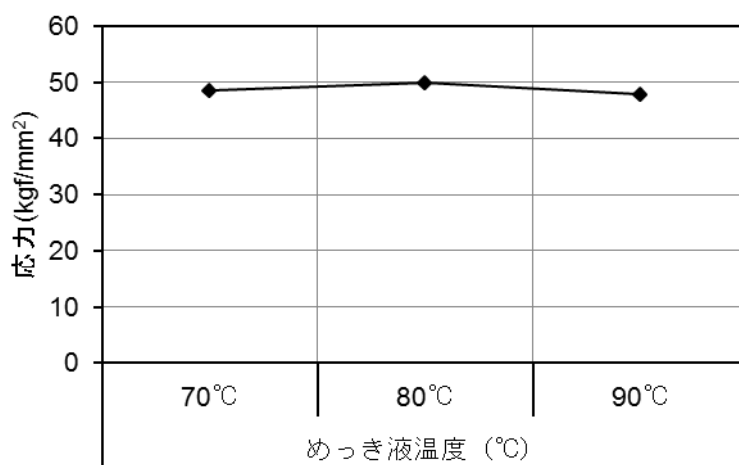


図 3-4 めっき液温度によるめっき皮膜の応力変化。

(評価結果⑤プル強度)

Si ウェハに無電解 NiWP めっき/Au めっき加工したものに引っ張り器具をはんだ付けし、引っ張り試験機にてプル強度測定を実施した。以下に引っ張り試験機及びプル強度後の破壊面 (基板側) の CCD 像を記す。(図 3-5、図 3-6)



図 3-5 引っ張り試験機。

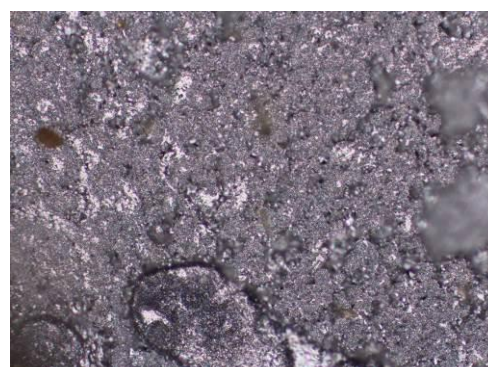


図 3-6 基板側破壊面 CCD 像(200 倍)。

プル強度測定後のサンプルにて破壊界面の分析を EDS 測定にて実施した。

結果、基板側の破壊表面の主元素は Sn であることを確認した。その為、プル破壊界面ははんだ-はんだ間であるものと推測される。すべてのめっき条件にて目標のプル強度 20 N/mm² を満たすことができた。その結果を図 3-7 に示す。

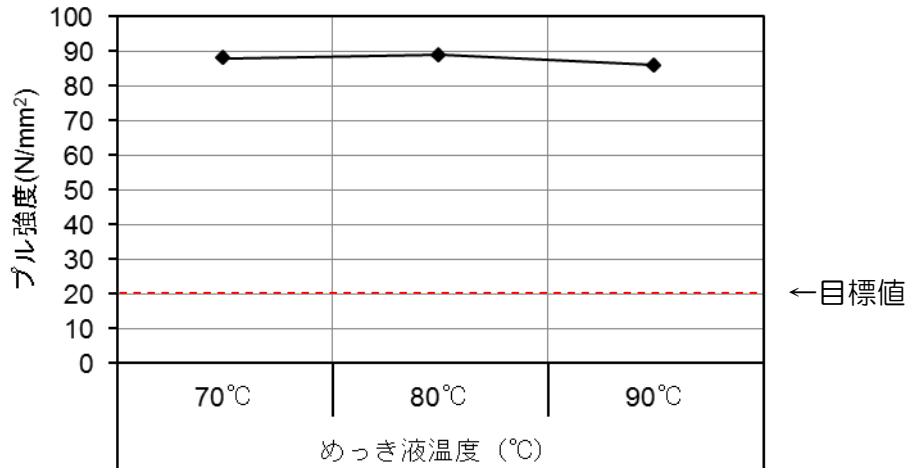


図 3-7 添加剤濃度によるめっき皮膜の応力変化。

2-3-2 【3-2】 高温 Pb フリーはんだ電解 SnSb めっき条件の確立

融点 280°C の AuSn はんだ材に代わる高温はんだ材として、SnSb はんだ材に着目した。本開発では、融点温度 300°C 以上となる SnSb めっき条件を確立するために Cu 板上に電解 SnSb めっきを行って評価を行った。

<目標> 融点 300°C 以上の SnSb はんだを作製する

<評価項目>

- ① 融点評価 : SnSb めっき皮膜の融点 300°C 以上の事
(評価機器 : DSC 示差走査熱量計)

(評価結果① 融点測定)

SnSb めっき液は、有機酸 Sn 塩と酒石酸 Sb カリウム、および各種添加材を含む液を使用した。めっき液の pH 条件及び電流密度条件を変化させて SnSb めっきを実施した。その結果、無光沢銀白色～黒灰色の皮膜を得た。蛍光 X 線を用いて成分分析を行ったところ、図 3-7 のような組成を得た。めっき液の pH が高いほど、また、電流密度が高いほど、Sb の含有量が増えていた。

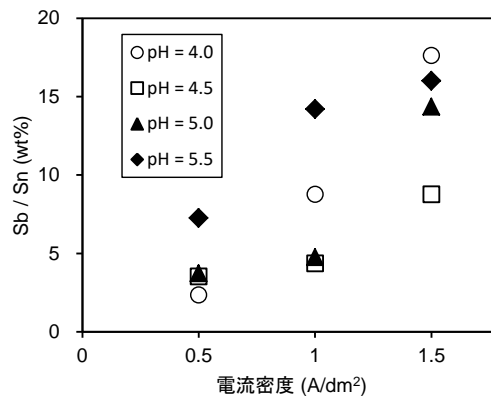


図 3-8 めっき液 pH と印加電流密度を変化させたときの皮膜中 SnSb 比率。

SEM を用いて表面を観察したところ、皮膜は、針状～立方体～塊状の微結晶となっており、

色が黒いほど塊状結晶が増えていた（図 3-8）。Sb 含有量が増えるほど、塊状結晶が増えると思われる。

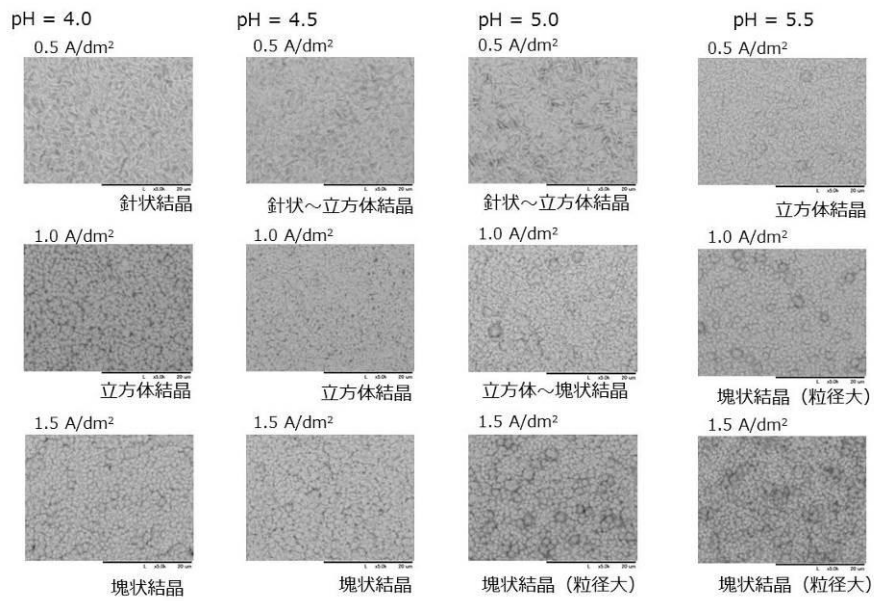


図 3-9 めっき皮膜の電子顕微鏡写真。

このうち、電流密度 1.5A/dm^2 でめっきを行った、 $\text{pH}=4.5$ 、 5.0 、 5.5 のめっきサンプル（Sb 比率はそれぞれ、 9 、 14 、 $16\text{wt}\%$ ）について、融点の測定を行った。各サンプルの測定結果を図 3-9 に示す。

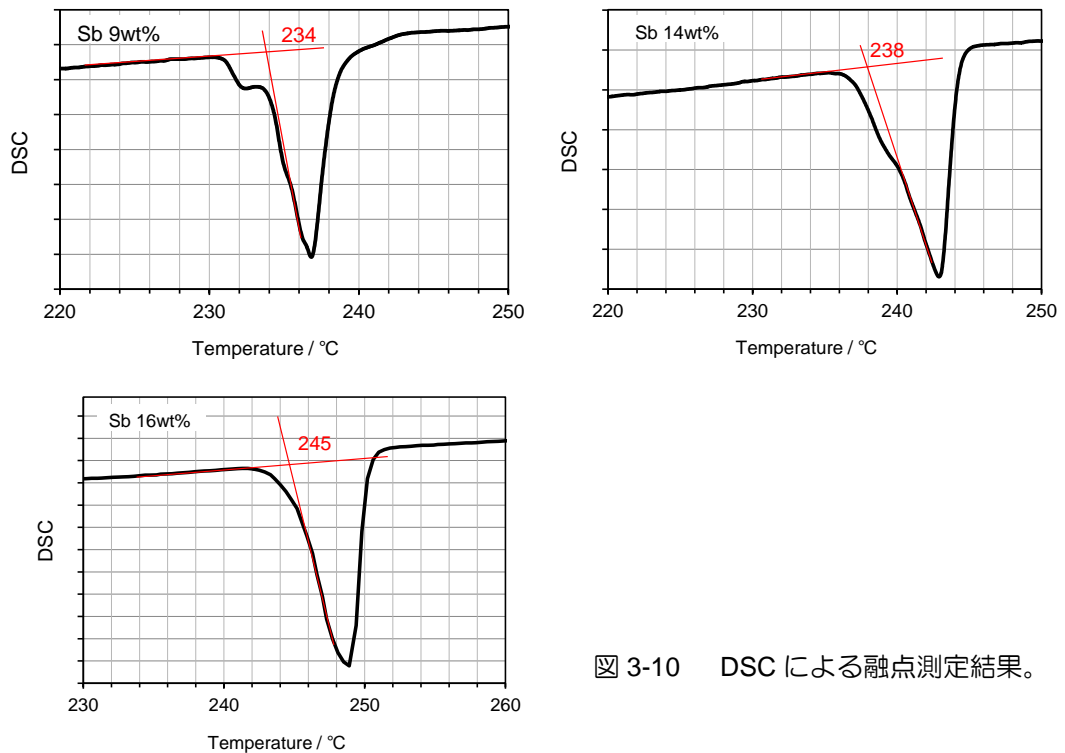


図 3-10 DSC による融点測定結果。

図中のように補助線を引き、融点を決定した。その結果、9%：234℃、14%：238℃、16%：245℃と、Sb 含有率増加に伴い融点の上昇が確認されたが、目標とした 300℃を達成したサンプルは見受けられなかった。

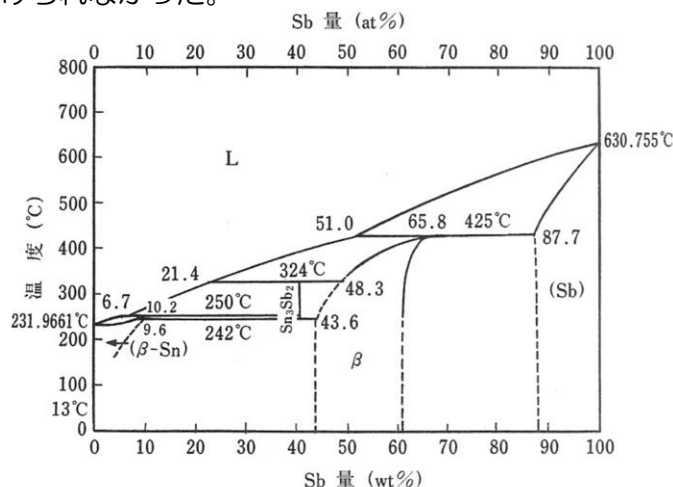


図 3-11 Sn-Sb 相図。

Sn-Sb の相図（図 3-14）によれば、Sb が 16wt%であれば、液体領域（「L」で示される範囲）から徐冷を行うと、280～300℃程度で最初の転移が見られる。しかし、この温度は、液体が固体に転移する温度ではなく、液体から、固体の SbSn 相と、液体の Sn-rich 相が混在する、固液共存領域への転移点となっている。さらに冷却を行い、242℃になって時点で、はじめてはんだが固体となる。Sb 量が 40wt%までは、Sb 量が増えても、はんだが固体となる温度は 242℃で一定であるので、熱力学的には、この Sb 量の領域では、300℃を超える高融点ははんだを形成することはできない。

また、その後の検討によって、Sn-Sb 皮膜は、加熱によって、Sn と SbSn への相分離が促進されることが判明した。即ち、何らかの形で Sb を過剰量添加したとしても、リフローなどの高温環境下に晒されることによって相分離が進み、Sb-Sn 粒子が分布する Sn-rich な低融点（242℃）皮膜となってしまいうため、目的を達成できないと思われる。

以上の結果より、本はんだめっき皮膜を、高融点はんだとして用いることは非常に困難であるといえる。

ただし、高温接合技術については、現在、別プロジェクトによって、300℃以上でも接合強度劣化のない代替技術を開発しており、特許化を進めている。本事業で検討を行った Sn-Sb 皮膜の代わりに、この新規技術を用いることによって、事業化について支障は出ないと考えている。

2-3-3 【3-3】 接合条件の確立

前項【3-1】で条件出しを行った Ni-W-P/Au めっき皮膜と、【3-2】にて作製した SnSb めっき皮膜の接合条件を確立した。

<目標> プル強度 20 N/mm² 以上を達成すること。

<評価項目>

プル強度： 20 N/mm² 以上を達成すること（評価方法：引っ張り試験器）

引っ張り試験器の引っ張り治具に SnSb めっきを行い接合する上で問題が生じたため、本項目は評価できなかった。その代替りとして、はんだ濡れ性の評価を行った。なお、本評価項目は未達成となったが、【4】の評価体作製に対しては、問題は発生しない。

(評価結果①はんだ濡れ性)

サンプルには、Si ウェハに電解 Cu めっき加工したものに、【3-2】で検討を行った Sn-16Sb めっき加工をしたものを使用し、ギ酸リフロー処理を実施した。リフロー炉としてギ酸リフロー炉を使用し、温度条件は図 3-10 に示すフローチャートのピーク温度及びピーク温度保持時間の $3 \times 3 = 9$ 条件にて評価した。外観変化については、図 3-11 に見られるように、リフロー後に皮膜表面が平滑になった (= はんだが溶融して接合可能な状態となる) サンプルを合格とした。その結果を表 3-4 に記す。

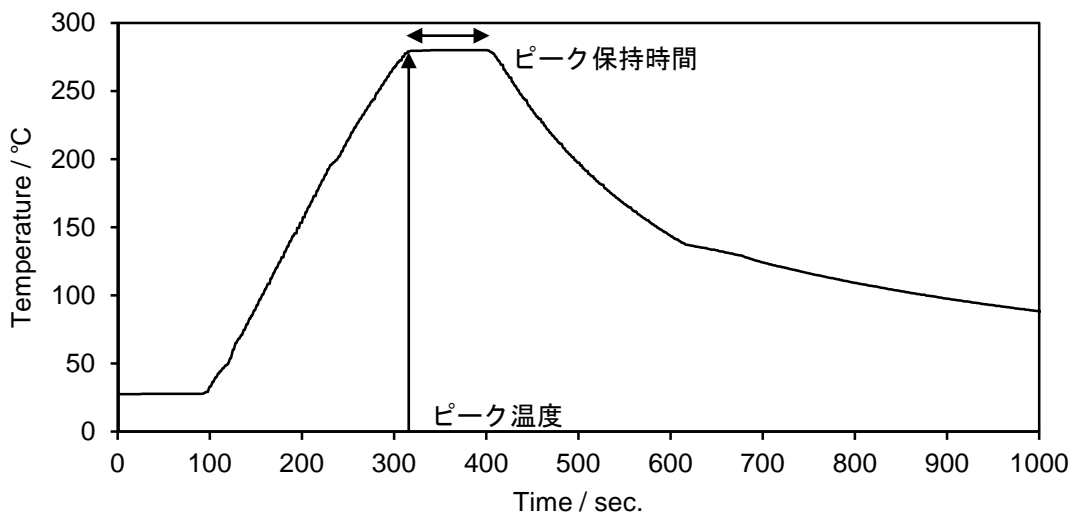


図 3-11 ギ酸リフロー温度フローチャート。

リフロー前



リフロー後

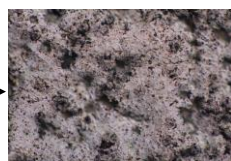


図 3-10 リフローによる外観変化

表 3-4 各条件における外観変化の有無。

		ピーク温度		
		250°C	280°C	300°C
ピーク 保持 時間	60sec	×	×	×
	90sec	×	○	×
	120sec	×	×	×

<総括>

今回プル強度の測定には至らなかったが、ギ酸リフロー条件ピーク温度 280°Cピーク保持時間 90sec にてリフロー処理を実施する事で、十分なはんだ濡れ性を得る事が出来た。

2-4 サブテーマ【4】：小型パワーモジュール構造の開発

①②③項にて完成した TSV 冷却フィン、DCP 基板、高耐熱材料による IC チップ接合品、及びベースプレートを接合しモジュール構造を形成した。

本開発の目的・目標として、以下の特性を目指す。

<評価項目>

① 熱抵抗評価： 熱抵抗値 $3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 以下

(評価結果①熱抵抗評価)

A) パワーモジュール構造体の形成

TSV 冷却フィン、DCP 基板、高耐熱材料による IC チップ接合品、およびベースプレート
をリフロー処理により接合した。接合後の外観写真を図 4-1 に記す。

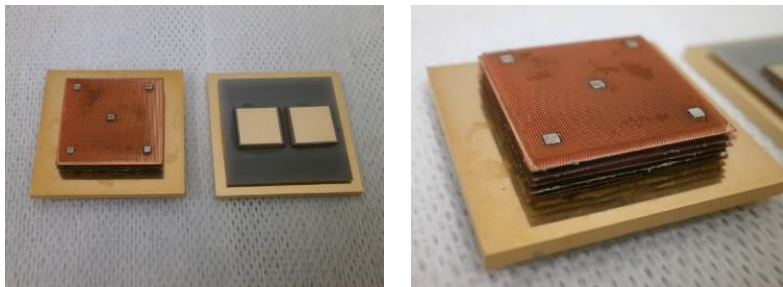


図 4-1 パワーモジュール構造外観

接合後の各パーツの歪みなどは確認されておらず、パワーモジュール構造体として形成できた。上記の完成したモジュール構造体にて、熱抵抗値の評価を実施した。比較構造物として、TSV 冷却フィンを接合しない、金属板のみの試料を作成した。

B) 評価装置

パワーモジュールの評価のために、以下に示すような評価機器を作成した (図 4-2)。パワーモジュールの、Ni-W-P/Au めっきを行った SiC 上に、熱伝導グリスを塗布し、アルミ板 (60x60x10 mm) に貼り付けた。アルミ板の反対側にヒーターを熱伝導グリスで貼り付け、整流器で電力を供給することで加熱を行った。Cu フィン以外からの熱の逸散を極力防ぐために、アルミ板は、熱伝導性の低いフッ素樹脂 (PTFE) の柱で固定し、さらに周囲を石英ウールで覆った。フィン上面については、アルミ板の上方 1 cm に厚さ 2 cm の PTFE 板を配置した。また、モジュールの載っていないアルミ板部分には、厚さ 5 mm のシリコンシートを配置した。

冷却に関しては、水平方向に空隙を作製し、気流を形成することで冷却を行った。風速は、フィン前方が 5 m/s、後方が 3m/s であった (平均 4 m/s)。

温度測定については、Al 板に穴を開け、熱電対を、モジュールから深さ 3 mm の位置に配置し、得られた値をジャンクション温度 (T_j) とした。また、フィンの風下直近に別の熱電対を配置し、得られた値を雰囲気温度 (T_a) とした。

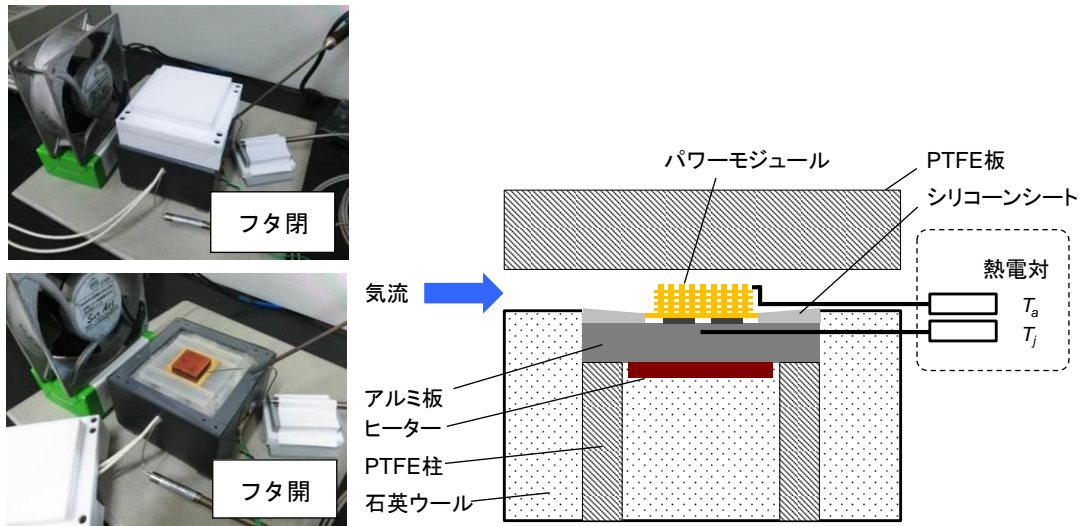


図 4-2 装置写真（左）と実験模式図（右）。

C) 測定値の評価

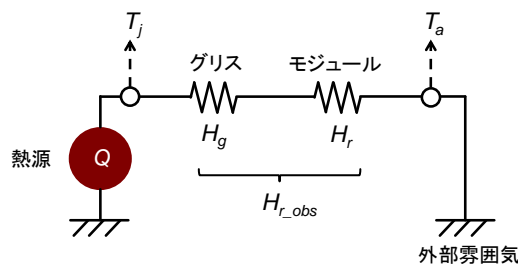
T_j と T_a から得られる熱抵抗 H_{r_obs} は、与えた熱量 Q を用いて、以下の式で求められる。

$$H_{r_obs} = \frac{T_j - T_a}{Q} \quad (1)$$

ただし、本来のモジュールは、SiC チップが発熱するのに対し、本評価系では、ヒーターによる熱がアルミ板を介して SiC チップに供給される。このとき、観測された H_{r_obs} には、アルミ板と SiC チップの間に存在する、熱伝導グリスの熱抵抗 H_g が加算されており、本パワーモジュールの熱抵抗 H_r は、 H_{r_obs} から H_g を差し引くことで求められる。

$$H_r = H_{r_obs} - H_g \quad (2)$$

なお、アルミ板自身の熱抵抗値は、これらの値よりはるかに小さいため、無視した。これらの関係を電気回路的な模式的に表すと、図 4-3 のようになる。



$$H_{r_obs} = H_g + H_r = \frac{T_j - T_a}{Q}$$

図 4-3 熱抵抗測定系を電気回路に置き換えた模式図。

本評価で使用した熱伝導グリスについては、理想的な熱抵抗（グリスを十分に薄く均一に塗布した場合）は $0.2^{\circ}\text{C}/\text{W}$ であるが、実際は塗布ムラや、厚塗りになってしまうことで、これよりも大きな熱抵抗を持つことになる。今回は、 $H_g = 0.4$ として、パワーモジュールの評価を行った。

D) 評価結果

40 W を印加した際の、測定温度の時間変化を図 4-4 に示す。概ね 2800 秒程度で定常に達した。このときの T_j と T_a から、 $H_{r,obs}$ 、 H_r を求めた。Q を変化させたときの T_j 、 T_a 、 $H_{r,obs}$ および H_r を表 4-1 に示す。熱抵抗値は 2.1~2.3°C/W となり、目標としていた 3°C/W を下回っていた。

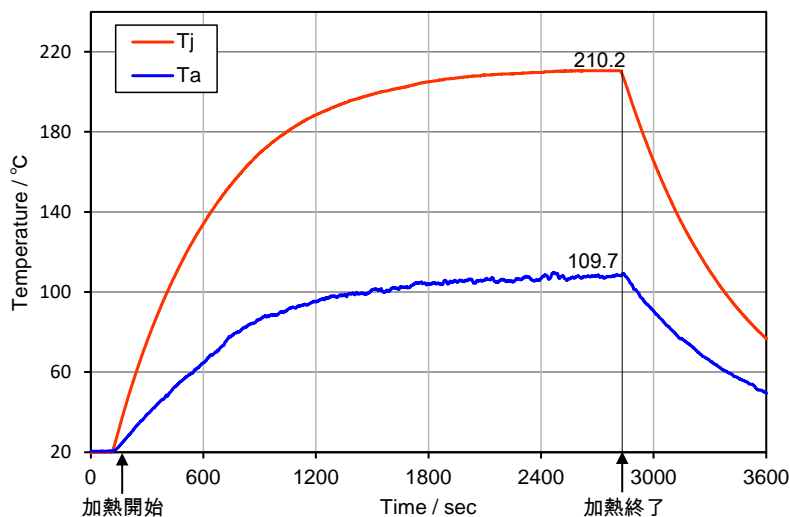


図 4-4 40W 印加時の、 T_j 、 T_a の時間変化。

表 5-1 各印加電力における定常状態の測定値と熱抵抗値。

Q (W)	T_j (°C)	T_a (°C)	$H_{r,obs}$ (°C / W)	H_r (°C / W)
40	210.2	109.7	2.5	2.1
35	195.5	108.0	2.5	2.1
30	170.6	93.4	2.6	2.2

また、電力 30 W の際に、Cu フィンと、金属板のみの場合の結果の比較を、表 5-2 に示す。金属板のみの熱抵抗は、3.7 °C/W となり、Cu フィンより高い熱抵抗値となった。また、それぞれの最高到達温度を比較しても、Cu フィンが最も低く、効率的に冷却がされていたと言える。加熱を終了した直後の温度降下の割合についても同様の結果となっていた (図 4-5)。

表 5-2 各印加電力 30 W における、モジュールと金属板の比較。

	T_j (°C)	T_a (°C)	$H_{r,obs}$ (°C / W)	H_r (°C / W)
Cu フィン	170.6	93.4	2.6	2.2
金属板	188.1	66.3	4.1	3.7

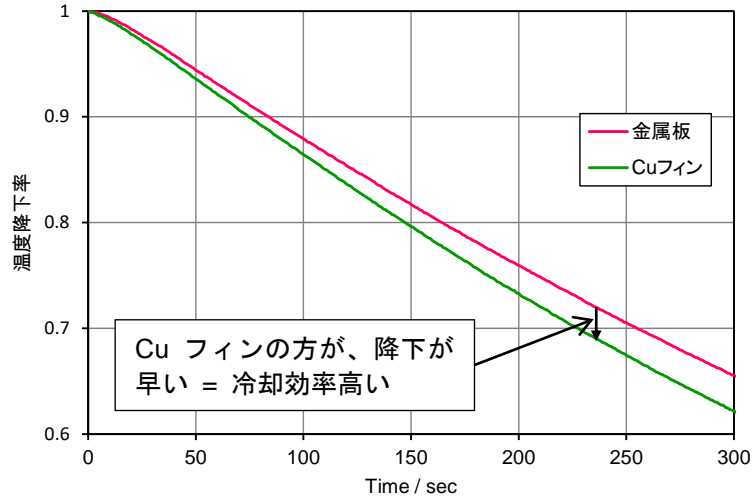


図 4-5 加熱を停止した直後の、Cu フィンと金属板のみの温度降下率（最高到達温度を 1、室温を 0 としたときの比率）。

E) 考察と今後の展開

本申請に沿って作製されたパワーモジュール体は、熱抵抗 $2.1\sim 2.3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ となり、目標としていた $3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 以下を達成していた。理由としては、1. 熱伝導性の高い Cu を使用している。2. TSV 技術を用いてフィンを作製することで、より広い表面積を得ることができ、空気への熱の受け渡しがよりスムーズに行われた。ことが挙げられる。

今後の改良点としては、気流の最適化が挙げられる。断熱箱の外側で排気温度を測定すると、 40°C 程度と、 T_a よりかなり小さい値を示した。これは、今回の評価系では、気流はフィンに水平方向に流れるものの、フィン内部より空気抵抗の小さい、フィンと PTFE の間に、より多くの気流が流れているために、気流が十分にフィンを冷却しなかったからと思われる（図 4-6）。効果的にフィン間に気流を作るような送風装置の設計によって、より効率的に熱を逃がすことが可能となり、さらなる熱抵抗の低減につながると考えられる。さらには、本申請の当初模式図にあったように、Cu ピラーを支える板状部分に穴を設け、上方から排気することによって、水平流通よりもさらに効率的な冷却が可能になると考えている。

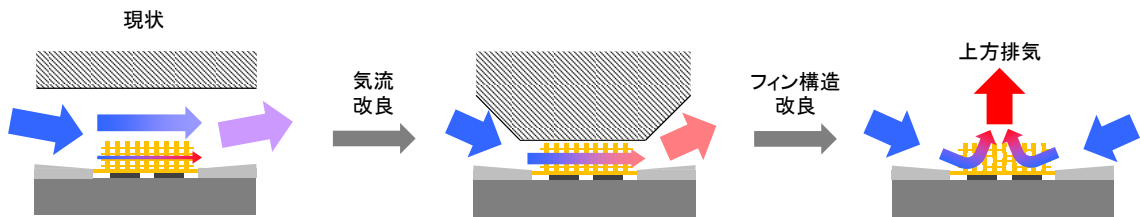


図 4-6 現状の評価系での推定エアフローと、エアフロー改善策。

第3章 全体総括

本事業では、TSV めっき技術と高耐熱めっき技術を組み合わせることにより、小型化を実現できる新冷却フィン構造のパワーモジュール製造技術を開発した。具体的には、以下の4つのサブテーマについて実施し、本事業で得られたパワーモジュール構造が、目標とした性能を示すことを確認した。また、一部の未達成項目については、その後の当社における、別プロジェクトによって開発されている代替技術によって、克服できる目途が立っており、事業化に際しての支障となることはないと考えている。

3-1 補助事業の成果及びその効果

サブテーマ【1】『TSV 冷却フィンの開発』

銅めっきによる TSV への充填めっき技術を活用し、3 mm 厚の小型 Cu 製冷却フィンを作製した。具体的には、貫通孔を有する Si ウェハ基板に、Cu による充填めっきを施し、その後 Si を化学的に除去することでフィン 1 層を形成し、そのフィンを 5 枚積層・接合することで、冷却フィンとした。

サブテーマ【2】『DCP 基板の開発』

TSV 冷却フィンと IC チップを搭載するための、Cu 貼り AlN 基板 (DCP 基板) をめっきによって作製した。

サブテーマ【3】『高温耐性 IC チップ接合めっきの開発』

高耐熱性の、Ni-W-P /Au めっきを、IC チップを模し SiC 基板にめっきを行った。その際、Ni-W-P めっきの条件を検討し、高温耐性やはんだ濡れ性、応力、プル強度といった諸特性を満足する皮膜を得た。

高温接合材料である SnSb めっきについては、高温化が未達成となっている。こちらについては、現在、当社にて、300℃以上でも強度劣化のない高温耐性接合技術を開発しており、こちらを用いることで、事業化展開に支障はないと考えている。

サブテーマ【4】『小型パワーモジュール構造の開発』

TSV 冷却フィンと DCP 基板、および IC チップの接合条件の確立は実施し、小型パワーモジュール構造の構築に成功した。そして、パワーモジュールの実際の作動温度に合わせた接合部温度において熱抵抗試験を実施し、目標であった熱抵抗 3℃/W を下回ることを確認した。

3-2 補助事業の成果に係る事業化展開について

(1) 想定している具体的なユーザー、マーケット及び市場規模に対する効果

開発技術の具体的なユーザーとしては、モジュールメーカーとして、三社電機、三菱電機、東芝、日立製作所、富士電機、サンケン電気、ルネサスエレクトロニクスなどを想定している。また、開発するパワーモジュールの自動車用市場は平成 32 年度に約 125 万個であると想定している。

(2) 事業化見込み (目標となる時期・売上規模)

平成 31 年度に上市し、平成 32 年度に売上規模 2.4 億円 (シェア約 30%) を目指している。