

平成30年度  
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「高周波 GaN の高放熱拡散・密閉パッケージ技術の研究開発」

研究開発成果等報告書

令和元年5月

担当局 九州経済産業局  
補助事業者 公益財団法人くまもと産業支援財団

## 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)背景	3
(2)研究目的および目標	3
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	5
(研究体制・管理体制)	
(研究者氏名・協力者)	
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
第 2 章 本論	7
(1)プラスチックと金属の接合技術	7
(2)グラファイト放熱板構造の最適化	10
(3)完全密封パッケージ開発	13
第 3 章 全体総括	15
(1)研究開発成果	15
(2)研究開発後の課題	15
(3)事業展開	15

## 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

#### (1) 背景

本研究開発のターゲット市場である移動体無線通信においても、通信トラフィックに大きな部分を占めるデータ量の増大に対応し、所謂、電波資源を有効に利用する為に周波数、時間、空間の多重化方式が用いられる。第 4 世代(4G)、第 5 世代(5G)といった世代毎に多重化(図 2)が進んでいる。基地局のパワーアンプは、平均電力とピーク電力の比(Peak to Average Power Ratio)が大きい、つまり、広いダイナミックレンジで、高い線形性が求められる。無線通信基地局パワーアンプとしては、ピーク電力時のみならず、平均電力時の電力付加効率の向上と共に、放熱性を改善することは、極めて重要になる。

#### (2) 研究目的および目標

信号の多重化の為に帯域が確保出来る高周波領域で、より大きな出力電力、そして、より良い線形性を得るために、GaN(窒化ガリウム)トランジスタを用いたパワーアンプの採用が始まっている。GaN トランジスタを用いたパワーアンプは、その高電圧動作により、従来の GaAs(ガリウムヒ素)や Si(シリコン)-LDMOS(横方向拡散型 MOS)デバイスに比べて、1/10~1/5 程度に小型化することが出来る。しかし、GaN トランジスタチップサイズを小さくすることで、動作チャネル温度の上昇、信頼性の低下を招くことになり、放熱性を高める革新的な放熱技術が必要となる。この課題を解決するために、高周波特性に優れた高放熱拡散の安価なプラスチック密閉パッケージが求められている。

##### 1) プラスチックと金属の接合技術

温度サイクル前後でのグロスリークの無い十分な接合強度、及び、リード引き抜き強度を得ることはもちろん、加工コスト最小化も含めて、実用化を目指す。(目標値) 温度サイクル前後でグロスリーク無きこと、半田による実装において、半田がパッケージ内部に浸透しないこと。

##### 2) グラファイト放熱板構造の最適化

本命の 200W パッケージ開発において、熱伝導度や線膨張係数に異方性の制限の元、XZ と YZ のグラファイト構造、及び、メタル厚について、中央電子工業、及び、サーモグラフィティクス社と、共通の熱伝導シミュレータを導入して、高い熱伝導性を引き出し、かつ、

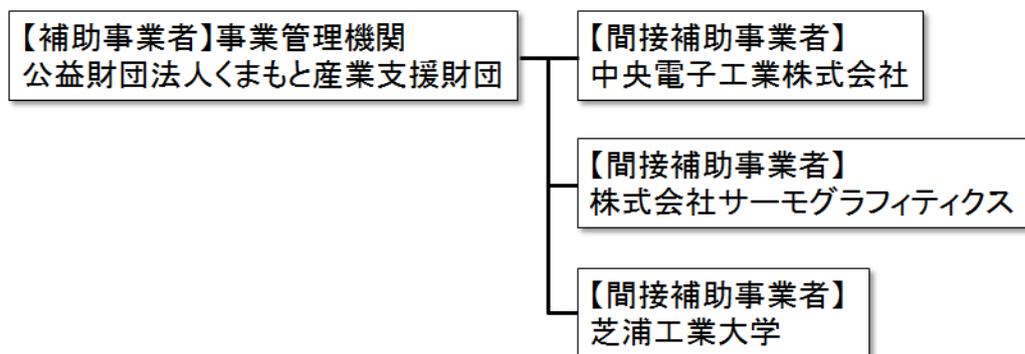
半田付けが可能なメタライズを併せた構造最適化を行うことで、従来の銅複合材に比べて、 $\Delta 50^{\circ}\text{C}$ 程度の低チャネル温度を実現する構造を見出すこと。

### 3)完全密封パッケージ開発

トランスファーモールドの樹脂バリの除去として、レーザーによる厚バリ取り、電解バリ取り、高水圧によるバリ取り・洗浄を行う工程で、バリの完全除去を行い、かつ、メッキを密着させる。この検証として、外観、ダイボンド、ワイヤボンド性を確認する。さらに、実際の GaN HEMT を搭載した実製品同等状態で、マイクロテクスチャ構造、放熱板構造、パッケージスループロセス全体で、十分な信頼性を確認して、パッケージとして実用化を目指す。(目標値) 一連のバリ取りを含むスループロセスを通して、温度サイクル前後でのグロスリーク無きこと、及び、熱抵抗の経時変化無きこと。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

（研究組織、管理体制）



（研究者氏名）

中央電子工業株式会社

氏名	所属・職	実施内容
齋藤 靖雄(PL)	電子デバイス事業部・事業部長	1-1、1-2、2-1、2-2、 3-1、3-2
長谷川 秀晴	電子デバイス事業部開発部・部長	1-1、1-2、2-1、2-2、 3-1、3-2
栗山 修也	電子デバイス事業部開発部・課長	1-1、2-1、3-1、3-2
上辻 喜敬	電子デバイス事業部開発部・担当課長	3-1、3-2
尾崎 隆	電子デバイス事業部開発部・主任	3-1、3-2
田中 翔太	電子デバイス事業部開発部	2-1、2-2、3-1、3-2
岡部 恭平	電子デバイス事業部開発部	1-1、1-2、3-1、3-2

株式会社サーモグラフィティクス

氏名	所属・職	実施内容
野上 美郎(SL)	代表取締役	2-1、2-2、3-1、3-2

学校法人芝浦工業大学

氏名	所属・職	実施内容
相澤 龍彦	デザイン工学部デザイン工学科・研究員	1-1、1-2、3-1、3-2
吉原 正一郎	デザイン工学部デザイン工学科・教授	1-1、1-2、3-1、3-2

（協力者）

社名・学校名	協力内容
A 社（半導体デバイス製造）	パッケージに関するアドバイス
学校法人豊田工業大学 教授 岩田 直高	GaN デバイスの物性、プロセスの専門技術に関するアドバイス
株式会社リョーサン マネージャー 鳥養 政博	マーケティングに関するアドバイス

### 1-3 成果概要

(1)プラスチックと金属の接合技術: 金属とプラスチックの接触面積を当初目標に対して 35%減の仕様でのレーザーマイクロテクスチュア形成、かつ、構築したスループロセスで試作したサンプルにて、温度サイクル前後でのグロスリークの無い十分な接合強度、及び、リード引き抜き強度を得ることを達成した。また、加工コスト最小化に向けて、レーザー加工同様のパターンを反転した型を作り、プレス加工によるマイクロテクスチュア形成においても実用化の目処がたった。

(特許出願中：特願 2019-028009)

(2)グラファイト放熱板構造の最適化: 本命の 200W パッケージ開発において、YZ のグラファイトを銅でラミネートした構造の放熱板にて、75W GaN チップ x1 個搭載品で 1.8°C/W、一方、従来放熱板では 2.6°C/W の測定値を得た。また、75W GaN トランジスタ x2 個搭載品では、上記構造放熱板で熱抵抗 0.86°C/W、チャンネル温度 153°C、一方、従来放熱板では熱抵抗 1.14°C/W、チャンネル温度 193°Cの simulation 値を得た。この場合、440°Cのチャンネル温度の低減が可能である。

(3)完全密封パッケージ開発: (1)で決定したマイクロテクスチュアパターンと、(2)で決定した放熱板構造を採用して、トランスファーモールドの樹脂バリの除去として、レーザーによる厚バリ取り、電解バリ取り、高水圧によるバリ取り・洗浄を行う工程で、樹脂バリの除去を行い、かつ、Ni/Au メッキを施した中空パッケージを試作して、さらに、パッケージの出来栄え検証として、GaN トランジスタのダイボンド、ワイヤボンドを行った実製品同等状態で、温度サイクル前後でのグロスリーク無きこと、及び、熱抵抗の経時変化無きことを確認した。

### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

中央電子工業株式会社 電子デバイス事業部長 斎藤靖雄

TEL: 0964-32-2730, E-mail: yasuo.saito@cdk.co.jp

## 第2章 本論

### (1) プラスチックと金属の接合技術

通常の半導体パッケージでは、基板の上にダイボンディング、ワイヤボンディングを行い、モールドングが行われている。このモールドングは、チップやワイヤの周囲にまで樹脂等が充填された中実型のものが広く採用されている。しかしながら、中実型のモールドングを行うと、チップ周辺の封入樹脂等のより、チップの性能が低下する場合がある。このため、チップ周辺に中空部が設けられる中空パッケージが採用される場合もある。

従来の中空パッケージは、枠体はセラミックで多層セラミック焼成に耐えるタングステンにリード金属をロウ付け。ロウ付温度が高く、外形の歪みが大きく、パッケージの多連化が困難であった。一方、中空プラスチックパッケージは、プラスチック枠体とリード金属、および、チップが固定される基板を一体形成するので、工程がシンプル、かつ、外形精度が高く、多連化が容易に実現出来る。

中空プラスチックパッケージにおいて、チップが固定される基板の放熱性を改善させるために従来と異なる放熱板を用いるとき、この放熱板の形状をシンプルな板状となっている平滑な基板に、枠体のプラスチックを接着させようとするとき、基板と枠体の材料が異なることから、界面が起点となって局所剥離。部分剥離あるいは全面剥離が生じやすくなる。

本研究開発では、金属でラミネートされたグラファイト放熱板とプラスチックの接合におけるアンカー効果をもつマイクロテクスチャ構造、及び、そのレーザー加工、さらに、加工コスト最小化に向けて、レーザー加工同様のパターンを反転した型を作り、プレス加工によるマイクロテクスチャ形成の研究開発を行うことで、GaN トランジスタ用の中空パッケージ(図 1)の開発を行った。

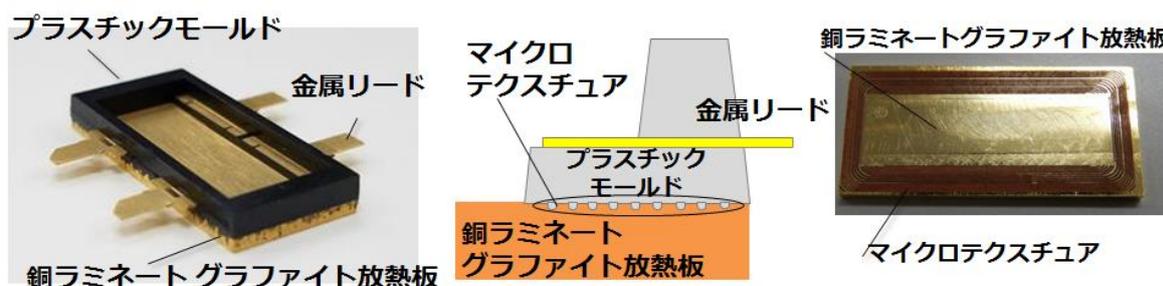


図 1 高周波特性に優れた高放熱拡散の安価なプラスチック密閉パッケージ

4種類のマイクロテクスチャ構造(表 1)をレーザー加工で放熱板に形成した。高い加工品質が得られるピコ秒レーザーを用いることで、マイクロテクスチャ断面形状(図 2)は、20umの深さの三角形状で周辺はバリの無いフラットな形状であることを確認した。

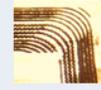
試料	ライン幅	ライン深さ	ピッチ	出来栄
1本の三角形状の溝パターン (A)	16um	21um	N/A	
3本の三角形状の溝パターン (B)	17um	22um	20um	
斜線状の三角形状の溝パターン(C)	18um	19um	20um	
複数本の三角形状の溝パターン (D)	30um	70um	35um	

表 1 レーザーによるマイクロテクスチャを施した試料

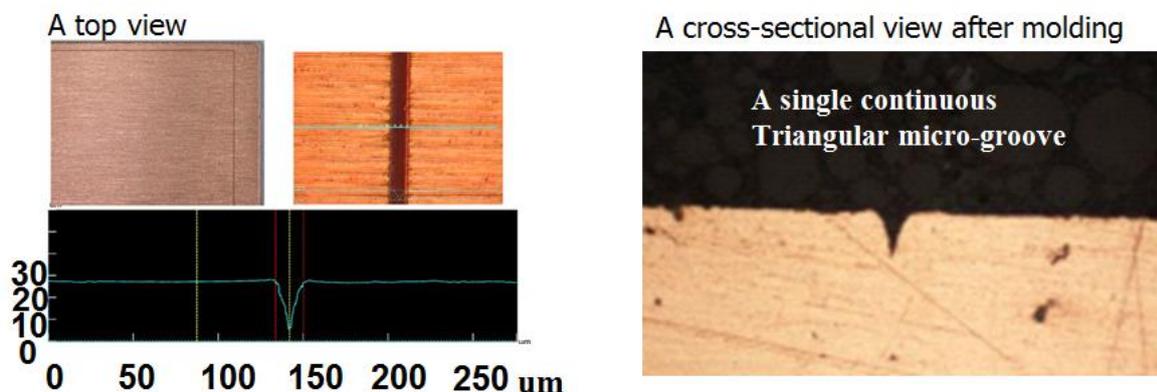


図 2 マイクロテクスチャ 表面、及び、断面出来栄

この 4 種類のマイクロテクスチャ構造の放熱板、プラスチック枠体、リード金属と一体形成を行った後に、温度サイクル試験前後で、グロスリーク試験(表 2)を行った。その結果、4 種類全てにおいて、温度サイクル前後共に、リークは観測されなかった。バリの無いフラットな接合面で、マイクロテクスチャを形成することで、半導体パッケージとして十分な接合性が確認出来た。また、十分なリード引き抜き強度と半田実装によって半田の浸漬無きことを確認した。

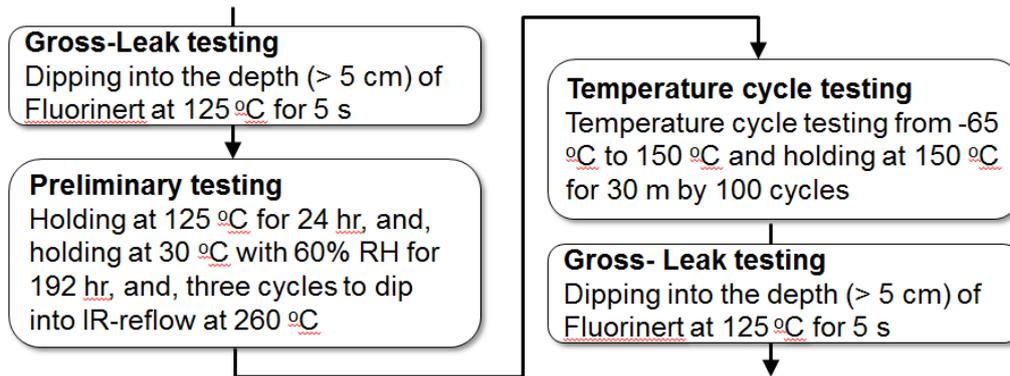


表 2 前処理、温度サイクル、グロスリーク試験の手順

さらに、加工コスト最小化に向けて、レーザー加工同様のパターンを反転した型を作り、プレス加工によるマイクロテクスチャ形成を検討した。金型作成のプロセス(図 3)は、前述のピコ秒レーザーで最適化したパターンと同じパターンのネガ部をスクリーン印刷版として作成。その後、低温プラズマ窒化にてスクリーン印刷されていない部位のみを選択窒化する。さらに、低温プラズマ窒化されていない金属表面部位を 50-100um 除去、マイクロエンボス用の金型とする。

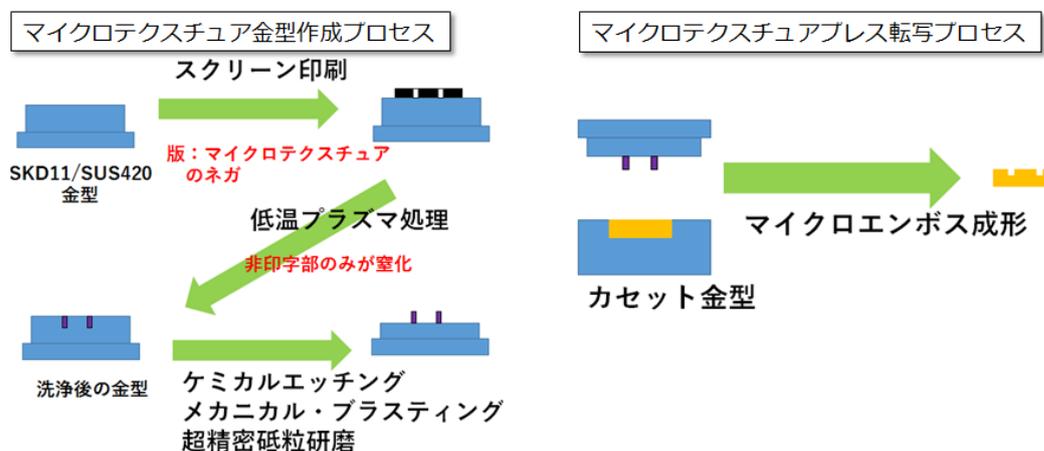


図 3 マイクロテクスチャ金型の作成プロセスとプレス転写プロセス

次に、放熱板へのプレス転写プロセスは、上記で作成した金型を用いて、マイクロエンボス用の金型セットに放熱板を組み込み、CNC プレスを用いて、高精度マイクロエンボス成形を行うことで、金型表面の凸状のマイクロテクスチャパターンを放熱板上に凹状のマイクロテクスチャとして形成する。

このようにプレス加工によるマイクロテクスチャ形成した放熱板、プラスチック枠体、リード金属と一体形成を行った後に、温度サイクル試験前後で、グロスリーク試験(表 2)を行った。その結果、温度サイクル前のグロスリークの発生は 0 個/12 個であったが、温度サイクル後では 6 個/12 個であった。ただし、金型、及び、放熱板において、長辺側のパターン欠けがあり、気密不良が発生したものと考えており、金型精度の向上により、改善可能と判断している。

## (2) グラファイト放熱板構造の最適化

ターゲット市場の 1 つである移動体無線通信は、第 4 世代、第 5 世代といった世代毎に多重化が進んでいる。その基地局は、より大きな出力電力、そして、より良い線形性を得るために、GaN(窒化ガリウム)トランジスタを用いたパワーアンプの採用が始まっている。GaN トランジスタを用いたパワーアンプは、その高電圧動作により、従来の GaAs(ガリウムヒ素)や Si(シリコン)-LDMOS(横方向拡散型 MOS)デバイスに比べて、1/10~1/5 程度に小型化することが出来る。しかし、GaN トランジスタチップサイズを小さくすることで、チャンネル温度の上昇、信頼性の低下を招くことになり、放熱性を高める革新的な放熱技術が必要となる。

これらの半導体の放熱と熱ストレス低減を担う放熱板は、銅材(熱伝導率 400W/m・K)及び銅複合材(熱伝導率 220W/m・K)が主に使われ、現在も使われ続けている。銅よりも熱伝導率の良い高熱伝導材、特に、グラファイトは炭素からなり、今回使用する高熱伝導グラファイトは非常に濡れ性が悪く、高熱伝導率 1700W/m・K の高さで注目されているが、樹脂や半田等の他の材料との接合が困難で、実用化に至っていない。高熱伝導グラファイトは、方向によって熱伝導率が異なるため、放熱板として利用するためには、1 枚のグラファイトを銅の薄板でラミネートした構造(図 4)を取る。

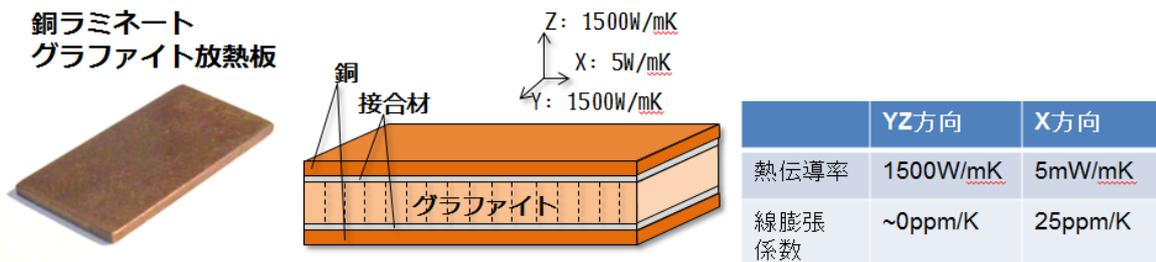


図 4 銅ラミネート グラファイト放熱板構造と熱伝導率と線膨張係数

まず、有限要素法によるシミュレーションにより、放熱特性が高い構造を検討する。放熱特性の解析モデルは、75W GaN トランジスタ(3.0x0.82x0.1mm)x2 個の直下に AuSn ロウ材(50um)、銅ラミネートしたグラファイト放熱板(1mm)、さらに、外付けの放熱板を配置した。銅ラミネートしたグラファイト放熱板、そして、市販の銅複合材の放熱板の 2 種類の解析を行った。図 5 は解析で得られた定常状態での温度分布である。グラファイトを銅ラミネートした放熱板を用いることで、 $\Delta 40^{\circ}\text{C}$ のチャンネル温度の低減と、 $1.14^{\circ}\text{C}/\text{W}$  から  $0.86^{\circ}\text{C}/\text{W}$  の熱抵抗の低減効果があることが確認できた。特に、銅ラミネートのグラファイト放熱板は、Y 軸、及び、Z 軸に高熱伝導を持つグラファイトを用いたが、この効果があって、YZ 方向へ効果的な熱拡散である。

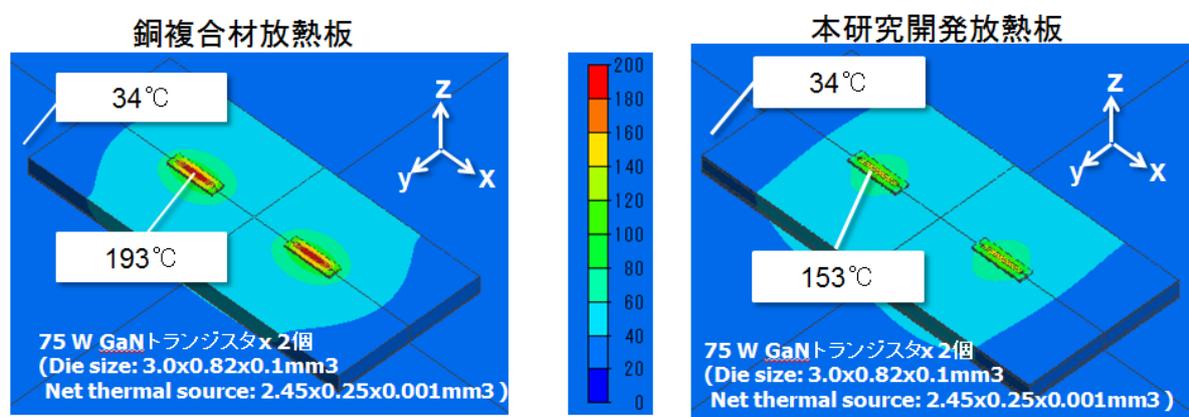


図 5 75W GaN トランジスタ x2 個搭載での定常状態の温度分布

一方、測定の容易さを踏まえて、75W GaN トランジスタ(3.0x0.82x0.1mm)x1 個を、AuSn ロウ材(50um)で、銅ラミネートしたグラファイト放熱板(1mm)を配置した本研究開発のパッケージに搭載したサンプルを作り、過渡熱抵抗の測定、及び、同上の有限要素法のシミュレーションを行った。過渡熱抵抗の測定結果(図 6)は  $1.8^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 、また、有限要素法によるシミュレーション結果は  $1.76^{\circ}\text{C}/\text{W}$  を示しており、低熱抵抗の低減、及び、測定値とシミュレーション値のおおよその一致が確認出来た。

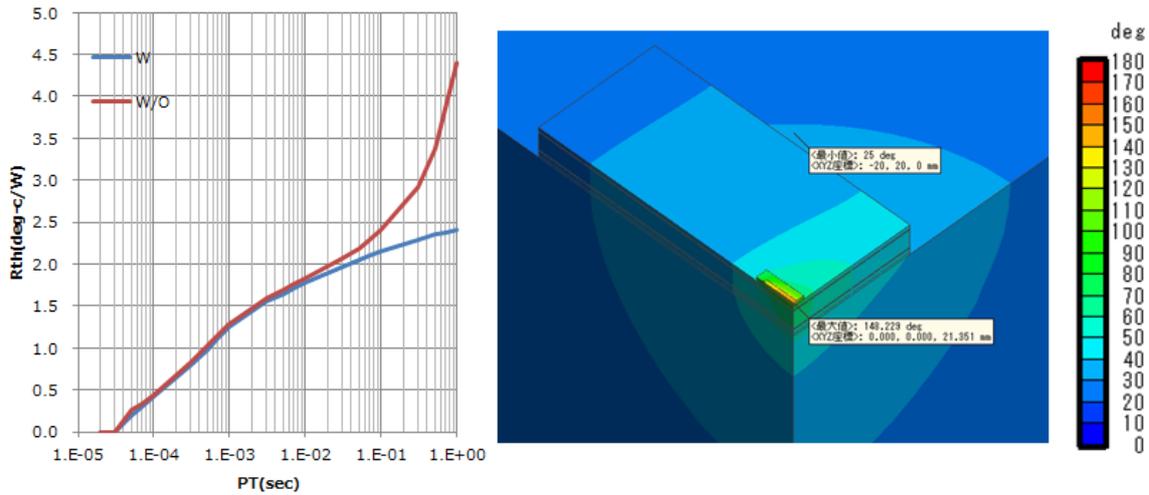


図 6 75W GaN トランジスタ x1 個搭載での過渡熱抵抗値と、対称性を加味して、1/4 部分のシミュレーションによる表面、及び、断面の温度分布

シミュレーションと測定値のおおよその一致が得られたことを踏まえて、40W GaN トランジスタ、75W GaN トランジスタ、そして、75W GaN トランジスタ x2 個の 3 つの事例において、シミュレーションを用いて、本研究開発の放熱板が、市販の銅複合材料放熱板に対して、正味の熱源の面積と熱抵抗のトレードオフ関係を調査したものが、図 7 である。活性化エネルギー  $E_a$  として、代表的な  $1.3eV$  と仮定すると、GaN トランジスタの設計ルールが同じならば、 $\Delta 40^{\circ}C$  のチャネル温度の低減、よって、23 倍の高寿命 (Mean Time To Failure) が得られ、また、同じチャネル温度の設計ルールならば、正味の熱源のサイズを 33% 小型化出来ることがわかった。

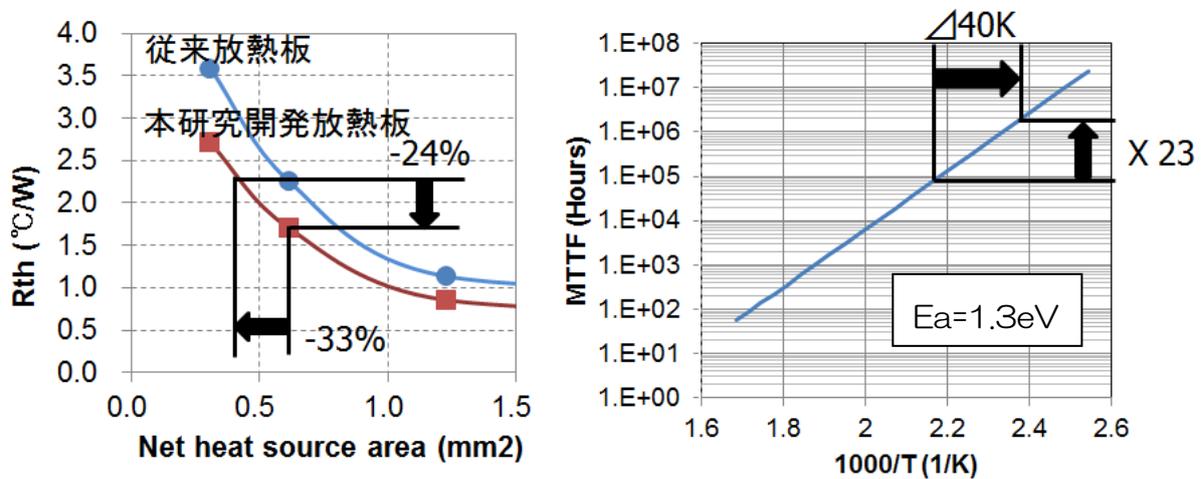


図 7 本研究開発放熱板と従来放熱板での正味の熱源の面積と熱抵抗のトレードオフ関係

### (3)完全密封パッケージ開発

スループプロセスを通しての出来栄確認として、(1)で決定したマイクロテクスチャパターンと、(2)で決定した放熱板構造を採用して、トランスファーモールドの樹脂バリの除去として、レーザーによる厚バリ取り、電解バリ取り、高水圧によるバリ取り・洗浄を行う工程で、バリの完全除去を行い、かつ、Ni/Au メッキを施した中空パッケージを試作して、さらに、パッケージの出来栄検証として、GaN トランジスタのダイボンド、ワイヤボンドを行った実製品同等の試作品を作成した。製造プロセスを図 8 に示す。

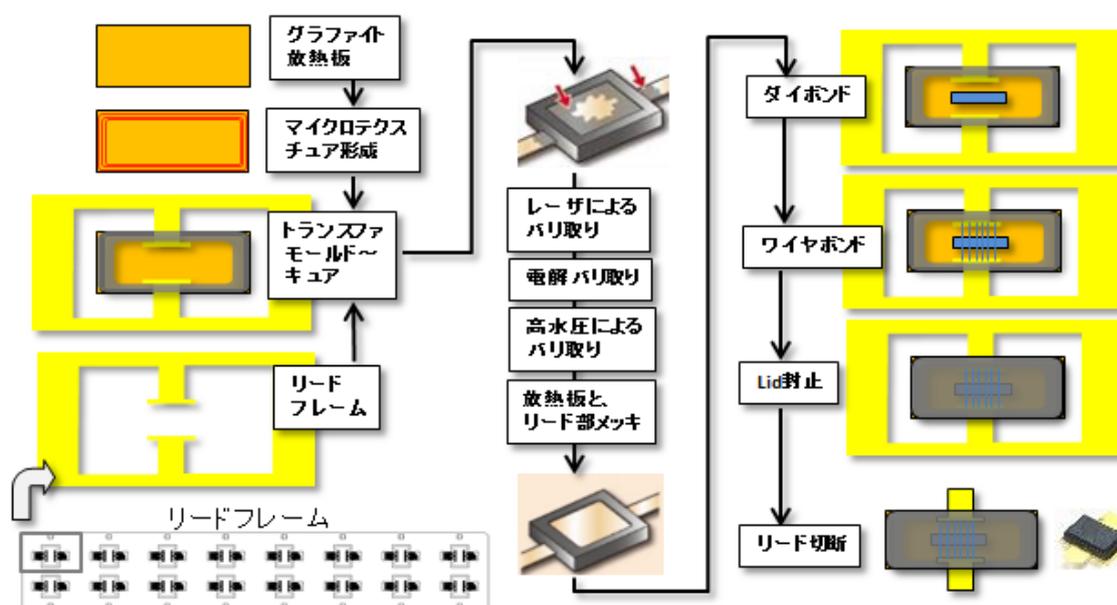


図 8 本研究開発パッケージを用いた実製品同等の試作品の製造プロセス

トランスファーモールドにおいて、樹脂バリ対策は重要な工程であり、ここでは、パッケージ側面の樹脂バリ対策として、モールド金型による“潰し”を施した。“潰し”に伴い、放熱板部が変形するが、あらかじめ放熱板のコーナー部に面取りを施すことで、規格内で安定した外形を得て、かつ、側面バリが抑制出来ることが確認出来た。

また、トランスファーモールド後の樹脂バリの除去として、レーザーによる厚バリ取り、電解バリ取り、高水圧によるバリ取り・洗浄を行う工程で、バリの完全除去を行った上で、Ni/Au メッキを施した中空パッケージを試作して、さらに、パッケージの出来栄検証として、GaN トランジスタのダイボンド、ワイヤボンドを行った実製品同等の試作品を用いて、温度サイクル試験前後で、グロスリーク試験(表 2)と、過渡熱抵抗値の経時変化を調査した。その結果を図 9 にまとめた。全サンプル共に、グロスリーク試験でのリーク発生は無く、市販の銅複合材放熱板、

及び、本研究開発の放熱板においては、熱抵抗の経時変化は無いことを確認した。しかし、純銅の放熱板を用いた場合は、100 サイクル以降で熱抵抗が悪化しており、線膨張係数による GaN トランジスタの剥離が生じていると思われる。

熱抵抗結果

放熱板構造	n	不良数			
		init	100	200	300
純銅	20	0	4	13	18
銅複合材	15	0	0	0	0
本研究開発	16	0	0	0	0

グロスリーク結果

放熱板構造	n	不良数			
		init	100	200	300
純銅	20	0	0	0	0
銅複合材	15	0	0	0	0
本研究開発	16	0	0	0	0

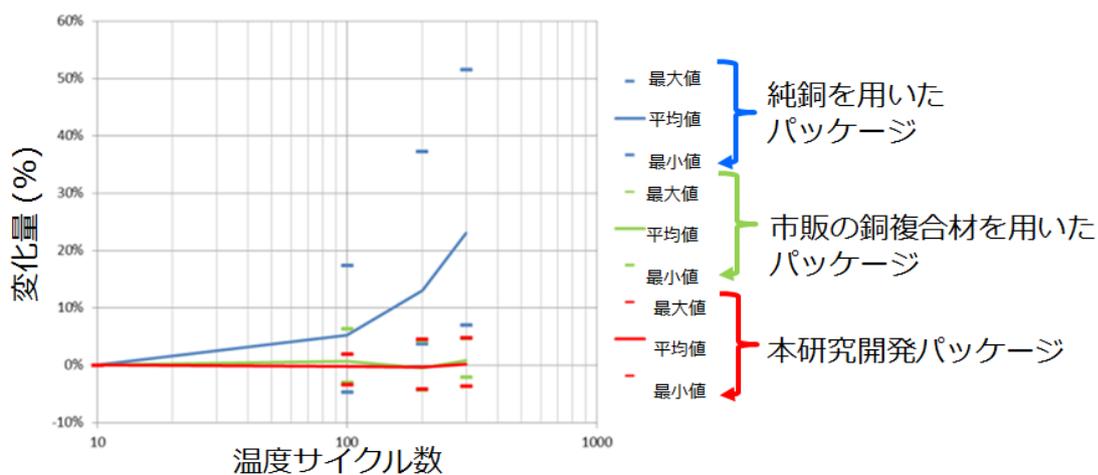


図 9 温度サイクル前後での熱抵抗経時変化とグロスリーク試験結果

以上のように、コア技術として、半導体パッケージ用のプラスチックと金属の接合技術と、GaN トランジスタに適した放熱板構造を確立して、その出来栄確認として、温度サイクル前後での熱抵抗の経時変化が無いこと、グロスリークが無いことが確認出来た。

### 第3章 全体総括

#### (1) 研究開発成果

プラスチックと金属の接合技術と、高熱伝導性を誇る異方性グラファイトの構造最適化と、中央電子工業の中空プラスチックパッケージの組み合わせで、高周波特性に優れた高放熱拡散の安価なプラスチック密閉パッケージを、ほぼ目標どおりの実現出来た。放熱性能では、YZ グラファイトを銅でラミネートした構造の放熱板に、75W GaN トランジスタ x2 個搭載にて、従来パッケージと比べて、 $440^{\circ}\text{C}$ の熱抵抗を低減出来ること、また、75W GaN トランジスタ x1 個搭載にて、シミュレーション、及び、実際の過渡熱抵抗評価にて確認出来た。また、事業化に不可欠な個別プロセスとして、トランスファーモールドの樹脂バリ除去プロセスを確立して、最終仕様のマイクロテクスチャパターンと、最適化した放熱板構造を用いたサンプルで、GaN トランジスタのダイボンド、ワイヤボンドを行った実製品同等状態で、温度サイクル前後でのグロスリーク無きこと、及び、熱抵抗の経時変化無きことを確認した。

#### (2) 研究開発後の課題

高放熱特性については、金属ラミネートした高熱伝導性を誇る異方性グラファイトによるものであるが、このコストは数量見合いというジレンマがある。今後は、さらに高熱伝導化と加工費の最小化を狙い、グラファイト厚の最大化、金属厚の最小化について、継続して検討していく。

#### (3) 事業展開

5G 携帯基地局用のパワーアンプ顧客、レーダー用のパワーアンプ顧客との商談の機会で、高周波特性に優れた高放熱拡散の安価なプラスチック密閉パッケージの必要性が高まっていることを感じており、今後、本研究内容が、これらの顧客にとって不可欠な技術として認知されることを確信している。高熱伝導性を誇る異方性グラファイトのコストは数量見合いというジレンマの中で、5G 携帯基地局のみならず、探知距離の長いレーダー等のハイエンド製品を手がける顧客へのプロモーションを行っていく。