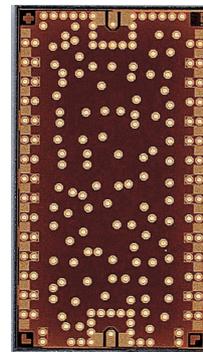
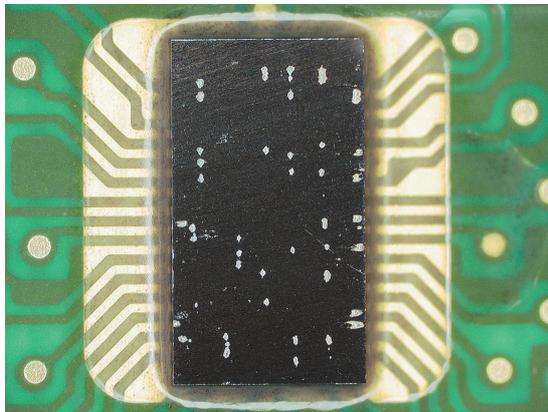


# 超音波フリップチップ実装技術の開発

Development of Ultrasonic Flip Chip Bonding Technology

谷	元	昭	Motoaki TANI
渡	辺	弘	Hiromichi WATANABE
西	村	明	Akihiko NISHIMURA
可	知	繁	Shigetaka KACHI
片	田	宣	Nobuhisa KATADA
杉	浦	慎	Shinichi SUGIURA



## 要旨

自動車での死亡事故低減や渋滞の解消を目的に、ミリ波レーダが開発され市場投入されているが、さらなるミリ波レーダの普及に向けて低コスト化が必要である。

そこで、高周波モジュールの低コスト化に着目し、MMIC (Monolithic Microwave IC) の構造開発と実装技術開発に取り組んだ。本論では、この新構造MMICの樹脂基板への実装技術開発と部品および接合状態の分析技術について述べる。

## Abstract

Millimeter wave radars have been developed and marketed for the purpose of reduction in deaths in traffic accidents and traffic congestion. However, the millimeter wave radars need to be cheaper to be used more widely.

In order to make the radars cheaper, we developed a new MMIC (Monolithic Microwave IC) structure and bonding technology, focusing on reducing costs of RF-modules. This article describes the new technology of bonding the MMIC to a resin substrate, and analyzing technology of MMIC and its bonded conditions.

1

はじめに

当社は2003年より前方用車載ミリ波レーダの量産を開始し、近年には車両の前方だけでなく後方、前側方の広角域を検知できるレーダも量産化してきた。今後は、高級車だけでなく大衆車への標準装備化や、レーダを複数台搭載した全方位検知化による安全性の向上へ進展していくと想定され、さらなる小型化と低価格化が必要不可欠となる。今回、ミリ波レーダの重要部品である高周波モジュールの低コスト化のための実装技術として超音波フリップチップ接合技術を開発したので紹介する。

2 高周波モジュールの新構造と接合方式

現在量産している高周波モジュールは、MMIC (Monolithic Microwave IC) をセラミックパッケージに気密封止したもの<sup>1)~3)</sup>を採用し、実装基板を金属フレームに接着固定している。MMICの実装は、高周波特性を得るために端子間ピッチ100 $\mu$ mで柱状のAuバンプを用いなければならないが、熱圧着工法により実装する必要があった。そのため、セラミック材料を使ったパッケージングコストだけでなく、セラミックにあわせた低線膨張の金属フレームの使用、基板と金属フレームの接合に接着剤の塗布・硬化をするという様に加工費にもコストが掛かっていた。

高周波モジュールの低コスト化のため、部品の削減と工程の短縮を目的として、MMICの構造を開発し、それを実現する実装工法としてプラズマクリーニング、超音波接合を使用する。

高周波モジュールの構造を図1に示す。新構造<sup>4)</sup>では、チップ表面に多層配線を有する（以降この多層配線を3Dと呼ぶ）ことで耐湿性を確保すると共に小型化、低価格化ができた。また、実装基板に樹脂基板を採用することで基板コスト低減と金属フレームとの接合にはネジ止めとし、組立ての単純化による加工費の低減ができた。

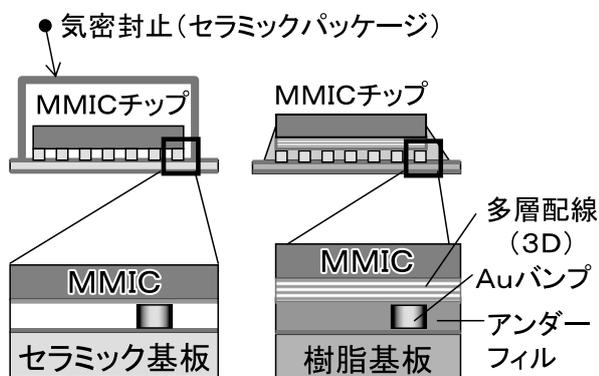


図1 高周波モジュールの構造の概略  
Fig.1 Outline of RF-Module Structures

新構造の実装には、低温で接合できる超音波接合を使用した。従来行ってきた熱圧着工法のままではMMICの3Dが熱により変形してしまい実装できない。また、樹脂基板に実装するには熱変形や熱劣化を起こさない温度でこれを実現しなければならなかった。

超音波接合は、低温で接合ができるが、200個のAuバンプを樹脂基板に均一に接合させる必要があり、3D上のバンプに如何に超音波を均一に加え接合させるかが課題であった。また、熱膨張差が大きい樹脂基板で車載信頼性を確保するには、民生の既存技術の応用などでは、解決不可能であり、根本から新たな技術開発をする必要があった。

3

超音波接合の概要

超音波接合は、3DMMICのAuバンプと基板側のAuめっき電極パッド（以下パッドと呼ぶ）を擦り合わせて接合する方式で、同種のAuを接合することから接合界面は金属結合となる。超音波の振幅により接合界面同士の距離が近づくことでお互いの金属原子が拡散し金属拡散により接合される。金属接合は、このような接合界面が消失される状態とすることであり、接合プロセスと接合界面の状態変化の概略を図2に示す。

	概略図	接合界面の状態
初期段階		
接合段階		
接合完了		

図2 接合プロセスと界面状態の関係

Fig.2 Relation of Bonding Process and Bonded Interface Condition

4

高周波モジュールの実装工程と課題

高周波モジュールの実装工程を図3に示す。最初に、Auバンプとパッドの接合面をプラズマクリーニングし、表面の汚染物等を除去する。部品の初期状態で接合面に汚染物が残存するとボイド（空洞）となり接合不良の要因となるため、プラズマクリーニングによって除去しておく。

次に、フリップチップボンダにより、Auバンプとパッドを超音波で接合する。超音波接合は、3DMMICに荷重を加えながら超音波振幅を与えることでAuバンプとパッドを接合させる。

次に、アンダーフィルと呼ばれる樹脂の補強材を接合部に充填し加熱硬化させる。

工程名	概要図
<b>プラズマクリーニング</b> アルゴンガスを用いたプラズマ洗浄により、基板パッドとAuバンプの表面をクリーニングする。	Arプラズマ Arプラズマ 基板パッド 基板 3D-MMIC Auバンプ
<b>超音波実装</b> Auバンプとパッドを超音波振幅、荷重と加熱により接合する。	超音波振幅 Auバンプ 3D-MMIC 基板
<b>アンダーフィル充填・硬化</b> 接続部にアンダーフィル材を充填・硬化する。	3D-MMIC Auバンプ 基板 アンダーフィル

図3 高周波モジュールの実装工程  
Fig.3 RF-Module Assembly Process

超音波接合によって200個のAuバンプを樹脂基板に均一に接合させるためには、配線変形の低減と接合部の剥離の防止（接合強度の確保）という相反する問題を両立させなければならない。

配線変形に対しては、ウエハの従来の配線プロセスのまま超音波接合してしまうと、Auバンプを潰すことで多層配線が変形し、極端な場合には断線してしまう問題が発生することが判っていた。図4に配線変形の一例を示す。

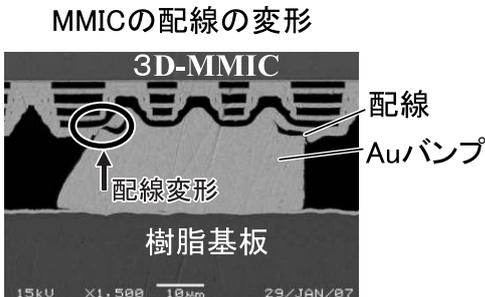


図4 配線変形の一例  
Fig.4 Example of Wiring Pattern Deformation

当初は、超音波接合の接合条件を配線の断線を考慮しながら接合強度を確保するように検討を進めていたが、アンダーフィル硬化時の熱応力により接合部の剥離が生じてしまう場合があった。図5に接合部剥離の一例を示す。

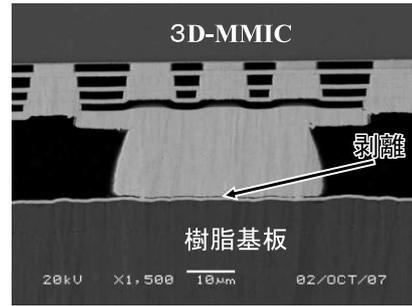


図5 接合部剥離の一例

Fig.5 Example of Fracture of Interface between Au Bump and Au Plating

このような相反する問題に対する取組み結果を次ぎに説明する。

#### 4.1 配線変形対策の取組み

配線の変形に対しては、超音波実装時に多層配線上に形成されたAuバンプに応力が加わることで、Auバンプ根元の配線が変形してしまう。できるだけ3DMMICのウエハのプロセスを変更しないで変形を抑えるかが課題であった。当初のバンプ構造は、Auバンプの根元部分は樹脂保護膜が入り込んでいる形状であったため、超音波接合によりAuバンプが変形すると、この樹脂保護膜も変形し、同時にAuバンプ下の配線を変形させていた。そこで、Auバンプの変形に対する応力解析を行い変形に耐えられる構造（補強構造）を設けた。これにより、配線変形を抑制でき、接合時の配線の断線を防止することができた。図6に対策前後のAuバンプ構造を示す。また、図7に配線変更後の実装断面を示す。

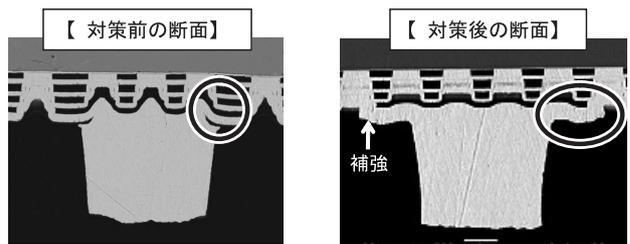


図6 対策前後のAuバンプ構造（断面）  
Fig.6 Reinforced Au Bump Structure (Cross-sectional)

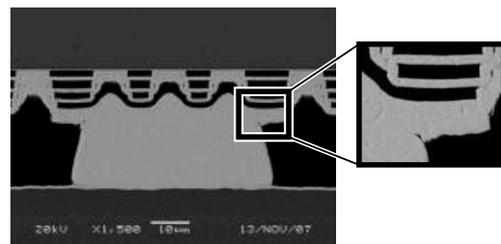


図7 対策後の実装断面観察結果  
Fig.7 Cross-section Result of Reinforced Au Bump After bonding

このようにして、超音波接合用の配線構造を確立した。

### 4.2 接合部剥離対策の取組み

接合部剥離は、バンプの受ける熱応力に対して接合強度を上まわる様に接合強度を増加させる必要がある。

3DMMICでは、3Dの有無による配線厚みの違いやAuバンプ個々の高さのばらつきにより、バンプ単位での接合強度は単純に増加しない。そこでバンプ毎の接合面積を指標として200個のバンプが均一となる接合条件を決めてきた。

図8に従来条件のボンディングプロファイルを示す。

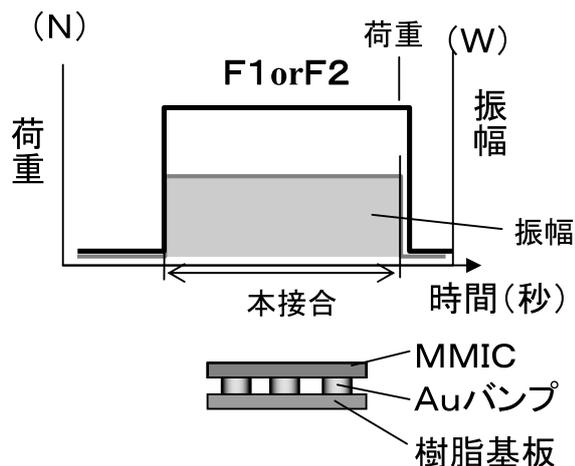


図8 従来のボンディングプロファイルの概略  
Fig.8 Outline of Conventional Bonding Profile

超音波接合時の荷重 (F1) は、3DMMIC全体に対して印加するため、パッドとAuバンプが接する数によってAuバンプに加わる荷重が異なり、接合状態も異なる。つまり、接合初期においては、少数の高いバンプのみがパッドに接触する。この少数のバンプに対して一定の荷重を加えると荷重過多となり、超音波での擦れができないことからAuバンプが変形していても十分な接合面積が得られず接合強度不足となる。図9に接合のイメージを示す。

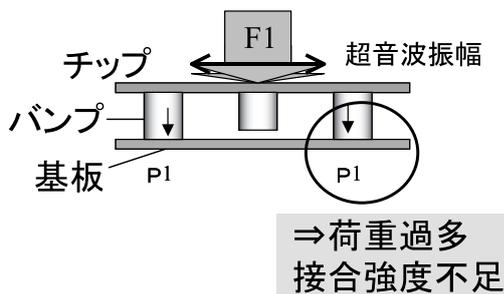


図9 荷重過多のイメージ図  
Fig.9 Image of Excessive Load

一方、接合初期段階で荷重を低く (F2) し過ぎると、全Auバンプが接合する接合後半では低いAuバンプの潰れ量が不足となり、パッドに届かない場合や荷重不足によりAuバンプとパッドで滑りが生じ接合面積を得られず接合強度不足となってしまう。図10に接合のイメージを示す。

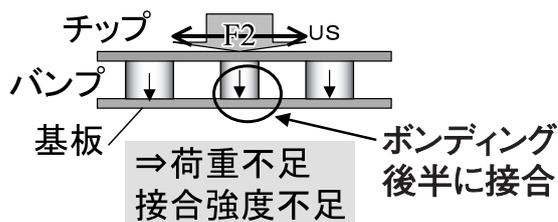


図10 荷重不足のイメージ図  
Fig.10 Image of Insufficient Load

そこで、接合初期に高いバンプを低いバンプの高さに合わせるように低い荷重 (F1) で超音波を印加しバンプの高さを揃えるレベリングを行い、その後、全バンプが基板に接触した時点で接合に必要な荷重 (F2) が加わるように、徐々に荷重を大きくする接合技術を開発した。図11に開発した超音波接合のボンディングプロファイルの概略を示す。

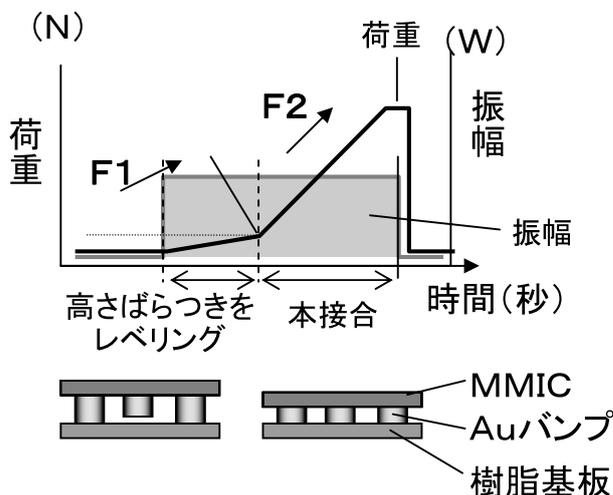


図11 開発したボンディングプロファイルの概略  
Fig.11 Outline of Developed Ultrasonic Bonding Profile

当初の一定荷重のみのボンディングプロファイルでは3DMMIC内の各バンプの接合性は不均一であったが、開発したボンディングプロファイルでは3DMMIC内で均一性の高い接合が得られる結果となり、従来条件で発生していた接合部の剥離をなくすことができた。

ここで、接合面積の求め方について解説をする。接合した3DMMICにアンダーフィル硬化時と等しい熱履歴を印加し、その後プル試験により引き剥がす。そして基板に残った各Auバンプのシェアを測定した後の接合面積を測定する。図12に測定方法の概略を、図13に接合面積の測定例を示す。

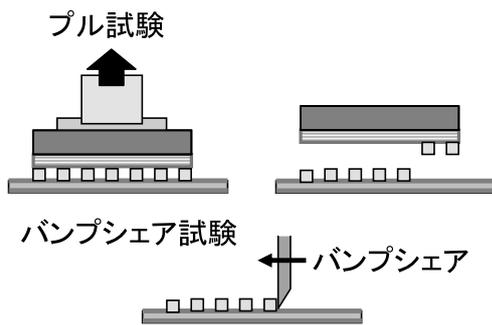


図12 各バンブの接合評価の概略  
Fig.12 Outline of Measurement of Bonding Strength

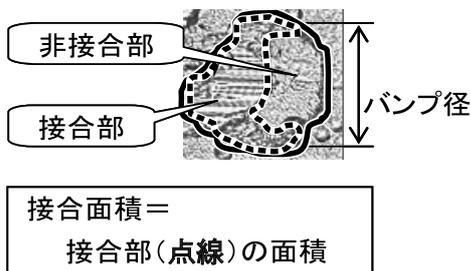


図13 接合面積の測定例  
Fig.13 Example of Measuring Fractured Surface

バンブの接合面積とバンブシエア強度の関係を図14に示す。

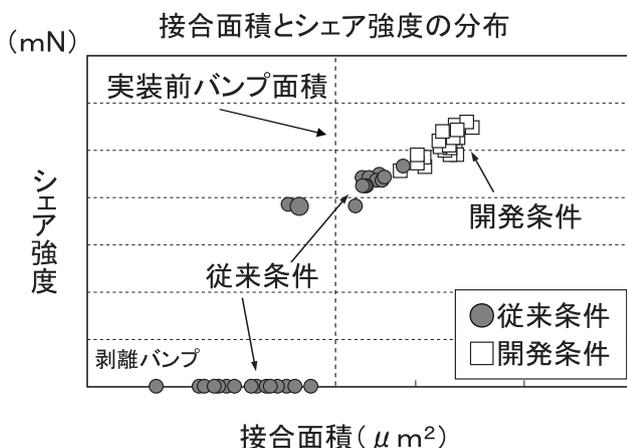


図14 接合面積とバンブシエア強度の関係  
Fig.14 Relation of Bonded Area and Shear Strength

このように、接合面積と接合強度は相関があり、接合面積を指標としたパラメータ設計で接合部剥離を対策することができた。

## 5 信頼性試験結果

接合後の基板において温度サイクル試験 (-40/125℃各30分) を行い、導通抵抗の変化率および接合断面の接合状態を観察した。結果を図15に示す。

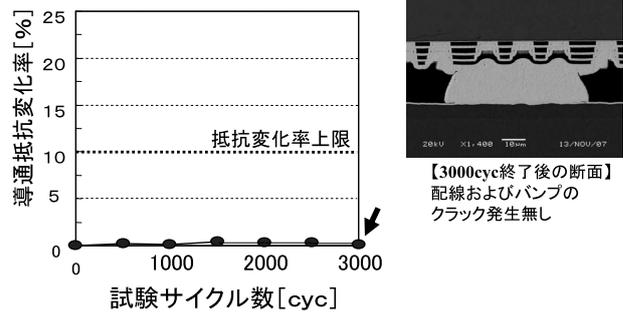


図15 温度サイクル試験結果  
Fig.15 Results of Thermal Cycle Test

目標試験サイクル3000cycで導通抵抗値の変化は規格の10%以下であり、接合断面での配線のダメージおよび接合部の剥離等見られず、信頼性の高い接合が得られていることが確認できた。

## 6 接合に対する評価・解析手法の開発について

今回の取り組みで接合強度を向上させることができたが、これらの成果を得るためには、部品の評価技術や接合部の解析技術の開発も重要であった。

部品の評価技術として、Auバンブ高さの管理限界を知ることが必要であった。また、接合部の解析技術については、接合状態を強度や導通抵抗だけでなく物理的にどう接合されているか確認することで、これまで述べてきたパラメータ設計の正しさを確認した。これらの評価・解析手法について紹介する。

### 6.1 Auバンブの高さの把握

接合部剥離の対策についてボンディングプロファイルを検討してきたが、この高さばらつきにも限度がある。

そこで、接合部剥離の解消に向けて、Auバンブの高さの管理限界を知るために多点の計測技術を開発した。

バンブ個々の高さを把握するには、ビーム径の細かいレーザー変位計にて全てのバンブ高さを測定し、高さの違いを色分けすることとした。測定ピッチが狭く測定時間も1個当たり1時間ほど掛かっていたが、測定方法の検討により数分で測定できるようになった。こうしてAuバンブの高さばらつきの可視化が可能となった。Auバンブ高さの測定結果の一例を図16に示す。

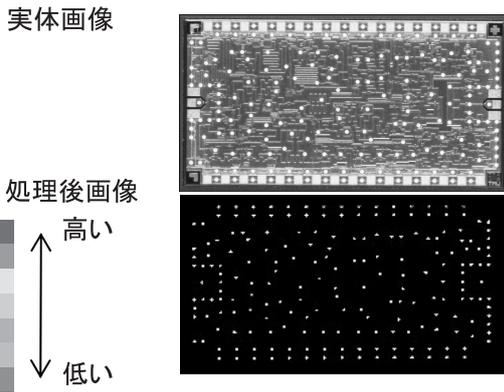


図16 3DMMIC内の全バンプ高さの測定例

Fig.16 Measurement Example of All Bump Heights on 3D-MMIC

この結果を用い、ボンディングプロファイルの検討およびバンプ高さの仕様決めを行った。

### 6.2 接合界面の評価・解析手法

接合界面の評価として、次の2方法を用いた。

- 1) 接合界面状態の数値化 (接合界面消失率)
- 2) EBSD (Electron Back Scatter Diffraction) による解析。

#### 1) 接合界面の状態の数値化による解析

接合完了時には図2に示したように金属結合により接合界面の結晶粒界が消失する。CP法 (Cross-section polishing) による断面加工およびFE-SEM (電界放出形走査顕微鏡) による観察をすることで金属結晶まで観察することができるようになり、どれだけ接合界面が消失したかで接合の良し悪しを判断することを試みた。断面観察における接合長さに対する界面消失長さを界面消失率とした。接合後の断面観察と界面消失長さの例を図17に示す。

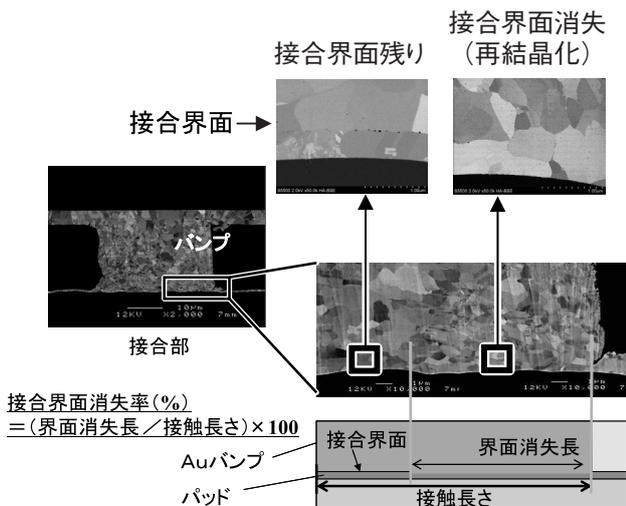


図17 接合後の界面消失の例

Fig.17 Example of Disappeared Interface after Bonding

また、前頁で説明した図12のチップを基板から引き剥がした際の基板に残るバンプ数 (転写率) と界面消失率と

は相関が見られ、この界面消失率によって接合の良否を判断することが可能となった。図18にその関係を示す。

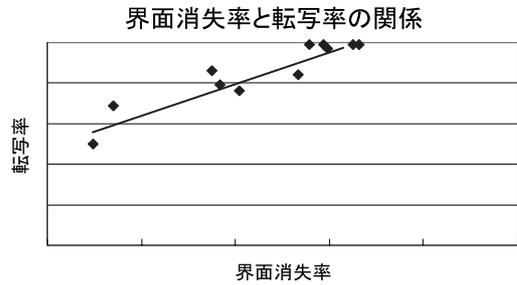
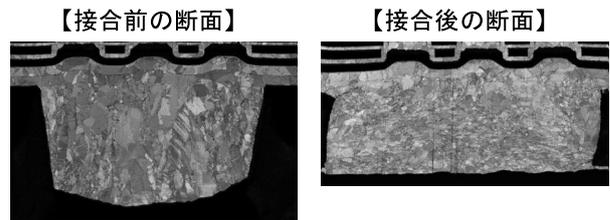


図18 界面消失率とバンプ転写率の関係

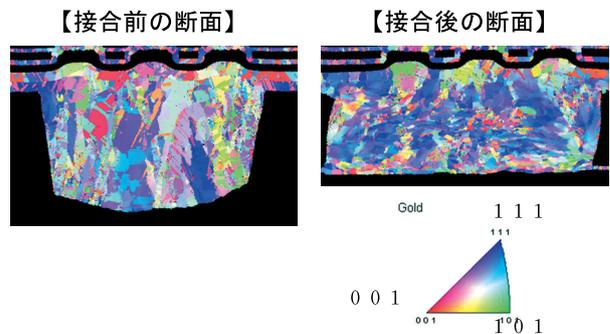
Fig.18 Relation of Disappeared Bonded Interface Rate and Transcription Rate

#### 2) EBSDによる解析

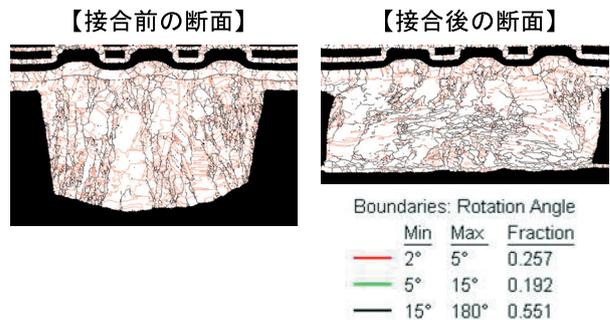
超音波接合で、確実な金属結合が生じているかをバンプとパッドの接合面におけるAuの結晶状態についてEBSD解析により確認を行った。



(a) Image Quality Map



(b) Inverse Pole Figure Map



(c) Boundary Map

図19 接合後のバンプのEBSD解析結果

Fig.19 EBSD Analysis Results of Bonded Au Bumps

接合後のEBSD解析結果を図19に示す。(b) Inverse Pole Figure Mapの色の違いにより識別可能な結晶方位の分布から、Auバンプの結晶が接合前の柱状形状を若干残しながらも、全体的に横長の扁平な形状になっている。超音波接合によるAuバンプの潰れに伴い、Auの結晶自体が潰れていること、また、これによりバンプ先端の接合面積を増大させている状態が確認できた。このことから、Au原子同士を接近させ、金属結合を得るための塑性変形は、主にバンプ部分で生じていると考えられる。

(c) Boundary Mapの結果から、Auバンプとパッドの界面におけるAuの結晶が緊密に噛み合い、隙間無く接している状態、および、バンプとパッドの接合界面が明瞭でなく、接合界面をまたいで一つの結晶が成長している状態が確認できた。これは、バンプ部分から接合界面を越えてAu原子の移動が生じているためと推測される。このことから、接合直後においてもバンプ-パッド間のAu原子が高い密度で接しており、良好な金属結合が得られていることを示唆していると考えられる。図19における接合界面消失の状態を結晶粒界の観点からも裏付けることができた。

## 7

## おわりに

従来のMMIC実装工法に適用されていたセラミック基板を用いた高温の熱圧着工法に代わり、樹脂基板を用いた超音波接合による実装技術を確立することができた。今回の取組みにより高周波モジュールのコストを従来に比べ1/3にすることができた。接合評価としては強度や接続抵抗値だけでなく、Auバンプとパッドが接合界面でどう接合できているかを金属結晶レベルでも確認でき、評価・観察レベルを向上させることもできた。

今後、3DMMICを実装した高周波モジュールの製品化を目指し、ミリ波レーダの市場拡大に寄与していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 元ニ・矢木・山野：76GHzシングルチップMMIC高周波ユニットの開発、富士通テン技報、Vol.20 No.1
- 2) 山野・東田：シングルチップMMIC応用自動車用76GHzミリ波レーダ、富士通テン技報、Vol.22 No.1
- 3) 青木・渡邊・大久保：76GHz車載レーダ用HEMT MMIC、富士通技報 51,3号
- 4) 富士通テン：車載レーダー用ミリ波高周波モジュールの低コスト化技術を開発、発表ニュースリリース、2005年5月19日

## 筆者紹介



谷 元昭  
(たに もとあき)

1987年㈱富士通研究所入社。半導体パッケージ用実装材料・技術の研究開発に従事。現在、㈱富士通研究所 基盤技術研究所 集積技術研究部 主任研究員。



渡辺 弘道  
(わたなべ ひろみち)

1989年入社。以来、製造技術、生産技術、実装要素技術開発に従事。現在、AE本部センサ開発統括部に在籍。



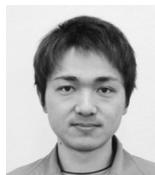
西村 明彦  
(にしむら あきひこ)

1983年入社。以来、製造技術、実装技術に従事。現在、AE本部センサ開発統括部に在籍。



可知 繁隆  
(かち しげたか)

2000年入社。以来、製造技術、実装技術に従事。現在、AE本部センサ開発統括部に在籍。



片田 宣久  
(かただ のぶひさ)

1997年入社。以来、材料技術、実装技術に従事。現在、生産本部生産技術部に在籍。



杉浦 慎一  
(すぎうら しんいち)

1990年入社。以来、自動車用電子機器の実装技術開発に従事。現在、AE本部センサ開発統括部に在籍。