半導体チップ上への Al/Cu クラッドリード端子の直接超音波接合技術の開発

Development of Direct Al/Cu Lead Terminal
Ultrasonic Bonding Technology for Power Semiconductor Chips坂元 創一*・米田 裕*・柳本辰則**・藤野純司*・菊池正雄*
Soichi SAKAMOTO, Yutaka YONEDA, Tatsunori YANAGIMOTO, Junji FUJINO and Masao KIKUCHI

(Received April 20 2015)

Recently, power modules have become widespread because the need for energy-saving technology is increasing. Using wiring technology in place of Al wire for power semiconductor chips has attracted attention along with the progress made in miniaturizing the modules. We investigated a wiring technology for direct ultrasonic bonding Al/Cu lead terminals on semiconductor chips. As shown in the results, chip tilt after die-bonding led to reducing the bonding quality. Regardless of the tilt, a large bonding region was obtained by using Al/Cu lead terminals with bumps. In addition, a thermal cycle test was conducted for 1000 cycles between -45°C and 150°C. It was found that the Al/Cu lead terminals with bumps maintained ample bonding area even after rigorous reliability test.

Key Words: Ultrasonic Bonding, Power Semiconductor Chips, Al/Cu Lead Terminal, Chip Tilt, Clad Materials

1. 緒言

近年、環境問題への意識が高まってきており、風力、水力、太陽光といった自然エネルギーを用いた発電技術や、発電した電力を効率的に利用するための省エネ技術の必要性が高まっている。そのキーマンであるパワーモジュールの小型化やコストダウンを目的に半導体チップのさらなる縮小化が進められている。しかしながら、チップの縮小化により配線スペースが減少し、従来の配線技術である Al ワイヤボンディングでは通電容量が小さく、配線に必要な面積を確保できなくなっている¹⁾。そこで、Al ワイヤに代わる通電容量の大きな半導体チップ上配線技術として、Al リボン接続、Cu ワイヤ接続などの新たなチップ上配線技術が注目されている^{2), 3)}。

さらに通電容量の大きな接続方法として、Fig.1 に示すように Cu リード端子を半導体チップ上に直接接続する方法も検討されている⁴⁾。この Cu リード端子の直接配線方法は、小さい面積でも大電流に対応可能であり、また、通電時のチップ内温度分布の均一化によるパワーサイクル (P/C) 信頼性の向上といったメリットを有する。特に超音波接合を用いた半導体チップ上への Cu リード端子の直接接続方法は、短時間での配線が可能、はんだ接合方法と比較して Au/Ni などのチップ上の電極メタライズが不要といったメ

リットが期待される。しかしながら、はんだ接合のような部材間に接合層が形成される接合方法とは異なり、超音波接合方法は部材同士を直接接合させるため、被接合部材である半導体チップへのダメージや、チップの表面状態および、表面形状による接合品質への影響が懸念される。半導体チップへのダメージ軽減に関しては、半導体チップと Cu リード端子間に Al 緩衝層を挟み込むことで半導体チップへのダメージを軽減し直接接合可能であることが報告されている⁴⁾。

本報では、半導体チップ上への Al/Cu リード端子の直接

Fig.1 Schematic images of conventional Al wire-bonding package and direct Cu lead terminal bonding package.

* 三菱電機(株) 生産技術センター (〒 661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1)

Manufacturing Engineering Center, Mitsubishi Electric Corporation (8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661 Japan)

** 三菱電機(株) パワーデバイス製作所 (〒 819-0161 福岡県福岡市西区今宿東 1-1-1)

Power Device Works, Mitsubishi Electric Corporation (1-1-1 Imajukuhigashi, Nishi, Fukuoka, Fukuoka 819-0161 Japan)

Fig.2 Schematic illustration of direct Cu lead terminal bonding with ultrasonic bonding.

超音波接合において、接合品質の中でも特に通電容量、放熱性に大きく関わる接合面積に着目し、チップ傾きによる接合面積への影響について検証を行った。また、Al/Cu リード端子の Al 層側にバンパを形成し、チップ傾きへの対策効果の検証および、信頼性評価を実施した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材として、Fig.2 に示すような Cu パターン（厚さ 0.25 mm）を積層した AlN 基板（61.0 mm×39.0 mm、厚さ 1.14 mm）上に、鉛フリーはんだ（Sn-3.0Ag-0.5Cu、13 mm×10.5 mm、厚さ 0.1 mm）を用いて Si 半導体チップ（13 mm×10.5 mm、厚さ 0.26 mm）をダイボンドしたサンプルを用いた。また、半導体チップ傾きの影響を調査するために、様々な傾きを有するサンプルを作製した（半導体チップ傾き：数 μm ～約 200 μm ）。半導体チップの傾きについては、高精度非接触段差測定機にてダイボンド後のチップ四隅の高さを測定し、2つの対角高さ差分の大きい方をチップ傾きとした。本評価で作製したチップ傾きは、はんだ厚さやはんだ付けプロセスにもよるが、通常のはんだ付け時に発生し得る範囲の大きさである。半導体チップ上に直接超音波接合する評価用リード端子は、Cu 板（長さ 40 mm、幅 4 mm、厚さ 0.5 mm）および、Fig.3(a) に示した Al/Cu クラッド材（長さ 40 mm、幅 4 mm、厚さ 0.5 mm、Al 層：0.2 mm、Cu 層：0.3 mm）をパワーモジュールにおけるリード端子を模擬して曲げ加工によって作製した。また、作製した Al/Cu リード端子先端の Al 層側にバンパを形成した。Fig.3(b) に示すように、 $\phi 1.0$ mm、高さ 0.1 mm のサイズのバンパを中心および、四隅に各 1 点ずつ、計 5 点のバンパを形成した。上記のバンパを形成したリード端子を今後、バンパ Al/Cu リード端子と呼ぶこととする。

2.2 超音波接合方法

超音波接合時のプロセスを Fig.4 に示す。AlN 基板にダイボンドした半導体チップ上に Al/Cu リード端子を設置し、

Fig.3 Images of Al/Cu lead terminal.

(a) Al/Cu lead terminal, (b) Bumped Al/Cu lead terminal.

Fig.4 Schematic illustration of ultrasonic bonding process.

周波数 30 kHz もしくは、40 kHz のホーンを用いて、荷重と接合時間をパラメータとして超音波接合を行った。また、本評価で用いた振幅条件は 14.5 μm もしくは、15.2 μm である。接合状態を確認するために、超音波接合後、サンプルの裏面より SAT（Scanning Acoustic Tomograph：超音波探傷装置）観察を行った。また、画像処理ソフトを用いて観察した SAT 画像の二値化を行い、接合面積を求めた。

2.3 温度サイクル試験

供試材として、AlN 基板上にダイボンドした Si 半導体チップ上に Al/Cu リード端子および、バンパ Al/Cu リード端子を直接超音波接合したサンプルを用いた。この時、超音波接合条件は、振幅：15.2 μm 、荷重：200 N、時間：0.2 s である。

作製したサンプルを温度サイクル試験機に投入した。温度サイクルの条件は、 $-45^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 、20 min/20 min とし、1000 サイクルまでの所定のサイクル数ごとに取り出し、SAT によって超音波接合部の剥離状態について観察した。

3. 結果と考察

3.1 半導体チップ上への Al/Cu リード端子の直接超音波接合の検討

半導体チップ上に Cu リード端子を設置して直接超音波接合した場合、Cu リード端子と比較して、半導体チップの最表面に存在する Al 電極（厚さ数 μm ）の方が柔らかいため、Al 電極が完全に除去され、Cu リード端子が半導体チップに直接接触し、チップにダメージが加わる。結果として、Fig.5 に示した超音波接合後の断面写真のように、半導体チップにクラックが発生する。そこで、本評価では、半導体チップへのダメージを抑制するために緩衝層である Al 層を Cu リード端子に圧接接合させた Al/Cu クラッド材をリード端子として用いた。Fig.6 に半導体チップ上に Al/Cu リード端子を超音波接合したサンプル（接合条件 周波数：40 kHz、振幅：14.5 μm 、荷重：120 N、接合時間 0.2 s）の断

Fig.5 Cross section of bonding interface between Cu lead terminal and power semiconductor chip.

Fig.6 Cross section of bonding interface between Al/Cu lead terminal and power semiconductor chip.

面写真を示す。Fig.6 より、Al/Cu クラッド材をリード端子として用いることで、Al 電極を完全に除去することなく超音波接合可能であることを確認した。また、クラックなどの半導体チップへのダメージも見られなかった。

3.2 超音波接合におけるチップの傾きの影響

はんだ材を用いた半導体チップのダイボンドにおいて、はんだ厚さのばらつきは Ni ボール入りはんだの使用などによって、ある程度は抑制できるものの、完全にはんだ厚さを均一にすることは難しい。つまり、リード端子を半導体チップ上に直接超音波接合する際、半導体チップ傾きによる影響を考慮する必要がある。そこで、半導体チップ上への Al/Cu リード端子の直接超音波接合において、ダイボンド後の半導体チップ傾きが与える影響について評価を行った。ダイボンド後に半導体チップが傾いていると、超音波接合ツールが Al/Cu リード端子に対して片当たりし、初期に Al/Cu リード端子のエッジ部が接触した領域付近において過剰な荷重が加わることによる半導体チップへのダメージもしくは、Al/Cu リード端子が接触しなかった領域付近において所定の荷重が加わらないことによる未接合領域の発生といった問題が生じる。Fig.7 に各半導体チップ傾きにおける超音波接合後の Al/Cu リード端子の表面観察結果および、SAT による接合状態の観察結果を示す。Fig.7 の SAT 画像において黒色で示された領域が Al/Cu リード端子と半導体チップとの接合領域である。この画像を二値化し、接合領域の画素数より接合面積を概算した。Fig.7(a) の端子表面の写真より、半導体チップ傾きが小さい場合（チップ傾き：12.0 μm ）、Al/Cu リード端子の表面に均一な圧痕が形成されていた。また、SAT 観察結果より、超音波接合

Fig.7 Photo images of Al/Cu lead terminal and SAT images of bonding interface after ultrasonic bonding. (a) Small chip tilt: 12.0 μm , (b) Large chip tilt: 98.8 μm .

Fig.8 Effect of chip tilt on bonding area.

後の Al/Cu リード端子表面の圧痕形状と同様な形状の接合領域が得られていることを確認した。一方で、チップ傾きが大きい場合（チップ傾き：98.8 μm）、Fig.7(b) の Al/Cu リード端子表面の写真より、Al/Cu リード端子の表面圧痕は、左上に偏った形状で形成されており、また、チップ傾きの小さいサンプルと比較して接合面積も減少していることが分かる。Fig.8 に半導体チップ傾きと接合面積の関係を示す（接合条件 周波数：30 kHz、振幅：15.2 μm、荷重：100 N、接合時間 0.2 s）。チップ傾きの増加に伴って接合面積が減少する傾向が見られた。これら接合面積の減少は、超音波接合ツールが片当たりし、Al/Cu リード端子表面の一部にしか規定の荷重が加わらなかったためと考えられる。

3.3 バンプ Al/Cu リード端子の適用検討

半導体チップ傾きによって接合面積が減少し、必要な接合面積を確保できなかった場合、通電時に過剰な発熱が懸念される。想定以上の熱が発生した場合、接合部における熱歪みも大きくなるため Al/Cu リード端子接合部の信頼性低下の原因となる。そこで、半導体チップ傾きによらず接合面積の確保が可能なリード端子形状を検討した。Fig.3(b) に示したように、Al/Cu リード端子の半導体チップとの接合面である Al 層側に φ100 μm、高さ 0.1 mm のバンプを接合面の中心に 1 点、四隅に各 1 点ずつの計 5 点形成した。このリード端子形状であれば、端子先端のバンプが優先的に潰れて接合されていくため、半導体チップに傾きによる接合面積の減少を抑制できると考えられる。Fig.9 に各半導体チップ傾きにおける超音波接合後のバンプ Al/Cu リード端子の表面観察結果および、SAT による接合状態の観察結果を示す（接合条件 周波数：30 kHz、振幅：15.2 μm、荷重：100 N、接合時間 0.2 s）。Fig.9(a)、(b) のバンプ Al/Cu リード端子表面の写真より、半導体チップ傾きが小さいサンプル（チップ傾き：13.0 μm）と大きいサンプル（チップ傾き：62.0 μm）のいずれの場合においても、バンプ Al/Cu リード

Fig.9 Photo images of bumped Al/Cu lead terminal and, SAT images of bonding interface after ultrasonic bonding. (a) Small chip tilt: 13.0 μm, (b) Large chip tilt: 62.0 μm.

Fig.10 Effect of chip tilt on bonding area.

端子の表面に均一な圧痕が形成されていた。また、Fig.9(a) の SAT 観察結果より、バンプ Al/Cu リード端子のバンプ位置（5ヶ所）を中心に接合領域が広がっていることが分かる。また、Fig.9(b) の SAT 観察結果より、チップ傾きの大きいサンプル（チップ傾き：62 μm）においても、接合面積が減少しているものの、バンプ位置（5ヶ所）を中心に接合領域が得られることが分かった。Fig.10 にバンプを形成していない Al/Cu リード端子とバンプ Al/Cu リード端子を用いた半導体チップ上の超音波接合において、半導体チップ傾きと接合面積の関係を示す（接合条件 周波数：30 kHz、

Fig.11 SAT image of bonding interface after thermal cycling test (- 45 ~ 150℃). (a) Bumped Al/Cu lead terminal, (b) Al/Cu lead terminal.

Fig.12 Effect of bumps on changes of bonding area through -45/150℃ thermal cycling test.

振幅：15.2 μm 、荷重：100 N、接合時間 0.2 s)。いずれのリード端子を超音波接合した場合も、チップ傾きの増加に伴って接合面積が減少する傾向が見られた。しかしながら、バンプ Al/Cu リード端子は、Al/Cu リード端子と比較して接合面積の減少傾向が小さく、バンプ形成によって半導体チップ傾きによる接合面積減少の抑制効果が確認できた。これは、リード端子先端のバンプが優先的に潰れて接合されていくため、半導体チップ傾きによらず接触状態が安定するためであると考えられる。

3.4 温度サイクル試験

バンプ Al/Cu リード端子および、Al/Cu リード端子を半導体チップ上に直接超音波接合したサンプルについて、温度サイクル試験（-45℃～150℃、20 min/20 min）を実施した（接合条件 周波数：30 kHz、振幅：15.2 μm 、荷重：100 N、接合時間 0.2 s）。0 サイクル（初期）から 1000 サ

Fig.13 Cross section image of bonding interface with bumped Al/Cu lead terminal. (a) before bonding, (b) after bonding

イクルまでの所定のサイクル数での SAT 画像を Fig.11 に、サイクル数と接合面積の関係を Fig.12 に示す。Al/Cu リード端子は、サイクル数の増加とともに両端から中央部に向かって剥離が進展していき、500 サイクル時点で接合面積は、初期の半分以下になり、1000 サイクル後には初期の接合面積の 8.4% にまで減少した。一方で、バンプ Al/Cu リード端子は、バンプ直下の領域は剥離することなく接合状態を維持し、1000 サイクル後も接合面積が 34.5% であり、Al/Cu リード端子と比較して高い温度サイクル信頼性を示した。以上の結果より、バンプ Al/Cu リード端子を用いることで、温度サイクル寿命の改善効果を実証できた。Fig.13(a) にバンプ Al/Cu リード端子単体および、Fig.13(b) に超音波接合した後の断面観察結果を示す。Fig.13(a1) および、(a2) のバンプ Al/Cu リード端子単体の断面写真より、プレス加工によってバンプを形成した箇所の Al の結晶粒は、その他の場所の Al の結晶粒と比較して細くなっていることが分かった。また、Fig.13(b) のバンプ Al/Cu リード端子を用いて超音波接合した後の断面写真より、Al 電極とのバンプ Al/Cu リード端子の接合界面において、Al 電極の結晶サイズと同等の微細な結晶粒が観察された。温度サイ

クルによる結晶粒の粗大化が、接合層にクラックを形成し、信頼性低下の原因になるといわれている⁵⁾。つまり、バンプ形成部のAl層とAl電極の微細な結晶同士の超音波接合により、微細な結晶粒を有する接合界面が得られ、結果として、温度サイクル信頼性が向上したと思われる。

4. まとめ

傾きを有する半導体チップ上にAl/Cuリード端子および、バンプAl/Cuリード端子を直接超音波接合し、半導体チップ傾きの影響について検証し、それらの信頼性について検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) Al/Cu リード端子において、チップ傾きが存在すると、超音波接合ツールの片当たりによって接合面積が減少することが分かった。
- 2) バンプ Al/Cu リード端子を用いることで、バンプが優先的に潰れて接合され、チップ傾き（数 μm ～約200 μm ）による接合面積の減少を抑制する効果が得られた。
- 3) 温度サイクル試験（-45℃～150℃）の結果、バンプ Al/Cu リード端子は、1000 サイクル後に Al/Cu リード端子と比較して約4倍の接合面積を維持し、温度サイクル寿命の改善効果を実証できた。

参考文献

- 1) 木戸和優、百瀬文彦、西村芳孝、後藤友彰、”IGBT モジュール用超音波接合技術の開発（第二報）”、第17回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集、**17** (2011) 197-200.
- 2) Bryan Ong, Mohd Helmy, Shirley Chuah, “Heavy Al Ribbon Interconnect: An Alternative Solution for Hybrid Power Packaging”, Proc. IMAPS International Conference and Exhibition on High Temperature Electronics, HiTEC 2004, Long Beach, CA; United States; November 14-18, 2004, p1-10.
- 3) K. Ozaki, T. Kurosu, J. Onuki, “Development of Damage Free Thick Al-Cu Wire Bonding Process and Reliability of the Wire Bonds”, The Electrochemical Society of Japan, **82**(2) (2014) 100-103.
- 4) 米田裕、坂元創一、荒谷修三、菊池正雄、柳本辰則、茂永隆、”超音波接合におけるインサート材が接合性に与える影響”、第20回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集、**20** (2014) 75-78.
- 5) T. Saito, Y. Nishimura, K. Kido, F. Momose, E. Mochizuki, Y. Takahashi, “New assembly technologies for $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ continuous operation guaranty of IGBT module”, Proc. PCIM Europe 2013, Nuremberg; Germany; May 14-16, 2013, p455-461.