電子デバイスの導電性樹脂による実装プロセスの検討

Study for Electric Device Assembly Process Using Conductive Adhesive

藤 野 純 司*
Junji FUJINO

(Received May 19, 2005)

Electric devices with semiconductors are applied to all apparatus including substation equipment, transport machines, home electronics, and cellular phones. Power modules deal large current, and high frequency/optical modules control GHz band signals. As a result, these semiconductors have more than 100 times heat density of memory or MPU chips. Pb-rich high temperature solder and expensive Au-rich solder are applied to these modules, however, thermal stress might be a problem not only for long-term reliability but also for the initial characteristics.

The authors studied the assembly of these electric devices using conductive adhesive as a substitute bonding material. We proved that atmospheric aluminum oxides caused electric resistance and that power chips with long rectangle sides over 10 mm have a much larger thermal resistance than theoretical values. We found that it is effective to scratch and remove these oxides through transferred adhesive on aluminum electrodes and to diebond them onto the solder projection previously formed on the die pads.

Key Words: Power Module, Optical Module, Conductive Adhesive, Electric Resistance, Thermal Resistance

1. 緒言

輸送機器や変電所システムなどの大型設備から、携帯情報端末や家電製品などの小型製品まで、現代の生活のあらゆる場面で半導体素子を用いた電子デバイスが適用されている。特に近年の環境問題から、分散発電システムや輸送機器の省エネルギーを実現するパワーモジュールの適用範囲は広がりつつある。また、ブロードバンドネットワークや高品位デジタル放送の普及に伴い、高周波/光モジュールはさらなる高速動作と高出力化が求められている。これら電子デバイスで用いられるパワー素子は数千 A におよぶ大電流を制御するため、また高周波/光素子は数十 GHz の高周波信号を微小素子で制御するため、一般的なメモリーや MPU 用半導体素子の 100 倍以上の発熱密度を有する。

パワーモジュールの概念図を Fig.1 に示す¹⁾。熱伝導に優れたセラミックベースの基板に、複数個のパワー素子がダイボンディングされ、最大 1000 ポイントにも及ぶ Al ワイヤボンディングによって電氣的接続が形成される。このセラミック基板がさらに金属製の放熱板に搭載され、ケースごとと絶縁用のゲルなどで封止されてデバイス実装される。このパワー素子のダイボンディングには、温度差をつけたステップはんだ付の必要から、Pb を多く含んだ高融点はんだが使用されることが多い。

高周波/光モジュールの概念図を Fig.2 に示す。高周波/光素子が搭載された金属やセラミック製のヒートスプレッダが

Fig.1 Power module.

Fig.2 Optical module.

*三菱電機株式会社 高周波・光デバイス製作所 (〒664-8641 兵庫県伊丹市瑞原 4 丁目 1 番地)
Mitsubishi Electric Corp.-High Frequency & Optical Device Works. (4-1 Mizuhara Itami, Hyogo 664-8641, Japan)

パッケージにダイボンディングされ、Au ワイヤや Au リボンなどで電氣的に接続される。これらのモジュールの多くは、キャップなどで気密封止されてデバイス実装される。この高周波/光素子のダイボンディングには、気密封止や光学系の汚染を防止するためにフラックスレスはんだ付の必要から、80Au20Sn はんだが使用されることが多い。

Al ワイヤボンディングは、接合不良があると電気抵抗が大きくなってジュール熱が増大し、素子を損傷する可能性がある²⁾。また、Pb を多く含んだはんだは、85%以上の含有率のものについては現時点では規制対象外であるが、環境問題の点からも使用しないことが望ましい。さらに、80Au20Sn はんだは、コスト面や貴金属の消費を防ぐためにも使用を制約する必要がある。

本研究では、Al ワイヤボンディングやはんだダイボンディングの代替接合材料として、Ag フィラーを樹脂に分散させた導電性接着剤を取り上げ、その適用性について検討した。

2. 高放熱デバイス実装に要求される特性

発熱密度の大きな半導体素子のデバイス実装においては、半導体素子で発生する熱を可能な限り低減し、基板や放熱板に放熱することが重要となる。

半導体素子において発生する熱の一部であるジュール熱を低減するためには、接合界面の電気抵抗が小さいことが望ましい。

また、放熱性を向上させるには、ダイボンディング部の熱抵抗を低減することが必要となる。ダイボンディング部の熱抵抗は、接合部に発生するボイド（空隙）によっても増大するため、ボイドの少ない接合部の形成が必要となる。

さらに初期特性だけでなく、長期信頼性の面から特性が経時劣化しないことが求められる。パワー素子や高周波/光素子で用いられるウエハ材料である Si や GaAs は、線熱膨張係数が $3\sim5\times10^{-6}\text{m/mK}$ 程度であるのに対し、アルミナ製や AlN 製セラミック基板は $7\sim8\times10^{-6}\text{m/mK}$ とやや大きく、放熱板としてよく用いられる Cu は $17\times10^{-6}\text{m/mK}$ であり、Al は $23\times10^{-6}\text{m/mK}$ とさらに大きい。このことが原因で界面の剥離やクラックが進展し、電気抵抗や熱抵抗が大きくなることは避けなければならない。特に高周波/光素子は、熱応力による結晶の歪によって最高出力やしきい値電流などの特性にも影響を受けやすい³⁾⁴⁾⁵⁾。上記の理由から、接合部の熱応力は可能な限り小さくする必要があり、はんだと比較すると低温接合プロセスであり、弾性係数の低い導電性接着剤は、これらの問題点を解決できる可能性を有する⁶⁾。

3. 供試材料および実験方法

3.1 供試材料

今回用いた導電性接着剤は市販の Ag ペーストで、エポキシ系樹脂に直径0.01mm程度の鱗片状 Ag フィラーと0.001mm径程度の球形 Ag 粒を分散させたものである。接合部の断面図を Fig.3 に示す。電気抵抗と熱抵抗の低減を目的に、Ag

含有率は 90wt%程度と極めて多くなっている。実験に用いた市販接着剤の物性値（メーカ測定カタログ値）を Table 1 に 63Sn-37Pb はんだと比較して示す。体積抵抗率で比較すると、63Sn-37Pb はんだが $5\times10^{-8}\Omega\text{m}$ であるのに対して、導電性接着剤は $4\sim5\times10^{-7}\Omega\text{m}$ と約 10 倍に高くなっている。また、熱伝導率は Sn-Pb 系はんだが 38W/mK であるのに対して、導電性接着剤は 15~25W/mK と約 1/2 倍に低くなっている。

被接合材料としては20mm×30mm×1mmのAl板、Cu板、およびCuめっきAl板を用意した。また5種類のサイズのSi製ダイオード素子①4.0mm×3.0mm、②7.0mm×5.0mm、③10.0mm×5.0mm、④11.0mm×6.0mm、⑤16.0mm×10.0mmを用意した。

3.2 電気抵抗測定用サンプルの作製と電気抵抗の測定方法

3.2.1 サンプル作製方法

導電性接着剤 A を用い、転写供給用として直径 5mm のアルミ製転写ピンを用いた。厚さ 0.1mm の深さを有する転写ステージに、導電性接着剤をスキージングし、転写ピンを用いて Al 板上に供給を行った。長手方向に 10mm ずらした位置に Cu 板を搭載し、50g の分銅を用いて荷重をかけながら 170℃に設定したホットプレートにて 3600s キュアすることでサンプル作製を行った。断面の観察結果から、約 0.1mm の厚さの接合部が形成され、その直径は約 10mm となることが分かった。

3.2.2 電気抵抗測定方法

四端子法電気抵抗測定器を用い、Al 板と Cu 板に端子を接触させて電気抵抗の測定を行った。なお、測定値のばらつきを吸収するために3回の測定の平均値を抵抗値として採用することとした。また、比較のため、Cu 板-Cu 板の場合の測

Fig.3 Crosssection of conductive adhesive.

Table 1 Material properties of conductive adhesive.

Material	Tg (°C)	Thermal conductivity (W/m·K)	Volume resistance (Ωm)	Young's modulus (MPa)	Ag contents (wt%)
Adhesive A	40	25	4×10^{-7}	1240	90
Adhesive B	15	15	5×10^{-7}	570	88~90
63Sn-37Pb	-	38	5×10^{-8}	21600	-

定も行った。

3.3 熱抵抗測定用サンプルの作製と熱抵抗の測定方法

3.3.1 サンプル作製方法

半導体素子など角型形状への導電性接着剤の供給方法としては、開口マスク印刷、メッシュマスク印刷、転写、ディスペンサ供給が考えられるが、ディスペンサ供給で用いるシリレンジ内にペーストを充填すると、フィラーと樹脂成分の分離が進行するため 86400s (1day) 以内に使い切る必要があることから評価対象から除外した。

残りの3手法についてガラスチップを用い、接合後のボイド観察を行った。導電性接着剤 B の標準的な加熱プロファイル (昇温速度 $0.17^{\circ}\text{C}/\text{s}$ で 85°C まで加熱して 1800s 保持。その後昇温速度 $0.17^{\circ}\text{C}/\text{s}$ で 175°C まで加熱して 900s 保持。荷重は 0.01MPa 。) にてキュアを行った。ガラスチップ側から接合部をスキャナーで画像取り込みを行い、デジタル処理によって2値化した結果、Fig.4 に示すように、開口マスクやメッシュマスクでは、20%以上のボイド率となっている。これはマスクの版離れ後の表面凹凸が起因と推定される。一方、直径5mmの転写ピンを用いた転写手法では、ボイド率が0.5%に抑制されていることが分かった。

パワーモジュールでは最大で 15mm 程度のパワー素子を用いる場合がある。このような大面積ダイボンディング部において1箇所集中して供給すると、導電性接着剤が広がったときの形状が円形となり、長方形の素子でははみ出しを生じる。四角形状に4箇所に供給すると、中央部に取り残される空間ができってしまうために、Fig.5 に示すようにボイドができやすくなる。一方、中央を5mm径、周囲4点を3mm径とした5点供給によってほぼボイド発生が抑制されることが確認された。

開口マスク、メッシュマスクともパワー素子表面への印刷を考えた場合、素子表面へのダメージを防止するために高コストなマスクの鏡面処理が必要である。一方で、転写法では転写ステージに残ったペーストを回収でき、高価な導電性接着剤の使用量を必要最小限に抑制することが可能である。これらのことから、以降は導電性接着剤の供給方式としては転写法を採用した。

各サイズダイオード素子に合わせた転写ピンを用意し、導電性接着剤 B を供給し、Cu 放熱板上にダイオード素子を搭載して、 0.01MPa の荷重をかけながらホットプレートにて 170°C 3600s のキュアを行った。さらに Cu 放熱板上に $3\text{mm} \times 20\text{mm} \times 1\text{mm}$ の Al 端子を耐熱両面テープで絶縁しながら接着し、ダイオード表面と Al ワイヤボンディングによって接続してサンプル作製を行った。

3.3.2 熱抵抗測定方法

Fig.6 に示すように、ダイオード表面と Cu 放熱板裏面に形成した溝に $\phi 0.05\text{mm}$ の熱電対を耐熱テープを用いて固定し、アルミ製放熱フィンに Cu 放熱板を熱伝導グリスによって接

Fig.4 Supplying methods and voids.

Fig.5 Supplying points and voids.

Fig.6 Thermal resistance measuring method.

触させた。放熱フィンファンを用いて十分冷却し、ダイオードに所定の電圧をかけ、通電すると素子上面と Cu 板下面との間に温度差 (ΔT) を生じる。その温度差を、電流値 (A) と電圧 (V) の積で除すると熱抵抗値 (K/W) が求められる。

なお、温度差を測定する場合、フィンへの接触状態によって測定値に±10%程度のばらつきが生じるため、接触状態を変えながら10回繰り返し測定し、平均値を求めることとした。

4. 導電性樹脂によるダイボンディング部の電気抵抗

4.1 ダイボンディング部の電気抵抗計測結果

Cu 板-Cu 板で金属板の端部間の電気抵抗を測定すると、安定して $0.15\text{m}\Omega$ 前後を示すのに対し、Al 板-Cu 板では $1\text{m}\Omega$ から数十 $\text{m}\Omega$ と抵抗値が大きくなり、ばらつきも大きいことが分かった。これは、Al 板の表面には緻密な自然酸化膜が生成されており、Ag フィラーの接触点での電気抵抗となっていると考えられる⁷⁾⁸⁾。

なお、これらの数値から逆算すると、Cu 板-Cu 板の場合でも導電性接着剤の体積抵抗率は $10^{-5}\Omega\text{m}$ オーダとなり、カタログ値よりも100倍以上大きい。これは界面抵抗を含むため、金属板表面の酸化状態だけでなく、金属板表面と Ag フィラーの接触状態によっても左右されるものと考えられる。

4.2 電極表面のスクラッチによる電気抵抗改善

前項で示した電気抵抗の測定結果からわかるように、Cu 板および Al 板に対する接合部では、金属板の表面酸化膜の影響で電気抵抗が非常に高くなっている。特に Al 板の表面酸化膜を除去することにより、電気抵抗の改善が図られるとの考えから、Fig.7 に示すように、金属板上に転写した導電性接着剤の上からスクラッチすることにより金属板表面の酸化膜を除去する手法を検討した。スクラッチには、半導体素子のファンクションテスト用コンタクトプローブ (0.3mm ピッチで並んだ 20 本の金属針) を用いた。

スクラッチした金属板表面には、金属針 1 本あたり約 $0.01\text{mm} \times 0.02\text{mm}$ の圧痕が形成されるが、摩擦によって露出された金属の新生面が大気に触れにくいために、再酸化を抑制することが可能と考えられる。

金属板表面のスクラッチにおいて、Fig.8 に示すように、Al 板-Cu 板の場合にはスクラッチ回数を増すほどに電気抵抗が小さくなり、繰り返し測定精度も向上することが分かった。導電性接着剤供給前にスクラッチを行った場合は、 $1.6\text{m}\Omega \sim 7.3\text{m}\Omega$ となり、電気抵抗の改善は確認できなかった。一方、Cu 板-Cu 板の場合には、スクラッチによる電気抵抗の改善は測定できなかった。

上記の結果から、Cu と異なり Al の場合には、数分でも大気曝露されると Al の自然酸化膜が生成されて電気抵抗が増大するが、金属板上に転写した導電性接着剤の上からコンタクトプローブを用いてスクラッチすることにより、再酸化を抑制できることが確認された。

次に温度サイクル試験 ($-40^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$, 900s/900s) を行った結果、Fig.9 に示すように、Al 板-Cu 板では、サイクル数に伴い電気抵抗が増大し、その程度はスクラッチ回数の少ないものほど顕著であることが分かった。20 回 (400 点) のスクラッチ試験片においては 30%程度の電気抵抗増大が確

Fig.7 Scratching process.

Fig.8 Effect of scratching.

Fig.9 Thermal cycling test.

認された。一方、Cu 板-Cu 板試験片は電気抵抗の変化がほとんどなかった。

実際には Al 板-Cu 板の場合には線熱膨張係数の差があり、Cu 板-Cu 板の場合との単純な比較はできない。線熱膨張係数の差による熱応力の影響を排除するために、Cu めっきを施した Al 板と Cu 板を接着し、同様の温度サイクル試験を行ったところ、温度サイクルによる電気抵抗の増大はやはり約 30%あり、めっきなし Al 板-Cu 板の場合と同程度であった。これらのことから 20 回のスクラッチは十分に Al の表面酸化膜の影響を改善できているものと推察される。

5. 導電性接着剤の熱抵抗

5.1 ダイボンディング部の熱抵抗測定結果

導電性接着剤を用いたサンプルにおいて測定された熱抵抗値は、物性値から求めた理論値に対して 120~140%程度となった。比較のために導電性接着剤と同じ接合部厚さ（約 0.03mm）になるように 63Sn-37Pb はんだを用いて接合し、同様の測定を行うと熱抵抗値はばらつきも小さく、ほぼ理論値で安定することが分かった。この差異は、はんだ接合が金属拡散を伴った接合であるのに比較して、導電性接着剤は Ag フィラーの接触によって熱伝達を行っているためであると考えられる⁹⁾。従って導電性接着剤の接合メカニズムを含めて接合部の熱抵抗を論じる必要がある。

①4.0mm×3.0mm のダイオードの場合、中心からの距離 2mm について線熱膨張係数差とキュア温度から常温までの温度差 (150K) を掛け合わせると最大収縮量の差は 0.004mm 程度となる。実際には反りによって伸びの差は緩和され、すべてが剪断に寄与するわけではないが、素子の長辺が 10.0mm となると伸びの差は 0.01mm となり、導電性接着剤に含まれる Ag フィラーの最大サイズに近くなる。そのためフィラー同士の接触状態にも大きな変化が生じると想像される。

素子サイズの影響を検証する目的で、その他の 4 種類のサイズのダイオードについても同様のダイボンディングを行った。③10.0mm×5.0mm までの範囲では、測定された熱抵抗値は理論値の 150%程度であったが、素子サイズの拡大に伴って理論値との差異が大きくなり、④16.0mm×10.0mm 素子では理論値の 400%前後にまで及んだ。

5.2 温度サイクル試験による熱抵抗増大

各サイズのダイオード素子をダイボンディングしたサンプルを、-40℃~+125℃、900s/900s の温度サイクル試験にかけ、100 サイクルごとに 300 サイクルまで熱抵抗値の測定を行った。温度サイクル試験後の熱抵抗測定を行うと、Fig.10 に示すように、素子サイズが大きいほど温度サイクルによる熱抵抗の増大量も大きくなる。熱抵抗の絶対値ではなく、“300 サイクルにおいて初期熱抵抗値の 130%までを良品とする”という筆者らの温度サイクル良否判定基準に当てはめると、③10.0mm×5.0mm までが今回用いた導電性接着剤 B でダイボンディング可能な最大素子サイズと判断された。

5.3 はんだとの組み合わせによる熱抵抗改善

10mm を越えるサイズの素子に導電性接着剤を適用するために、線熱膨張係数差による熱歪みを分散させる手法について検討した。Fig.11 のように、ソルダレジストの代わりに耐熱粘着テープを貼った Cu 板上に、はんだを印刷供給してリフローし、洗浄した後、素子の接着を行う。はんだ印刷量は、はんだ高さが最終的に約 0.1mm となるように調節している。この方法では、Cu 板上のはんだが凸面形状を有するために、熱歪みが大きくなりやすい素子外周部では接着剤厚さが大き

く、発熱が大きい素子中央部では接着剤厚さが小さい。

試験片を作製し、熱抵抗値を測定すると、Fig.12 に示すように、初期値は理論値の 160%程度であった。300 サイクルの温度サイクル試験後においても、熱抵抗値は理論値の 200%以下となり、温度サイクルによる熱抵抗の変化は 25%であったことから、筆者らの良品判定では良品とみなすことができた。一方、荷重を少なくして、導電性接着剤のみを使用し、接合部厚さが 0.1mm となるようにサンプルを作製すると、Ag フィラー間の接触が不十分なため、その熱抵抗値は初期値で理論値の 800%程度まで大きくなる。

なお、導電性接着剤の Ag フィラーは Sn との界面で、局部電池効果によるボイドが発生して接合強度劣化を生じると

Fig.10 Chip size effect of thermal resistance.

Fig.11 Die-bonding onto solder.

Fig.12 Effect of new die-bonding process.

の報告があるが、防湿コート等により水分を遮断することで防止することが可能との報告もある¹⁰⁾。パワーモジュールや高周波/光モジュールの多くはゲル封止や気密封止されており、雰囲気などに留意すれば十分に適用可能と考えられる。

6. 結言

本報では、導電性接着剤の電子デバイスへの適用検討を行い、以下のような知見を得た。

- (1) Al の自然酸化膜が導電性接着剤による接合部の電気抵抗を大きくする要因となっている。
- (2) 導電性接着剤を供給した上から金属針を用いて Al 表面を摩擦することで、再酸化を防止しながら Al 自然酸化膜の除去が可能である。この方法を用いて Al 板を Cu 板と接着すると、Cu 板-Cu 板の場合と同等の電気抵抗に抑えることが可能である。
- (3) 本報で用いた導電性接着剤の場合、10mm までのパワー素子では、ダイボンディング部の熱抵抗の測定値は理論値の150%程度となるが、これははんだ接合のような金属接合界面よりも、導電性接着剤では大きな界面抵抗が存在するためである。
- (4) Cu 板に供給した凸面状のはんだ上に接着することで、16mm サイズの素子においても耐温度サイクル性に優れたダイボンディングが可能となる。

引用文献

- 1) 加柴良裕: “銅導体セラミック基板,” エレクトロニクス実装技術, **6** (1991) 71-74.
- 2) 大貫仁, 小泉正博, 二瓶正恭: “パワー半導体におけるワイヤボンディング技術,” 第 52 回マイクロ接合研究委員会 (1997) 25-38.
- 3) 伊藤良一, 中村道治: “半導体レーザ,” (1989) 183.
- 4) Daisuke UEDA: “Recent Aspects of GaAs Devices for Mobile Communication System,” MWE'97 Microwave Workshop Digest, (1997) 143-148.
- 5) K. ATSUMI: ” Highly Reliable High Power Diode Laser for Laser Radar Application,” Denso Technical Review, **9-2** (2004) 88-94.
- 6) 小日向茂: “導電性接着剤,” 日本接着学会誌, **38-12** (2002) 485-492.
- 7) 豊瀬喜久郎: “自動車におけるアルミニウムの接合について,” 日本接着学会誌, **34-11** (1998) 439-445.
- 8) 川上博士: “大気中におけるアルミニウムの接合に関する一検討,” 溶接学会誌, **73-4** (2004) 246-249.
- 9) 武田修: “高熱伝導性導電接着剤の開発と応用,” 第 59 回マイクロ接合研究委員会 (1999) 73-80.
- 10) 寺田信人, 松葉頼重: “はんだ代替銀ペーストの開発,” Mate2006, **12** (2006) 59-62.