

レーザはんだ付に特有の温度場を活用した 異方性はんだ組織制御技術の開発

大阪大学 接合科学研究所

准教授 異 裕章

(2022 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2022240-C2)

キーワード：レーザはんだ付，組織制御，パワーモジュール

1. 研究の目的と背景

近年、環境問題やエネルギー問題を克服するため、省エネの実現が課題である。そこで電力の効率的な制御に欠かせないパワーエレクトロニクスが非常に重要となっている¹⁾。なかでも、パワーエレクトロニクスの基幹部品であるパワーモジュールには、効率的な電力制御や高出力、小型化が求められている。パワーモジュール内部の電極を繋ぐ配線には、一般的にボンディングワイヤが用いられている。従来、このボンディングワイヤには直径 400 μm 程度のアルミニウムワイヤが超音波接合によって接合され用いられてきた²⁾。今後の更なる大容量化に対応するためには、ワイヤからリボンへの形状変更による配線断面積の拡大、ならびに銅への材質変更による配線抵抗の削減などが検討されている³⁾。しかしながら従来の超音波接合では、アルミニウムに比べて高強度な銅配線を精密に接合すること、および大断面積の配線に対して十分な接合面積を確保することには制約があった。そこで、優れた導電性と大きな通電断面積の確保が容易な銅リボンに対して、微小領域を精密に加熱することで接合可能なレーザはんだ付技術の適用が期待されている。

レーザを熱源としたレーザはんだ付には、一般的に光源として Nd:YAG レーザや半導体レーザ、ファイバーレーザなど、主に波長 900~1000 nm の近赤外波長帯のものが用いられている。しかし純銅は近赤外領域に対して常温における光吸収率が 6% と極めて低く、また吸収率の温度依存性が大きいことから安定した入熱が難しい。こうした背景から、近年では波長 450 nm の青色半導体レーザの適用が検討されている⁴⁾。青色半導体レーザの純銅に対する光吸収率は 67% であり、近赤外線レーザに比べて 11 倍の光吸収効率が期待できる⁵⁾。

そこで本研究では、パワーモジュールのアルミニウムのワイヤボンディングに代わる配線形成手法として、純銅に対して高い光吸収率を有する青色半導体レーザを用いたはんだ付プロセスを提案し、そのはんだ付プロセスを短時間化することを目指した。図 1 にパワーモジュールの概略図と本技術の適用を想定する部分を示す。本研究では、回路基板である Direct Bonded Copper(DBC) 基板への純銅リボンのレーザはんだ付の適用性を示すとともに、レーザの照射時間が基板の温度分布とはんだ組織に与える影響を明らかにすることを目的とした。このとき、レーザ加熱特

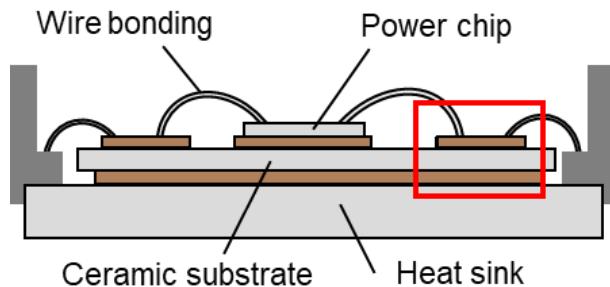


図 1 パワーモジュールの断面構造の模式図

有の温度場である不均一な温度分布がはんだ付部の微細構造に及ぼす影響を調査した。またレーザはんだ付とリフローはんだ付を比較し、青色半導体レーザを用いたレーザはんだ付の有効性を検証した。

2. 実験方法

2・1 レーザはんだ付

図 2 に本研究で用いたレーザはんだ付実験系の模式図を示す。青色半導体レーザは、焦点距離 50 mm のコリメートレンズで平行光にし、ダイクロイックミラーを 45 度で配置し、焦点距離 100 mm のフォーカシングレンズを用いて加工点でのスポット径を 0.2 mm に設定した。またレーザ照射点にミラーを設置し、その像を CCD カメラに結像してビームプロファイルを測定した。このときスポット径が 0.2 mm であることを確認している。図 3 に純銅リボンはんだ付継手の形状を示す。20 mm × 20 mm × 0.9 mm の DBC 基板の上に RMA フラックスに浸漬した φ 1.0 mm × 0.1 mm の Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) はんだと 1.0 mm × 30 mm × 0.1 mm の純銅リボンを図のように順に重ねて設置した。そこに出力 40 W の青色半導体レーザを 5~17.5 s 照射し、はんだ付継手を作製した。このとき、DBC 基板の底面における加工点の真下位置、および DBC 基板の上面における加工点から 5 mm 離れた位置に熱電対を取り付け、レーザ照射中の温度を測定した。

2・2 リフローはんだ付

比較として、リフローはんだ付を行った際の温度プロファイルを図 4 に示す。レーザはんだ付の場合と同様に、リ

フロー炉のステージにDBC基板、はんだ、純銅リボンを順に重ねたものを設置した。リフローはんだ付の場合、DBC基板に対して4つの純銅リボンを同時に設置して実験を行った。設置後、昇温速度1°C/sで加熱を開始し、200°Cで60s保持した。その後再び昇温速度1°C/sで加熱し、250°Cで30s加熱することではんだ付継手を作製した。

2・3 評価方法

はんだ付後の継手は超音波探傷検査(SAT)により接合面の観察を行った。その次に、はんだや銅／はんだ界面の組織の変化を調べるために、切断、樹脂埋め・研磨後に走査型電子顕微鏡(SEM, JSM-IT200, 日本電子株式会社製)を用いて断面を観察し、EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)で組成を分析した。また継手強度試験機(PTR1102, レスカ株式会社製)を用いて90度剥離試験を行い、得られた最大荷重を純銅リボンの幅(1.0mm)で除した値をピール強度とした。ピール強度測定は各レーザ照射条件、およびリフローはんだ付で作製したはんだ付継手においてそれぞれ4回ずつ実施した。

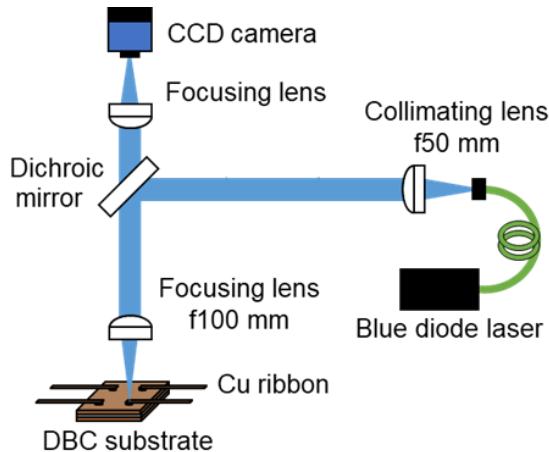


図2 青色半導体レーザを用いた純銅リボンはんだ付実験の構成の模式図

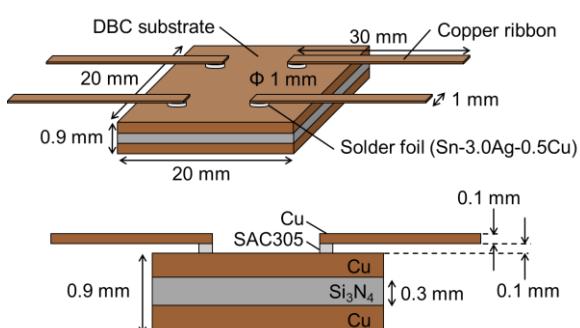


図3 青色半導体レーザを用いた純銅リボンはんだ付試験片の模式図

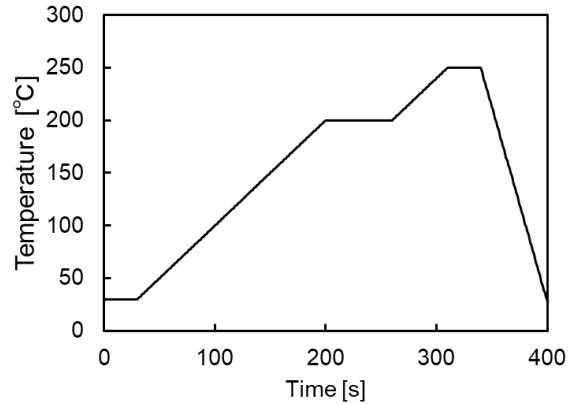


図4 比較のために行ったリフローはんだ付の温度プロファイル

3. 実験結果

レーザ出力を40W一定に設定し、照射時間を5s～17.5sの間で2.5s毎に変更してそれぞれレーザはんだ付を行った。まず初めに、図5に示すように、照射時間を17.5sとしたときのレーザ照射中の温度測定を行った。図5(a)にレーザ照射時におけるDBC基板の温度測定位置を示す。図5(b)にはレーザ照射中のDBC基板の温度測定結果を示している。照射時間17.5sにおいて加工点近傍の最高温度が212°Cに達しており、はんだ内部は融点温度の219°Cに達していると推測される。またDBC基板内の温度分布は小さかった。

図6にレーザ照射時間と純銅リボンのピール強度の関係とリフローはんだ付でのピール強度を示す。リフローはんだ付では5.5～8.5N/mmのピール強度が得られた。レーザはんだ付において照射時間5s、7.5sでは継手は簡単に外れたが、照射時間10sで0.4～9.5N/mm、12.5sで0.2～10.4N/mm、15sで7.1～12.1N/mm、17.5sで7.3～11.5N/mmのピール強度が得られた。DBC基板に対して純銅リボンを良好にレーザはんだ付できることが明らかとなった。またレーザ照射時間の増加によってピール強度は増加し、強度のばらつきも徐々に小さくなつた。レーザ照射時間15sにおいて、レーザはんだ付でリフローはんだ付の約1.4倍のピール強度が得られた。

図7に照射時間15sにおけるレーザはんだ付、およびリフローはんだ付後のSAT画像を示す。黒色で示されている箇所が接合が達成された箇所である。ピール強度の結果と合わせて、いずれの接合方法において良好に接合が達成していることが確認された。また十分なピール強度が得られた照射時間15sのレーザはんだ付とリフローはんだ付において、加熱開始から試料が150°Cに冷却されるまでに要する時間を比較すると、リフローはんだ付では数minを要したのに対してレーザはんだ付では約20sと極めて短時間でのはんだ付が可能であることが示された。

図8に各条件のレーザはんだ付とリフローはんだ付における銅／はんだ界面の上下断面、およびはんだ層全体の

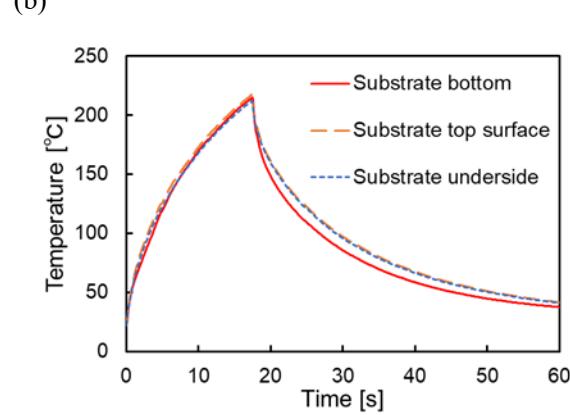
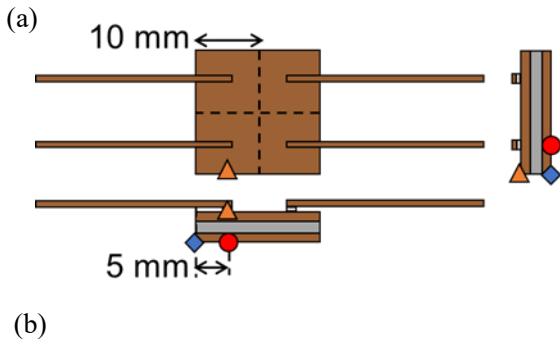


図 5 レーザはんだ付中の温度測定:
(a) 測定位置、(b) 測定結果

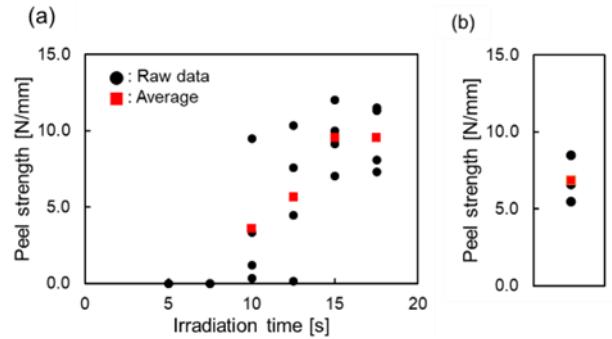


図 6 ピール強度試験結果:
(a) レーザはんだ付、(b) リフローはんだ付

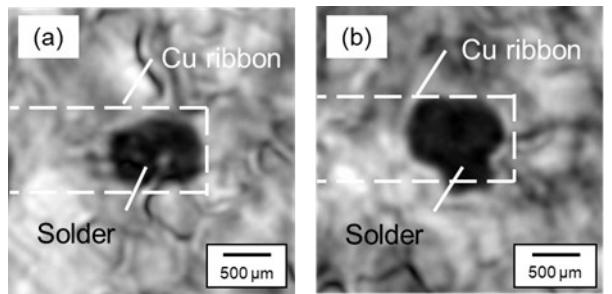


図 7 はんだ接合部の SAM 画像:
(a) レーザはんだ付、(b) リフローはんだ付

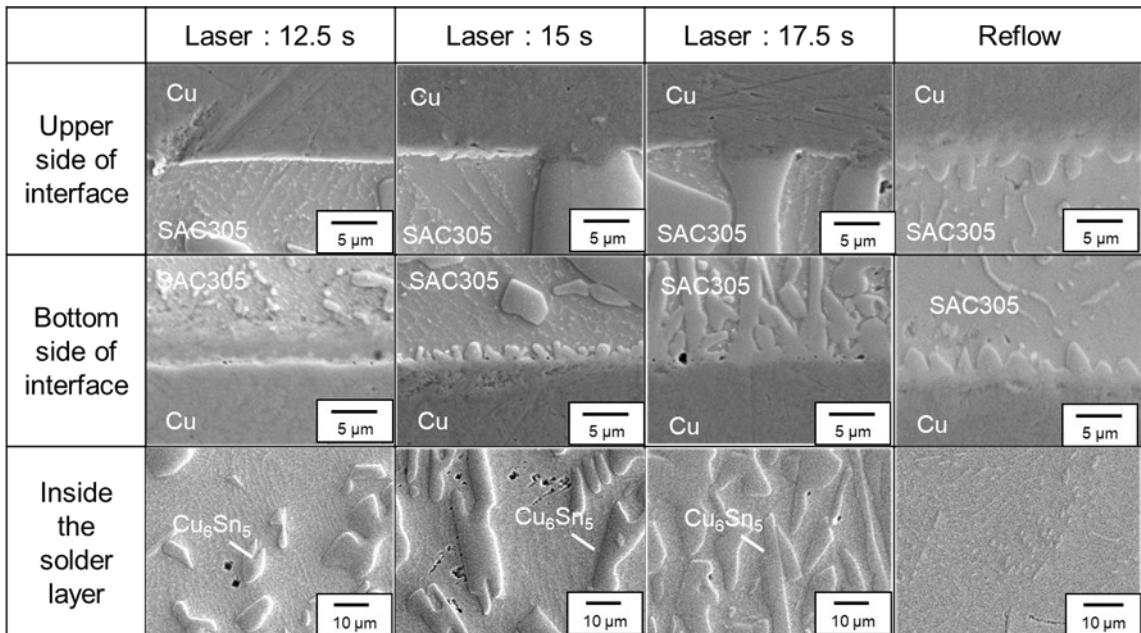


図 8 レーザはんだ付 (40 W) およびリフローはんだ付によるはんだ接合部の断面 SEM 観察結果

SEM 画像を示す。レーザ照射時間 12.5 s では、上下に厚さ 0.5 μm 程度の針状の金属間化合物(IMC, Intermetallic compound)層が確認された。レーザ照射時間 15 s, 17.5 s の下側界面では、それぞれ厚さ 1.3 および 8.5 μm 程度の針状の IMC 層が確認され、照射時間の増加に伴って IMC

厚さも増加した。また 15 s, 17.5 s の上側界面では、大きく成長した IMC が観察された。また、はんだ層内では、リフローはんだ付に比べてレーザはんだ付では IMC 相が特に多く観察された。図 9 に示すように、レーザの照射時間の増加に伴って最高到達温度が高くなっていたことか

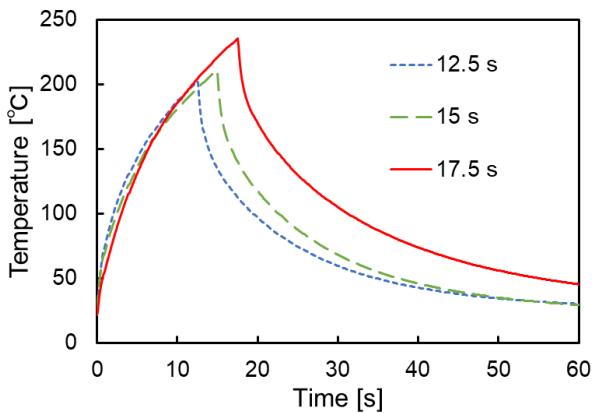


図9 レーザはんだ付(40 Wで12.5, 15.0, 17.5 sの各条件)における温度変化(測定点: DBC基板裏面中央)

ら、はんだ層内にIMC相が多く観察された原因是、溶融はんだ中へのCuの溶解量が増加したためと考えられる。

リボン側と基板側のそれぞれの銅／はんだ界面のIMC厚さに着目すると、照射時間12.5 sは両者で大きな違いは見られなかったが、照射時間15 s、17.5 sではリボン側に比べて基板側界面IMCの厚さが増加する傾向が見られた。Zhaoらによると、温度勾配を有する銅／溶融はんだ／銅のサンドイッチ構造においては高温側よりも低温側の溶融はんだ／銅界面でIMCが厚く成長すると報告されている⁶⁾。レーザ照射中においてもはんだ内部に温度勾配が生じ、リボン側に比べて温度が低い基板側ではIMCが急速に成長したと考えられる。対して、均一な温度分布と考えられるリフローはんだ付では、厚さ3.1 μm程度のスカラップ状のIMC層がリボン側と基板側の両側で確認された。このように、レーザはんだ付に特有の不均一な温度場は、はんだ接合部中の微細構造の異方性を助長する可能性があることがわかった。

4. 結言

本研究では、DBC基板への純銅リボンのレーザはんだ付の適用、およびレーザの照射時間が基板の温度分布とはんだ組織に与える影響を明らかにすることを目的とし、レーザのスポット径0.2 mmの実験系を用いて純銅リボンのレーザはんだ付、およびリフローはんだ付を行った。その結果、出力40 WにおいてDBC基板への純銅リボンの

レーザはんだ付が達成された。また温度測定結果から、レーザ照射時のDBC基板の温度分布は小さく、レーザ照射時間の増加に伴って基板の温度も上昇し、ピール強度は増加する傾向が見られた。レーザはんだ付はリフローはんだ付に比べて極めて短時間ではんだ付が達成される上に、約1.4倍のピール強度が得られた。はんだ／DBC基板界面の断面SEM画像から、照射時間の増加に伴って、界面のIMC厚さが増加する傾向が見られた。またレーザはんだ付によるはんだ層内部の組織は、Sn初晶と共晶部の他にCu₆Sn₅のIMCが数多く見られた。

以上のことから、レーザによる加熱でDBC基板への純銅リボンのはんだ付が可能であることが示された。また、レーザを用いた場合、リフローとは異なる特徴的な接合層の組織が観察され、レーザはんだ付に特有の不均一な温度場は、はんだ接合部中の微細構造の異方性を助長する可能性があることがわかった。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団2022年度奨励研究助成(若手研究者枠)(AF-2022240-C2)により行われたものであり、ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Hua Lu, Chris Bailey, Chunyan Yin, Microelectronics Reliability, 49, 1250 (2009).
- 2) Y. Yamada, Y. Takaku, Y. Yagi, I. Nakagawa, T. Atsumi, M. Shirai, I. Ohnuma, K. Ishida, Microelectronics Reliability, 47, 2147 (2007).
- 3) L. Wang, T. Zhang, F. Yang, D. Ma, C. Zhao, Y. PeiL, IEEE Transactions on Power Electronics, 37, 7952 (2022).
- 4) Hiroaki Tatsumi, Seiji Kaneshita, Yuki Kida, Yuji Sato, Masahiro Tsukamoto, Hiroshi Nishikawa, Journal of Manufacturing Processes, 82, 700 (2022).
- 5) E. W. Spizz, A. J. Weigand, R. L. Bowman, J. R. Jack, NASA-TN-D-5353, National Aeronautics and Space Administration (1969).
- 6) N. Zhao, Y. Zhong, M. L. Huang, H. T. Ma, W. Dong, Intermetallics, 79, 28 (2016).