

学術論文

マイクロ波磁場加熱による低耐熱基板上への電子部品実装

Electric component mounting on low heat-resistant substrate using magnetic field heating of microwaves

金澤 賢司¹、渡邊 雄一¹、中村 考志²、西岡 将輝²、宮川 正人²、植村 聖^{1*}
Kenji Kanazawa¹, Yuichi Watanabe¹, Takashi Nakamura², Masateru Nishioka²,
Masato Miyakawa², Sei Uemura^{1*}

1. 産業技術総合研究所 センシングシステム研究センター、2. 産業技術総合研究所 化学プロセス研究部門
1. 〒305-8565 茨城県つくば市東 1-1-1, 2. 〒983-8551 宮城県仙台市宮城野区苦竹 4-2-1
1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1, Higashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8565, Japan
2. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 4-2-1, Nigatake, Aoba-ku, Miyagi, 983-8551, Japan

corresponding author*, e-mail address: sei-uemura@aist.go.jp

キーワード: マイクロ波磁場加熱、シングルモードマイクロ波、選択加熱、はんだ、電子部品実装、低耐熱性基板

Keywords: microwave dielectric heating, single-mode microwave, selective heating, solder, electric component, low heat-resistant substrate

Abstract

Microwave (MW) heating techniques have been paid attention by many technological researches and developers because MW dielectric heating is selective and rapid. However, metals cannot be heated by the electric field because of the spark phenomenon. We developed novel MW soldering system by using cylindrical cavity and single-mode TM_{110} mode that separate electric and magnetic field distribution of MW. Furthermore, we developed a novel short-time melting technology for solder paste using MW dielectric heating. In particular, we found that only solder paste on polyethyleneterephthalate (PET) substrate can absorb MW energy, and can be melted without damage on the substrate using the developed system. Furthermore, we succeeded in mounting a temperature and humidity sensor array using the novel MW heating system without damage to the electric component and electric circuits of the device. The distortion of PET substrate was less than 0.01 %.

1. 緒言

本論文では、マイクロ波の磁場加熱による低耐熱基板上への電子部品実装技術に関して報告する。

近年、人と動物さらには機械など身の回りのあらゆるものがインターネットにつながる「モノのインタ

ーネット(IoT, Internet of Things)」と呼ばれる仕組みが注目を浴びている[1-3]。特に IoT を活用した IoT デバイスには、スマートグリッド、スマートホーム、センサー、アクチュエーターなど様々な応用分野があり、多岐にわたって研究開発が盛んに行われている[3-10]。これら IoT デバイスは、遠隔操作で情報交換および制御、さらには人や動物などの健康状態のモニタリングを、ネットワークを通してオンデマンドで行うことができる。例えば、センサー応用においては、センサーを体に張り付けた際に違和感なく、体の動きを制限されることなく健康状態をモニタリングする必要があるため、柔軟性および伸縮性を有するデバイスが必要である[4-7]。このような背景から、さまざまな機能を有する IoT デバイスへの応用を目指し、テキスタイルやプラスチック基板などのフレキシブル基材やストレッチャブルな熱可塑性エラストマー樹脂上などに IC(integrated circuit)チップや受動部品を実装するデバイス技術開発が求められている。しかし、従来の工業的なはんだ実装では低温・短時間の場合でも 170 °C以上、300 秒程度の加熱プロセスが必要であるため、フレキシブル基材であるポリエチレンテレフタレート(PET)のような耐熱性の低い材料は基材として使用できない[11,12]。

このような背景から、近年、低温実装可能な導電接着

剤や新規な加熱方法の研究開発が求められている。導電接着剤においては、はんだの代替材料として、低温硬化型導電性高分子接着剤が開発されてきた[13]。しかしながら、接着性や導電性などがはんだに劣ること、プロセス時間が長く、材料およびプロセスコストが高いことから、はんだが未だ主流である。一方、金属の加熱方法としては、これまでにレーザー[14-16]、プラズマ放電[17-19]、熱風[20]、マイクロ波[21-26]を用いた加熱方法が報告されている。特に、はんだ加熱においては、従来の熱風によるリフロー加熱は全体を一括で加熱できる一方で昇温・予備加熱・本加熱・冷却プロセスの4工程が必要であり、長時間のプロセス工程を要する。加えて、従来のリフロー加熱プロセスを Fig. 1 左図に示すように低耐熱性基板を使って従来の赤外リフロー炉によるデバイス全体の加熱を行うと、基板が歪んでしまう。また選択加熱として温風スポット加熱で実装した際も、部品への風の当たり具合で加熱ムラが生じるなどの課題がある。一方でマイクロ波加熱は、選択的に短時間で材料の内部が加熱されるため、有機および無機合成などにも使われてきた[24-26]。特にマイクロ波加熱は電子レンジとしてよく知られているが、これは、マイクロ波の電場によって誘電体分子を振動させて、その摩擦熱で物質の温度を上昇させる誘電加熱という

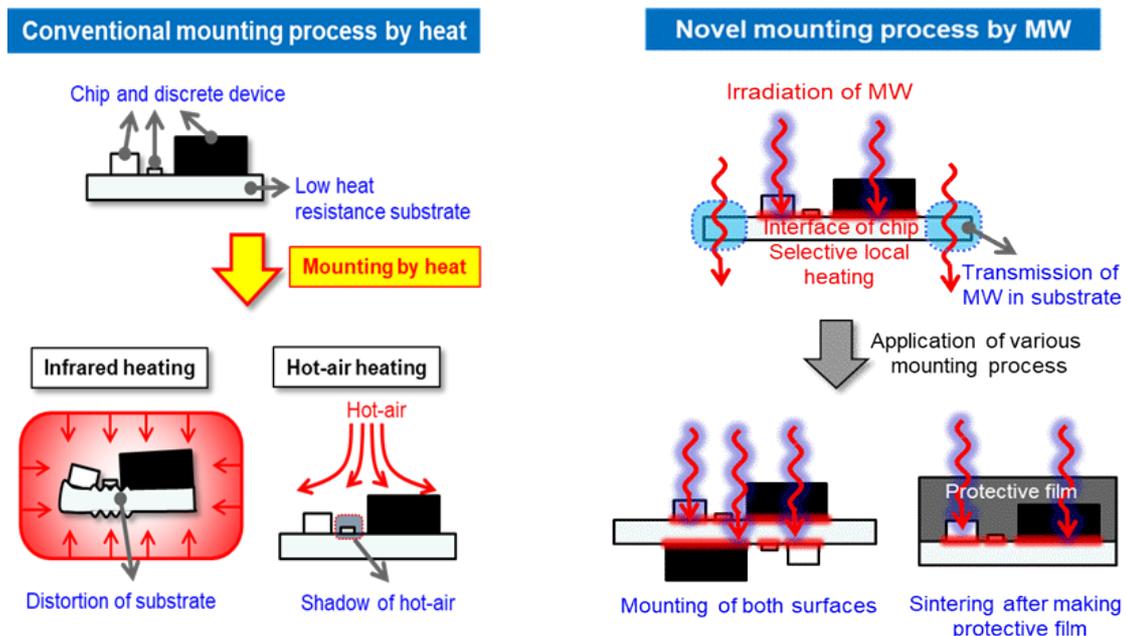


Fig. 1: Conventional (left) and novel (right) mounting processes.

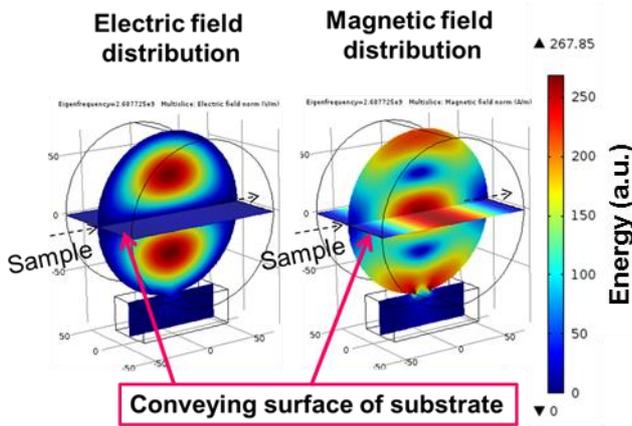


Fig. 2: Simulation of electric field (left) and magnetic field (right) distribution in the cavity.

原理を利用しており、短時間・選択的・効率的に物体を加熱することが可能である。このような特徴から、我々は低耐熱性基板へのセンサー等の電子部品実装に向け、マイクロ波加熱に着目し、Fig. 1 右図に示す新規なマイクロ波加熱実装プロセスを考案した。マイクロ波加熱は、これまでも様々な物体の加熱・乾燥装置に使われており、有望な技術として注目されている。しかしながら、電子レンジに代表される一般的なマイクロ波照射法であるマルチモードを用いた方法で導体を含む基材を加熱すると、マイクロ波中の電場と電極などの金属が作用し、スパーク（放電）が発生し電極の破壊や基材の燃焼が起こるといった課題がある。一方、シングルモードとよばれる特定の定在波を閉じ込めるマイクロ波照射では、電場と磁場の極大となる領域を分離することが可能であり[27]、我々は照射するマイクロ波周波数を自動制御することで、常に安定した定在波を形成する制御技術を開発し、化学プロセスへの適用を行ってきた[25-27]。

そこで我々は、この技術を発展させ、マイクロ波の局所的な選択加熱という特徴を活かしつつ、スパークを抑制する方法として、電界成分が極小となる部分にはんだ付き基板を搬送導入し、磁界成分により加熱することで、基板のダメージなしに、はんだを熔融させ、センサーなどの電子部品を実装する技術の開発を行った。

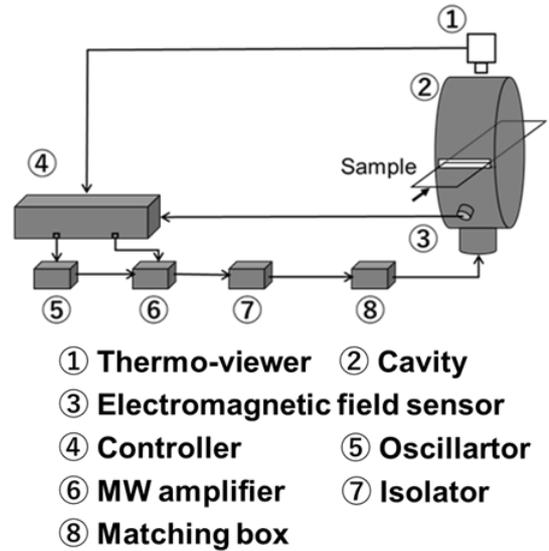


Fig. 3: MW heating system.

2.方法

2-1. マイクロ波加熱装置の概略

Fig. 2 に 2.45 GHz 帯の円筒型空洞共振器(Cavity)を用いたマイクロ波照射装置の搬送機構および空洞共振器内での電界、磁界を COMSOL Multiphysics ソフトウェア[28-30]でシミュレーションした分布図を示す。

本装置では、スパークの発生を防ぐため、空洞共振器内に特定のマイクロ波定在波を形成するシングルモードマイクロ波照射技術を用いて、電界成分と磁界成分のエネルギー分布を固定した。とくに、円筒型空洞共振器を用いて TM_{110} と呼ばれる定在波を形成することにより、Fig. 2 に示した円筒の中心軸に磁界成分のみを集中させ、基板搬送経路上の電界成分を限りなく小さくすることで、照射対象への電界の影響を大幅に低減できる。また、Fig. 3 に空洞共振器を用いた凌和電子社製のマイクロ波照射装置の構成図を示す。これは制御装置④から指示された周波数のマイクロ波を発振器⑤により発振させ、増幅器⑥により加熱に必要な電力に増幅する。その後、増幅器を保護するアイソレータ⑦と反射波を抑制するための整合器⑧を介し、半径 74 cm、高さ 80 cm サイズの円筒型の空洞共振器⑨にマイクロ波を導入できるよう構成されている。空洞共振器側壁には、定在波の形成状況を監視できる電磁界センサー③と加熱対象物の温度を計測する Argo 社製のサーモ

ビューアPI200 が設置してある。制御回路は円筒空洞共振器の中心軸水平面に設置した被加熱対象物に電場が作用しないよう、電磁界センサーの信号をもとに Fig. 2 に示す TM_{110} モードの定在波が形成される共振周波数を 1 秒おきに自動的に導出するよう構成している。

本実験では 2.45 ± 0.05 GHz、最大出力 100 W を用いた。磁界が集中する円筒中心軸上にポリイミド製のシートを配置し、円筒内部に加熱サンプルを搬送した。サンプルの表面温度は、サーモビューアにて測定した。

2-2. 試薬

スズビスマス系の低融点のはんだペースト L20-BLT5-T7F (Sn 42.0/Bi58.0) は、千住金属株式会社から購入し、使用した。導電性銀ペースト REXALPHA はトーヨーケム株式会社から購入し、使用した。

2-3. 温湿度センサーの実装および温湿度測定方法

温湿度センサーアレイシート用の電極パターンは、10 cm 角の PET 基板上に導電性銀ペーストをスクリーン印刷し作製した。その後、はんだペーストをステンシル印刷し、電極パターン上にはんだを形成し、はんだ上にデバイスとして 3×3 個のセンシリオン社製の SHT-31 温湿度センサー(温度精度: $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 、湿度精度: $\pm 0.2\%$)を設置した。シートの設置後に、出力 100 W で 3 秒間マイクロ波照射を行い、温湿度アレイシートを作製した。また、温度および湿度は、日置電機株式会社製の DC シグナルソース SS7012 およびセンシリオン社製の温湿度アナログモジュール SHTDA-2 を用い、測定した。また、マイクロ波実装した温湿度センサーである SHT-31 の温湿度の比較として、同社製の SHT-35(温度精度: $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 、湿度精度: $\pm 1.5\%$)を用いた。

3. 結果と考察

3-1. はんだペーストのマイクロ波加熱特性

Fig. 3 に示したマイクロ波リフロー炉を試作し、マイクロ波リフロー炉内でスズビスマスからなる融点が 140°C の低融点のはんだペーストを PET 基板上にブレードコート法により $1 \times 1 \text{ cm}^2$ (厚み: $58 \mu\text{m}$) のサンプルを作製した。作製したサンプルを空洞共振器中央

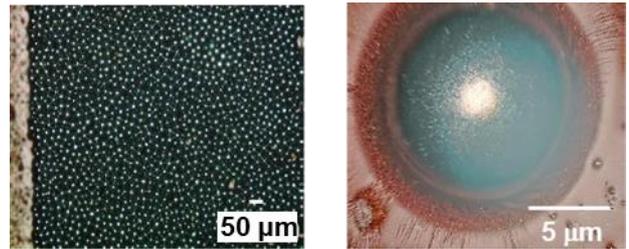


Fig. 4: Photo of solder paste before MW heating (left) and after MW heating (right).

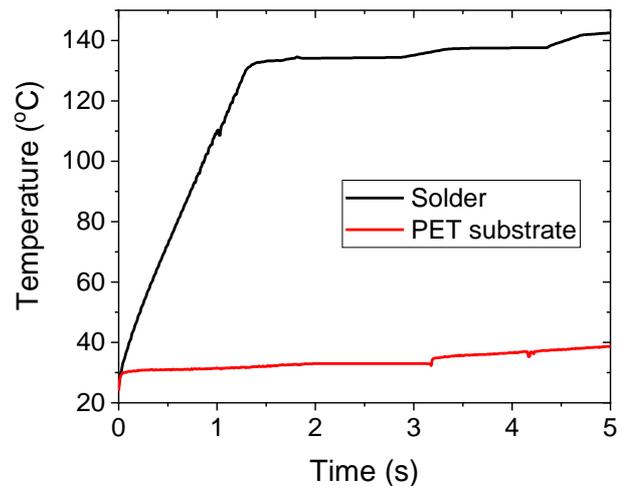


Fig. 5: Temperature of solder pattern (black line) and PET substrate (red line) by MW heating on PET substrate. The area of solder pattern is $1 \times 1 \text{ cm}^2$.

に設置した後、出力 100 W で 5 秒間マイクロ波加熱を行った。Fig. 4 はマイクロ波加熱前後のはんだペーストの外形である。Fig. 5 は、出力 100 W で 5 秒間マイクロ波加熱を行った際のはんだペーストおよび PET 基板の温度変化を示したものである。Fig. 4 右図より、出力 100 W でマイクロ波照射により、溶融していることが確認された。これは、Fig. 5 より、はんだペーストが融点である 140°C に達したからである。また、マイクロ波照射では PET 基板全体の温度があまり上昇していないことが分かった。これより、PET 基板の歪み等のダメージも見られなかった。

3-2. マイクロ波加熱によるはんだ実装

Fig. 6(a)は、マイクロ波を用いて PET 基板上に実装した温湿度センサーチップの概形である。また Fig. 6(b)および

Fig. 6(c)は、Fig. 6(a)に示すセンサーと溶剤ペースト接合(赤色四角)部のマイクロ加熱前後の拡大写真である。Fig. 7 は、マイクロ加熱によるセンサー実装時のセンサーおよび PET 基板の温度測定の結果である。Fig. 7 に示すように、出力 100 W によるマイクロ加熱 3 秒時では、はんだペーストは 145 °C まで到達し、Fig. 6(c)のように溶融した。一方で、PET 基板の温度があまり上昇せずに基板ダメージが小さいことも確認された。一般的な加熱リフロー炉や電気炉を用いたプロセスでは、はんだ溶融に 300 秒程度かかるが、マイクロ加熱では微小領域を選択に加熱できるため、今回は 3 秒という短時間ではんだが溶融し、センサーチップの実装が完了した。

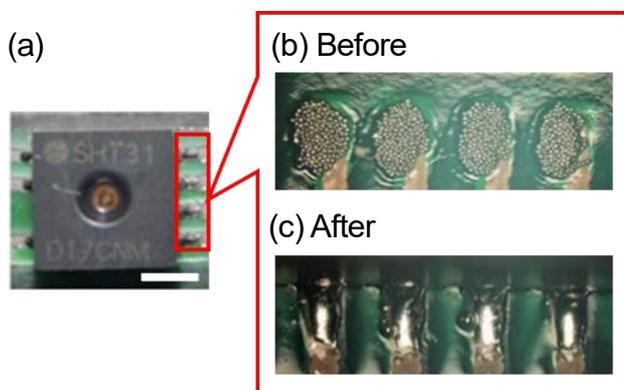


Fig. 6: (a) Photo of sensor. Photo of closeup solder paste (b) before MW heating and (c) after MW heating (bottom). White bar is 1 cm scale.

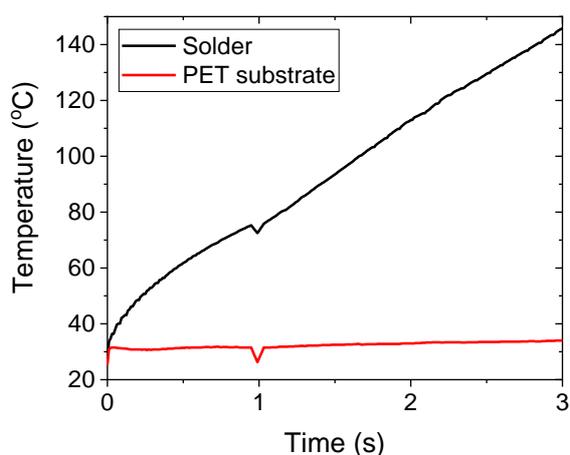


Fig. 7: Temperature of sensor (black line) and PET substrate (red line) in-situ mounting sensor by MW heating.

Table 1 Room temperature and humidity of sensors.

Sensor	Temperature [°C]	Humidity [%]
SHT-35 ^a	23.6	53.3
SHT-31 ^b	24.0	50.0

^a Reference. ^b Component by MW heating.

Table 2 Properties of substrate temperature and heating time, and distortion of PET substrate by conventional and MW heating.

Heating process	Substrate temp. [°C]	Heating time [s]	Distortion of PET [%]
Conventional	> 170	> 300	0.2
MW	30 ^a	< 3	0.01

^a Temperature didn't change by MW heating.

Table 1 に今回マイクロ波実装した SHT-31 と比較センサーである SHT-35 の温湿度測定の結果をまとめる。温湿度センサー SHT-35 の温湿度は、23.6 °C、53.3 %であったのに対し、マイクロ加熱で実装した温湿度センサー SHT-31 の温湿度は、24.0 °C、50.0 %であった。以上より、マイクロ加熱実装した際にも、センサーが機能していることがわかった。

また、Table 2 に従来の電気炉による加熱プロセス実装および、今回のマイクロ波加熱プロセス実装における基板温度、加熱時間、基板歪みの結果をまとめる。耐熱温度 120 °C の PET 基板に通常のリフロープロセスを適用した場合、0.2%の歪みが生じた。これは、10 cm の基板を用いた場合に、最大 200 μm のズレが生じることを意味している。また 200 μm というのは、今回用いたセンサーチップの配線の幅と同程度であるため、設計と配線の位置関係が完全にずれてしまい使用できない。一方、今回開発したマイクロ波リフロー炉では、PET 基板は加熱されず、加熱時間も 3 秒と短時間であるため、PET 基板の歪み量を 0.01%と、従来リフロー方式と比べ歪み量を 1/20 と大幅に改善することができ

た。これにより、10 cm の距離においてズレは最大 10 μm まで低減でき、100 μm 間隔の配線にもほとんど影響がなかった。以上より、マイクロ波加熱によるはんだ溶融技術が実装プロセスとして有用できることが示唆された。

Fig. 8(a)は、10 cm 角の PET 基板の上に 3×3 個の温湿度センサーアレイシートに 3 個のセンサーを本技術で実装したものである。Fig. 8(b)は、Fig. 8(a)のセンサーシートを出力 100 W でマイクロ波加熱した際のサーモカメラ画像である。マイクロ波加熱は、サンプルをキャビティ内に固定し行った。Fig. 8(b)より、はんだおよびセンサー部分が 145 $^{\circ}\text{C}$ 位まで到達し、はんだの溶融が確認された。また、PET 基板は加熱されていないため、熱ダメージも見られずに横一列に並べたセンサー 3 個を同時に搭載することが出来た。Fig. 9(a)は、さらに上段下段も同様にマイクロ波加熱実装で作製したセンサーシートの概形である。Fig. 9(b)は、動作確認として、3×3 個の温湿度センサーアレイシートの中央下のセンサーに手を当てた際に、取得した湿度(左図)および温度(右図)のマッピング画像である。温湿度マッピング結果からわかるように、手を当てた際に湿度および温度が上昇し、湿度マッピング画像では赤色、温度マッピング画像では黄緑色に変化した。このことから、マイクロ波加熱で実装したセンサーが問題なく動作していることが確認できた。

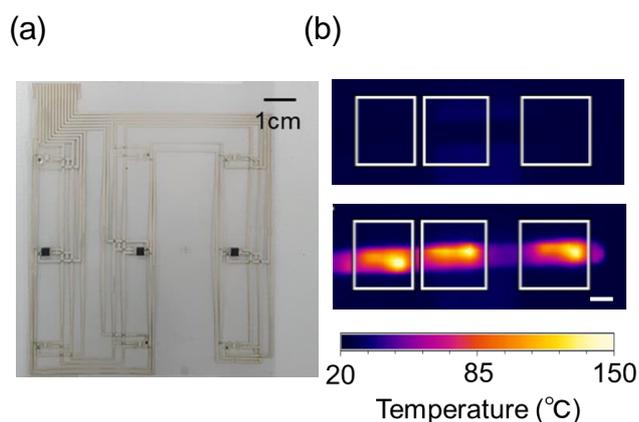


Fig. 8: (a) Photo of a thermo-hygro sensor sheet made by MW heating. (b) Thermography of a thermo-hygro sensor sheet before MW heating (top) and in-situ MW heating on PET substrate (bottom). White bar is 1 cm.

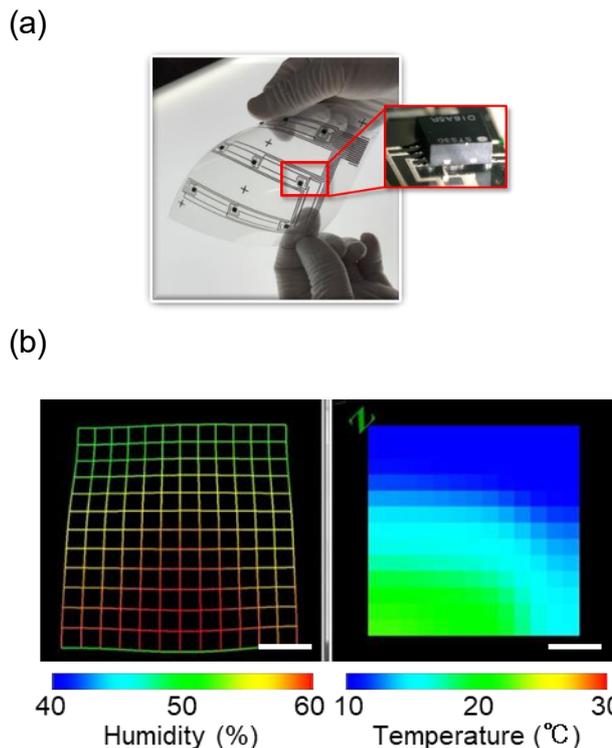


Fig. 9: (a) Photo of a thermo-hygro sensor sheet made by MW heating. A closeup photo is a thermo-hygro sensor. (b) Images of humidity (left) and temperature (right) mappings during holding a hand above the sensor sheet. White bar is 1 cm.

以上より、短時間で選択的にはんだを溶融する技術がセンサーや PET 基板にダメージを与えることなくフレキシブルデバイス実装に利用できることが明らかとなった。

今回、我々が開発したマイクロ波加熱による短時間で選択的にはんだを溶融する技術は、フレキシブル基板に電子部品を実装できる技術といえる。

4. 結論

低耐熱性基板へ電子部品を実装する際、従来のはんだの加熱方式では 300 秒以上の長時間加熱が必要で、基板歪みが生じてしまう問題があった。今回、我々は搬送面状に磁界を集中させて導体をスパークなく加熱できるマイクロ波照射技術と、はんだ接合部分を選択的にマイクロ波により加熱する技術を開発した。3 秒以内ではんだ溶融が完了し、従来の 1/20 の基板歪み量で低耐熱性基板へのデバイス実装ができた。今回開発した

技術は、センサーなどの IoT デバイスを布や伸縮性のある素材上に実装する技術開発やデバイス開発への発展につながることを期待される。

5. 謝辞

本研究は国立研究開発法人産業技術総合研究所の上野尚子氏の技術的サポートのもと行われた。ここに謝意を表します。

引用文献

1. L. Atzori, A. Iera, "The Internet of Things: A survey", *Computer Networks*, **54** (2010), 2787–2805.
2. J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami, "Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions", *Future Generation Computer Systems*, **29** (2013), 1645–1660.
3. A. Al-Fuqaha, M. Mohammadi, M. Aledhari, M. Ayyash, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications", *IEEE Commun. Survey. Tut.*, **17** (2015), 2347–2376.
4. M. Stoppa, A. Chiolerio, "Wearable electronics and smart textiles: A critical review", *Sensors*, **14** (2014), 11957–11992.
5. M. Amjadi, KU Kyung, I. Park, "Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: A review", *Adv. Funct. Mater.*, **26** (2016), 1678–1698.
6. TQ. Trung, NE. Lee, "Flexible and stretchable physical sensor integrated platform for wearable human-activity monitoring and personal healthcare", *Adv. Mater.*, **28** (2016), 4338–4372.
7. M. Parrilla, M. Cuartero, GA. Crespo, "Wearable potentiometric ion sensors", *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **110** (2019), 303–320.
8. Q. Pei, P. Brochu, "Advances in Dielectric Elastomers for Actuators and Artificial Muscles", *Macromol. Rapid Commun.*, **31** (2010), 10–36.
9. W. Gao, S. Emaminejad, H. Y. Y. Nyein, S. Challa, K. Chen, A. Peck, H. M. Fahad, H. Ota, H. Shiraki, D. Kiriya, D.-H. Lien, G. A. Brooks, R. W. Davis, A. Javey, "Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis", *Nature*, **529** (2016), 509–514.
10. K. Parida, JQ Xiong, XR. Zhou, PS. Lee, "Progress on triboelectric nanogenerator with stretchability, self-healability and bio-compatibility", *Nano Energy*, **59** (2019), 237–257.
11. M. Abtew, G. Selvaduray, "Lead-free solders in microelectronics", *Mater. Sci. Eng. Rep.*, **27** (2000), 95–141.
12. K. Suganuma, SJ. Kim, KS. Kim, "High-temperature lead-free solders: properties and possibilities", *JOM.*, **61** (2009), 64–71.
13. Y. Li, C. P. Wong, "Recent advances of conductive adhesives as a lead-free alternative in electronic packaging: materials, processing, reliability and applications", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, **51** (2006) 1–35.
14. C. R. Deckard, "Part generation by layer-wise selective laser sintering. M. Sc. Thesis", The University of Texas at Austin, Austin, USA, (1986).
15. E. C. Santos, M. Shiomi, K. Osakada, T. Laoui, "Rapid manufacturing of metal components by laser forming", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **46** (2006), 1459–1468.
16. D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe, "Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms", *Int. Mater. Rev.*, **57** (2012), 133–164.
17. M. Otori, "Sintering, consolidation, reaction and crystal growth by the spark plasma system (SPS)", *Mater. Sci. Eng. A*, **287** (2000), 183–188.
18. Z. Shen, M. Johnsson, Z. Zhao, M. Nygren, Spark plasma sintering of alumina, *J. Am. Ceram. Soc.*, **85** (2002) 1921–1927.
19. H. Queudet, S. Lemonnier, E. Barraud, J. Guyon, J. Ghanbaja, N. Allain, E. Gaffet, "One-step

- consolidation and precipitation hardening of an ultrafine-grained Al-Zn-Mg alloy powder by spark plasma sintering”, *Mater. Sci. Eng. A*, **685** (2017), 227–234.
20. T. N. Tsai, “Development of an integrated reflow soldering control system using incremental hybrid process knowledge”, *Expert Systems with Applications*, **28** (2005), 681–692.
21. M. Oghbaei, O. Mirzaee, “Microwave versus conventional sintering: a review of fundamentals, advantages and applications”, *J. Alloys Compd.*, **494** (2010), 175–189.
22. R. R. Mishra, A. K. Sharma, “Microwave-material interaction phenomena: heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing”, *Compos Part A*, **81** (2016), 78–97.
23. D. E. Khaled, N. Novas, J. A. Gazquez, F. Manzano-Agugliaro, “Microwave dielectric heating: applications on metals processing”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **82** (2018) 2880–2892.
24. C. O. Kappe, “Controlled microwave heating in modern organic synthesis”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **43** (2004), 6250–6284.
25. M. Nishioka, M. Miyakawa, H. Kataoka, H. Koda, K. Sato, T. M. Suzuki, “Continuous synthesis of monodispersed silver nanoparticles using a homogeneous heating microwave reactor system”, *Nanoscale*, **3** (2011) 2621–2626.
26. M. Miyakawa, N. Hiyoshi, M. Nishioka, H. Koda, K. Sato, A. Miyazawa, T. M. Suzuki, “Continuous syntheses of Pd@Pt and Cu@Ag core-shell nanoparticles using microwave-assisted core particle formation coupled with galvanic metal displacement”, *Nanoscale*, **6** (2014), 8720–8725.
27. M. Nishioka, M. Miyakawa, K. Sato, A. Miyazawa, T. M. Suzuki, “Thermometer-free detection and control of temperature for microwave-assisted flow reactions”, *Chem. Lett.*, **42** (2013), 1096–1098.
28. T. Santos, L. C. Costa, M. A. Valente, J. Monteiro, J. Sousa, “3D electromagnetic field simulation in microwave ovens: a tool to control thermal runaway”, Proceedings of COMSOL Conference, Paris, France, (2010).
29. J. Robinson, S. Kingman, D. Irvine, P. Licence, A. Smith, G. Dimitrakis, D. Obermayer, C. Kappe, “Electromagnetic simulations of microwave heating experiments using reaction vessels made out of silicon carbide”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **12** (2010), 10793–10800.
30. H. Nigar, G. S. J. Strum, B. Garcia-Baños, F. L. Peñaranda-Foix, J. M. Catalá-Civera, R. Mallada, A. Stankiewicz, J. Santamaria, “Numerical analysis of microwave heating cavity: Combining electromagnetic energy, heat transfer and fluid dynamics for a NaY zeolite fixed-bed”, *Applied Thermal Engineering*, **155** (2019), 226–238.

Manuscript received: May 29, 2019
 Revised: Aug. 9, 2019
 Accepted: Aug. 26, 2019