

平成 22 年 5 月 28 日現在

研究種目： 基盤研究 (C)
 研究期間： 2007~2009
 課題番号： 19560332
 研究課題名 (和文) マイクロ波のエバネセント波を利用した微細加工技術に関する研究
 研究課題名 (英文) RESEARCH AND DEVELOPMENTS OF MICROWAVE HEATING SYSTEM FOR SOLDERING FINE CIRCUITS

研究代表者
 三枝 幹雄 (SAIGUSA MIKIO)
 茨城大学・工学部・教授
 研究者番号： 10292476

研究成果の概要 (和文)：

導波管内の遮断周波数以下の電磁波で発生するエバネセント波を用いて、深さ方向制御が可能な微細加熱技術の開発を行った。まず簡易な構造で微小な部分に強磁界が集中するマイクロ波共振器を開発し、広帯域固体増幅器と外部整合器を用いて非接触でハンダの溶融に成功した。次に共振器本体内部に設置した内部整合器を開発し、加熱効率の向上と低コスト化を実現した。最終的に深さ方向制御された加熱技術で 2.33 GHz、200 W のマイクロ波を用い、微細なリング状ハンダを溶融し、実際の携帯電話のカメラ用シャッター部品のハンダ付けに成功した。

研究成果の概要 (英文) : The microwave heating system using evanescent wave for soldering fine circuits had been proposed. The evanescent wave is useful for the microwave heating very locally. The heating system consists of a matching circuit and a resonator for enhancing the magnetic field around the mouth of a circular waveguide in which the strong evanescent waves are excited. The experiments of heating lead-free solders have been done with the microwave at a frequency of 2.3-2.35 GHz and a power of about 200 W. The lead-free solder can be heated locally to be melted with microwave without any breakdown in the resonator.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・(電子デバイス・電子機器)

キーワード：波動利用工学, マイクロ波, エバネセント波, 共振器, 微細回路, ハンダ付け

1. 研究開始当初の背景

電磁波による物体加熱は、電磁調理器で用いる20kHzから数GHz帯のマイクロ波帯までの広い周波数帯が用いられている。このうちマイクロ波帯の電磁波では、密閉させた金属容器の中の物体を誘電損失の原理で加熱するのが主流であり、家庭用としては2.45GHzのマイクロ波を用いた電子レンジが1940年代に米国レイセオン社で開発され、我が国でも1962年から販売され急速に普及してきた。現在は産業用としてファインセラミックスの焼結、食品の殺菌、粉末金属の冶金等の分野にも応用が広げられ、2006年にはその応用範囲の広さと将来性から、日本電磁波エネルギー応用学会が設立されている。

一方、カメラ付携帯電話、携帯音楽プレーヤー等の急速な普及に伴って、急速に様々な駆動部品の小型化が進んでおり、それに伴って新たな微細加工技術の必要性が生じてきた。特に、集積回路のパッケージングで配線に使われているワイヤーボンディングが使えない最終組立段階で、配線に必要な微細加熱技術の開発要求が高まってきている。

2. 研究の目的

導波管等の伝送線路では、伝搬可能な周波数が遮断周波数に制限される。遮断周波数以下の電磁波は、導波管の中で位相速度が無限大となり、空間的には同相のまま指数関数的に減衰しながら、時間的には振動するエバネセント波となる。このエバネセント波を応用すると、波長よりも細かい分解能で加熱分布を与えることが可能になり、そのエバネセント波を用いた局所加熱の応用を目標とし、本研究ではカメラ付き携帯電話用マイクロシッターの無鉛ハンダ接合へのマイクロ波のエバネセント波加熱の応用を目指した。

3. 研究の方法

高周波加熱は表皮効果により表面付近のみで起こり、その表面電流は表面磁界に比例して流れる為、ジュール加熱電力は以下の(1)式で与えられる。

$$P_{loss} = \frac{1}{2} \int |H_t|^2 R_s dS \dots\dots\dots(1)$$

ここでは表面抵抗を $R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$ とし、 H_t は金属表面の磁界の接線成分、 σ は導電率、 μ は透磁率を表している。(1)式で与えられるジュール加熱電力で円柱状のハンダを加熱した場合、ハンダが融けるには(2)式で与えられる式を満たす必要があり、

$$\pi r^2 c d \Delta T = 2\pi r \frac{1}{2} |H_t|^2 R_s \Delta t \dots\dots(2)$$

その結果(3)式で与えられる磁界が必要となる。

$$|H_t| = \sqrt{\frac{r c d \Delta T}{R_s \Delta t}} \dots\dots\dots(3)$$

ここで c は比熱、 d は質量密度、 r は円柱状ハンダの半径、 ΔT は温度上昇 および Δt は加熱時間を意味する。表1に示す半径 $r=0.25\text{mm}$ の無鉛ハンダ (SPARKLE ESC21 M705 千住金属製) のパラメータを用いると、円柱状のハンダを融かす為に必要な磁界は約 $330 [\text{A/m}]$ 以上である事が(3)式から判る。ここで、周波数は 2.33GHz 、室温は 20°C 、加熱時間は 20s を仮定した。

表1. 無鉛ハンダの主な物性値

Melting point [°C]	Specific heat :c [J/Kg · K]	Mass Density:d [kg/m³]	Electric Conductivity [S/m]
220	220	7.5×10^3	6.67×10^6

上記の磁界を発生させる為に2枚の平行平板間(幅 $25\text{mm} \times$ 隙間 5mm)を伝搬する進行波の磁界を用いた場合、約 2.6 kW の高周波

電力が必要になる。電子部品のハンダ付けには通常 10-100W 程度が用いられており、家庭用電子レンジ等に用いられる数百 W レベルの高周波発振器は 1 万円以下で購入可能なため、まず 2.45 GHz 帯の共振器を開発し、後に整合調整に有効な広帯域固体増幅器用に共振周波数を 2.3GHz 帯に修正した (図 1 参照)。

特性インピーダンス 50Ω の同軸(外導体の内径 39 mm)から、約半波長 (68.2mm) の中心導体 (タフピッチ銅製, 外径 19 mm) を通って中心にある約 1 波長の長さを有する内部導体 (クロム銅製, 幅 25 mm, 厚さ 9.5 mm, 長さ 118.2mm) に給電されている。内部導体は上下の金属筐体と平行平板線路を形成しており、中心から下方にシフトして底板から 5mm の間隔で設置されることで内部導体と底板間の電界および磁界強度が大きくなり、高周波電力がその部分に集中して蓄積される構造となっている。この場合、内部導体は両端開放の伝送線路と見なす事ができ、その電気長が 1 波長の周波数で共振器となる。そのため、両端から $1/4$ 波長の位置で電界が最低になり磁界が最大になる点が存在する。内部導体は上部から約 $1/4$ 波長 (30.6 mm) の長さのサポート (タフピッチ銅製, 外径 39 mm) で固定されており、このサポートは共振周波数付近で内部導体から上を見た入力インピーダンスが無限大になるように設計を行った。

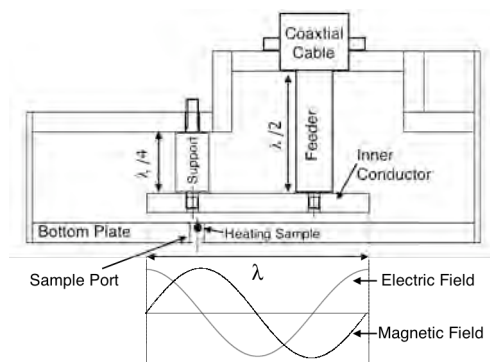


図 1 マイクロ波加熱用共振器

サンプル挿入口は、内部導体の端から約 $1/4$ 波長の位置の底板に開けられており、マイクロ波が遮断される寸法 (実験によって底板を交換) とした。

4. 研究成果

1 年目に簡易な構造で微小な部分に強磁界が集中するマイクロ波共振器を開発し、広帯域固体増幅器と外部整合器 (ダブルスラグチューナー) を購入して、エバネセント波によりハンダの溶融に成功した。

2 年目は共振器本体内部に設置した新しい内部整合器の設計製作を行い、加熱効率の向上と低コスト化を実現した。また、共振器のサンプル挿入口の加熱部分の銅板に絞りを入れ、目的対象物である実際の携帯電話のカメラ用シャッター部品のハンダ付けを行った。

3 年目は、安定した整合と損失低減のため共振器の内部整合器をアルミから銅製に変え、接触抵抗を減らす為に燐セイ銅の接触子を挟み込む構造とし、深さ方向制御された加熱技術で微細な直径 0.7mm のリング状ハンダを溶融する事に成功した。また、従来問題であったコイルのヨーク部の加熱に関しては、ヒステリシス損失が加熱効果を増加させないよう銅メッキによる対策を行った。また共振器の設計を目的として 3 次元 FDTD 法による電磁界解析コードを新たに開発し、実験で確認された反射損失の周波数特性をシミュレーションで再現する事に成功した。これらの結果をまとめ、国内学会で 6 件、国際会議にて 5 件論文を発表した。また 2010 年 6 月には電気学会に査読付論文を投稿予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

① M. Saigusa, S. Sun, T. Takekawa, and M. Sato, “DEVELOPMENTS OF MICROWAVE HEATING SYSTEM FOR SOLDERING FINE CIR-CUITS USING A TUNABLE RESONATOR”, 査読無, Proceedings of the 12th international conference on microwave and high frequency heating (AMPERE 2009), Forschungszentrum Karlsruhe, Germany, 2009, pp. 271-274.

② Shengguo SUN, Mikio SAIGUSA, Tetsuya TAKEKAWA, Manabu SATO, “Research of Microwave Heating System Using Evanescent Wave for Soldering Fine Circuits”, 査読無, The 5th International Student Conference at Ibaraki University, Ibaraki, JAPAN, November 7-8, 2009, pp. 69-70.

③ SAIGUSA, Mikio, KAWASHIMA, Tomohiro, SUN, Shengguo, ZHOU, Bo, and SATO, Manabu, “Developments of Microwave Heating System Using Evanescent Wave for Soldering Fine Circuits”, 査読無, Proc. of The International Conference on Electrical Engineering 2008, July 6-10, 2008, Okinawa Convention Center, Japan.

④ Shengguo SUN, Tomohiro KAWASHIMA, Bo Zhou, Mikio SAIGUSA, Manabu SATO, “Development of Internal Screw Tuner for Microwave Heating System”, 査読無, Proc. of The 4th International Student Conference at Ibaraki University, Ibaraki, Japan, November 1-2, 2008, pp. 385-390.

⑤ Tomohiro KAWASHIMA, Mikio SAIGUSA, Sun SHENGGUO, Manabu SATO, “Analysis of a microwave heating system for soldering fine circuits with FDTD method”, 査読無 Proc. of The 4th International Student Conference at Ibaraki University, Ibaraki, Japan, November 1-2, 2008, pp. 358-363.

[学会発表] (計 6 件)

① 武川哲也、孫勝国、菅原修平、三枝幹雄、佐藤学、「微細回路はんだ付け用マイクロ波加熱共振器の開発」平成 22 年電気学会全国大会, 2010. 3. 19, 東京都千代田区明治大学.

② 菅原修平、孫勝国、武川哲也、三枝幹雄 「エバネセント波を用いた微細回路ハンダ付け用マイクロ波加熱装置の研究」, 第 17

回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2009. 11. 22, 茨城県日立市シビックセンター (優秀発表賞受賞) .

③ 武川哲也, 孫勝国, 菅原修平, 三枝幹雄, 「FDTD 法を用いたマイクロ波加熱用共振器の電磁界解析」, 第 17 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2009. 11. 22, 茨城県日立市シビックセンター

④ 孫勝国, 川嶋友紘, 三枝幹雄, 佐藤学, 「エバネセント波を用いた高周波加熱装置の開発研究」, 平成 21 年電気学会全国大会, 2009. 3. 17, 北海道札幌市, 北海道大学.

⑤ 川嶋友紘, 孫勝国, 周博, 三枝幹雄, 佐藤学, 「深さ方向制御可能なマイクロ波加熱装置の開発」, 平成 20 年電気学会全国大会, 2008. 3. 19, 福岡県福岡市 福岡工業大学

⑥ 孫勝国, 周博, 川嶋友紘, 三枝幹雄, 佐藤学, 「エバネセント波を用いた高周波加熱装置の開発研究」第 15 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2007. 12. 1, 茨城県日立市シビックセンター, (優秀発表賞受賞) .

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三枝 幹雄 (SAIGUSA MIKIO)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号: 10292476

(2) 研究分担者 平成 19 年度

今井 剛 (IMAI TSUYOSHI)
筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授
研究者番号: 80354637

(3) 連携研究者 平成 20 年度、21 年度

今井 剛 (IMAI TSUYOSHI)
筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授
研究者番号: 80354637