

学術論文

ポスト壁導波路を用いた 5.8 GHz および 2.45 GHz

マイクロ波アプリケーション

5.8 GHz and 2.45 GHz Microwave Applicators Using Post-Wall Waveguide

西江 裕¹、岸原 充佳^{1*}、山口 明啓²、内海 裕一²

1. 岡山県立大学 情報工学部 情報通信工学科、2. 兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所
1. 〒719-1197 岡山県総社市窪木 111, 2. 〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-1-2

1. Faculty of Computer Science & System Engineering, Okayama Prefectural University,
111, Kuboki, Soja-shi, Okayama, 719-1197 Japan
2. Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo,
3-1-2, Koto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo, 678-1205 Japan

corresponding author*, e-mail address : kishihara@c.oka-pu.ac.jp

キーワード: マイクロ波、マイクロ波加熱、ポスト壁導波路、アプリケーション

Keywords: microwave, microwave heating, post-wall waveguide, applicator

Abstract

Microwave application technologies such as microwave heating, microwave assisted chemistry, etc. are of the innovative green technologies. In the field of microwave engineering, a waveguide whose sidewalls are replaced with densely arranged metallic posts has been proposed. This guide, called the post-wall waveguide, can easily realize the circuit patterns by arranging metallic posts periodically in a parallel-plate waveguide or a grounded dielectric substrate. In this paper, 5.8 GHz and 2.45 GHz microwave applicators of medium size are proposed based on the post-wall waveguide structure. The 5.8 GHz applicator is allowed to irradiate microwaves to solvent of several milliliters and to flow the heated solvent out continuously. The validity of the 5.8 GHz applicator is examined numerically and experimentally with microwave power sources of about 5 W. Furthermore, the designing of a 2.45 GHz microwave applicator using the same structure is shown.

1. 緒言

近年、マイクロ波自身が有用なエネルギー源として捉えられ、マイクロ波無線電力伝送のみならず材料合成や化学反応などへ積極的に応用されている[1]。特に、マイクロ波加熱やマイクロ波励起化学などのマイクロ波応用技術は、革新的なグリーンテクノロジーのひとつと考えられる。

商業的に利用可能なマイクロ波加熱装置では、主として高出力マイクロ波源と共に2.45 GHz帯のISMバンド(Industrial, Scientific and Medical band)が利用されるため、方形導波管系やマルチモードキャビティが多く採用されている。これは、初期のマイクロ波加熱の研究において、簡単なマイクロ波アプリケーションを構築する

ために商用電子レンジやその関連部品を改造したものが用いられた背景と関係している。最近、本マイクロ波加熱分野で要求される装置の傾向としては、マグネトロンを用いたマイクロ波電源から固体半導体アンプを用いた精密制御が可能なもの、および 2.45 GHz 帯とは異なる周波数帯の利用にある。マイクロ波エネルギーを最も効果的に吸収する周波数は材料によってそれぞれ異なっているため[2]、2.45GHz 帯 ISM バンドのひとつ上の利用可能帯域である 5.8GHz 帯 ISM バンドへの期待が高まっている。

ところで、密に並べた金属柱(ポスト)で方形導波管の側壁を置き換えた構造の導波路が提案されている。本導波路は、上下面を金属とする平行平板または誘電体基板に金属ポストを連続的に配置することで回路パターンを容易に実現することができる。このような導波路は、ポスト壁導波路(Post-wall Waveguide)[3]や SIW (Substrate Integrated Waveguide)[4]として知られており、特にミリ波帯におけるアンテナ給電部や漏洩波アンテナ、90° ハイブリッド回路[5]、十字形方向性結合器[6]などへ応用されている。ポスト壁導波路は、マイクロ波・ミリ波コンポーネントやサブシステムの高密度集積化を低コストで可能にする。

一方、著者らはポスト壁導波路によるチップサイズの連続マイクロ波照射構造を提案している。これは、24.125 GHz 帯 ISM バンドを利用し、約 1~3 W のマイクロ波電力によって数マイクロリットルの溶媒の温度を上昇させることができる[7]。例えば、ルテニウム錯体のオンチップ合成へ応用することが可能である[8]。この構造は、マイクロ (スモール) スケール化学などで使われるマイクロリアクタやマイクロ流体デバイスとマイクロ波加熱装置を一体化するのに有効である[9]。

本論文では、ポスト壁導波路構造に基づいた 5.8 GHz 帯の中型マイクロ波アプリケーションを提案している。このアプリケーションは、ポスト壁導波路と金属柱の間に設けたマイクロ流路から構成される。ポスト壁導波路を用いると、マイクロ波を導波路内部に閉じ込めた状態を保ちつつ、金属柱間の隙間にマイクロ流路を埋め込むことができるという特長がある。5.8 GHz 用に設計されるマイクロ波アプリケーションは、数ミリリットルの溶媒を扱うことができ、約 5 W のマイクロ波電力で溶媒

の温度を上昇させることができる。これは、24.125 GHz 帯のアプリケーションが数マイクロリットルの溶媒を扱うチップサイズであったのと比較すると、ややスケールアップしており、取り扱える溶媒の量が増えている。本論文では、まず 5.8 GHz で動作するポスト壁導波路を設計している。そして、マイクロ波照射下における水の昇温特性について電磁界シミュレータを用いて調査している。さらに、本アプリケーション構造を 2.45 GHz 帯 ISM バンドへ適用した場合についても検討を行っている。最後に、設計結果に基づき 5.8 GHz 帯のポスト壁導波路型マイクロ波アプリケーションを試作して、水およびエチレングリコールの昇温特性を測定している。これにより、本アプリケーションの有効性を確認している。

2. 構造

Fig.1 は、ポスト壁導波路の直線区間を用いて構成したマイクロ波アプリケーションの構造を示している。上下の平行平板導体間には比誘電率 ϵ_r の誘電体材料が満たされ、半径 r の円形金属柱が幅 a_f 、間隔 s で配置されている。ポスト壁導波路の幅 a_f と間隔 s を適切に配置すれば、側壁を構成する金属柱の隙間から外部へのマイクロ波放射は極めて低く抑えることができる。一般的に、ポスト壁導波路の高さは 1/2 波長より十分小さい値が用いられ、高さ方向には一定の構造をしていることから、通常の金属導波管の TE_{10} モードと類似した TE_{10} -like モードが伝搬する。

加えて、Fig.1 の構造は、ポスト壁導波路の外側から内部に流入する流路が設けられている。この流路は、マイクロ波エネルギーを導波路内に閉じ込めた状態を保ちつつ、金属柱間の隙間を利用して導波路に容易に

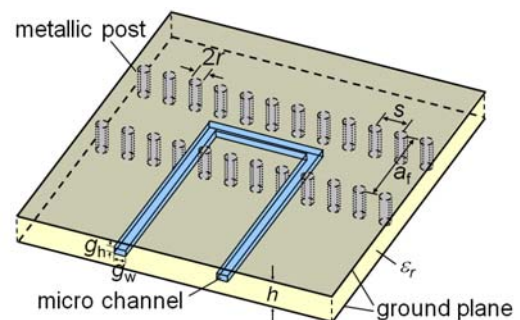


Fig. 1: Basic structure of microwave applicator by post-wall waveguide with embedded micro channel.

組み込むことができる。これにより、以下の機能を連続的に実現することができる。

- 1) 溶媒など液体を流路に注入する。
- 2) ポスト壁導波路内でのマイクロ波照射。
- 3) 照射後の液体をポスト壁導波路から取り出す。

ポスト壁導波路は、金属柱を並べるだけで容易に製作することができるため、直線以外の絞り窓や共振器構造などといった電磁界を集中させることのできる構造も容易に用いることができる。同様に流路自体も、誘電体材料に溝を掘ることで曲がりのある流路や溜りなどのさまざまな構造を実現することが可能である。

3. 設計および数値シミュレーション

3-1. 設計

5.8 GHz 帯マイクロ波アプリケーションの設計は、まず 5.8 GHz 帯で単一モード動作するポスト壁導波路を設計することから始まる。本論文では、誘電体材料として PTFE (polytetrafluoroethylene, $\epsilon_r = 2.04$, $\tan\delta = 0.0001$) を想定する。これはテフロンとして知られているが、優れた電気的特性(低誘電損失)、熱的特性、化学特性を持つため、マイクロ波導波路材料および有機溶媒のための流路材料として適していると考えられる。ガラス基板や PMMA などを用いてポスト壁導波路および流路を形成することも可能である。

ここでは、金属柱の半径 r は、後の試作を考慮して 1.5 mm を選択する。そして、遮断周波数が 4 GHz 付近、減衰定数が 0.1 Np/m ($\cong 0.87$ dB/m) 以下となるように寸法調整を行った。ポスト壁導波路の幅 a_f と間隔 s

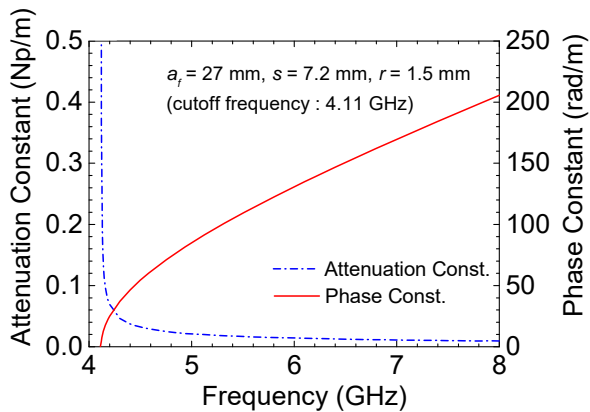


Fig. 2: Frequency characteristics of phase constant and attenuation constant for 5.8 GHz-band post-wall waveguide.

の値として 27 mm と 7.2 mm を選択すれば、上記を満足する 5.8 GHz 帯単一モード伝搬のポスト壁導波路を得ることができる。導波路の高さ h は、設置する流路の断面寸法を勘案して 8.0 mm と決定している。本論文では、ポスト壁導波路の遮断周波数(位相定数)および減衰定数を平面回路法により導出した[10]。得られたポスト壁導波路の位相定数および減衰定数を Fig. 2 に示している。この場合、TE₁₀-like モードの遮断周波数は 4.11 GHz で、5.8 GHz 近傍での減衰は約 0.05 Np/m に収まっており、放射のない良好な導波特性が期待できる。また、本論文では、断面寸法 $g_h = 4$ mm, $g_w = 3$ mm の流路を、 $h/2$ かつ $a_f/2$ の位置に設置する。

ポスト壁導波路への TE₁₀-like モードの励振は、同軸線路から行う。入出力ポートに、Fig.3 に示されるような同軸線路-ポスト壁導波路変換構造を実装する。これは、一般的な同軸-導波管変換器と同様の構成原理に基づいた構造である。同軸線路は、SMA 規格(内導体半径 0.635 mm, 外導体半径 2.1 mm で PTFE 充填)の 50 Ω 線路を仮定する。このとき、ポスト壁導波路の両端は、ポスト壁で終端(短絡)される。同軸線路とポスト壁導波路の整合は、同軸線路の中心導体長さ l_c と導波路端からの距離 l_d を中心周波数 5.8 GHz で調整することで達成できる。本論文では、電磁界シミュレータ HFSS を使って調整を行い、 $l_c = 6.5$ mm, $l_d = 7.5$ mm を決定した。なお、設置する流路の形状、溶媒(負荷)の種類・量によって整合状態は変化してしまうため、実用上は、外部に整合器を設けることが望ましいと考える。

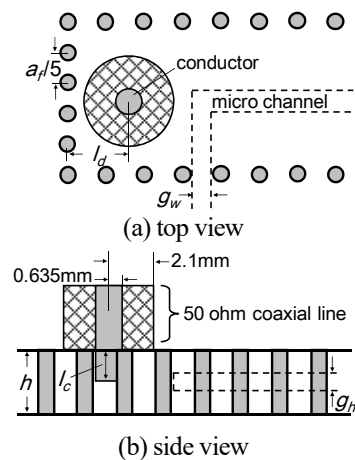


Fig. 3: Excitation structure using coaxial transmission line to post-wall waveguide transformer.

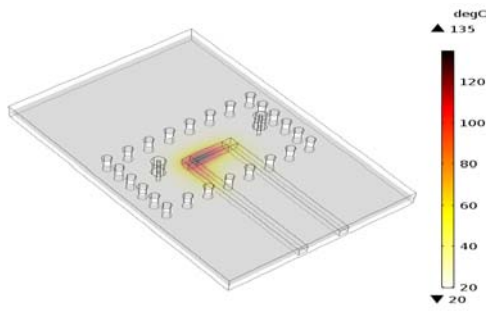


Fig. 4: Simulated temperature distribution of water under microwave irradiation (5.8 GHz, 5 W, 300 s).

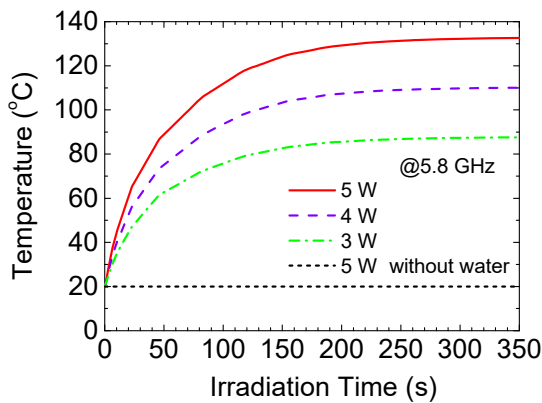


Fig. 5: Simulated temperature-time profiles of water under microwave irradiation.

3-2. 水の昇温シミュレーション

Fig.4 は、汎用シミュレータ COMSOL Multiphysics を用いて得たマイクロ波照射下の水の温度分布を示している。シミュレーションでは、水の複素比誘電率 $72-j20$ [2]、熱伝導率 0.615 W/(mK) 、比熱容量 4.2 kJ/(kgK) を仮定し、周囲温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ の環境で周波数 5.8 GHz のマイクロ波電力 5 W を同軸ポートから入力している。このときの加熱に用いられる水の量は、ポスト壁内側の流路部分に約 0.5 mL 、そのうち直線区間に約 0.2 mL である。なお、ポスト壁外側の流路部分まで含めると、本モデルの場合は約 1.5 mL である。加熱の中心では、水の温度は理論上 $135 \text{ }^\circ\text{C}$ まで上昇することが分かる。ただし、本シミュレーションでは相変化が考慮されていないため、沸点温度を超えた結果が示されている。

Fig.5 は、COMSOL を用いて計算したマイクロ波照射下における水温の時間変化を示している。実線は 5 W 、破線は 4 W 、一点鎖線は 3 W のマイクロ波 (5.8 GHz) を入力した場合の温度変化である。初期温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ から最初の約 150 秒 で急速に昇温するマイクロ波加熱の

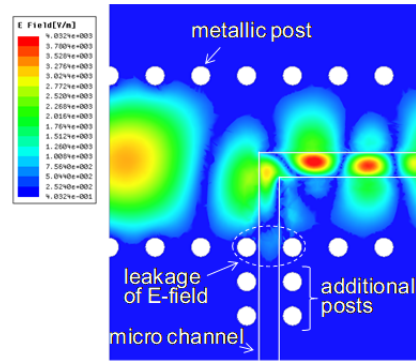


Fig. 6: Electric field distribution of applicator (5.8 GHz). Additional metallic posts are placed to avoid leakage of microwave.

特徴が見られ、約 200 秒 が経過した後はそれぞれの定常温度 $132 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $87 \text{ }^\circ\text{C}$ に達している様子が確認できる。また、点線は水の無い状態で 5 W のマイクロ波を入力した場合の温度変化を示している。ポスト壁導波路を形成する PTFE は加熱されず、初期温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ からほとんど変化しないことが確認できる。

3-3. 流路設置部のマイクロ波遮へい

ところで、ポスト壁導波路を用いる本アプリケーションは流路を金属柱間に設置するが、溶媒の比誘電率が高い場合には、溶媒中を通過するマイクロ波の波長が縮む。例えば水の比誘電率は 5.8 GHz で 72 程度であることから、PTFE 媒質中と比較して 0.17 倍程度に縮む。これにより、等価的に金属柱間が広がった状態となり、流路設置部からマイクロ波の漏洩が起きる可能性がある。そこで、本論文ではこのマイクロ波の漏洩を防ぐために、Fig. 6 に示すような遮へい金属柱を付加した構造を採用することにする。Fig.6 は 5.8 GHz におけるアプリケーションの電界分布を HFSS でシミュレーションを示したものであるが、流路設置部では金属柱の外側に電界分布が広がろうとしている様子が確認できる。ここでは、ポスト壁導波路外側の流路両側に金属柱を 2 段付加する構造で、マイクロ波の漏洩を防止できるようにした。付加金属柱の配置間隔は $a_p/5 = 5.4 \text{ mm}$ としている。同図より、電界分布は付加した金属柱の内側、即ちアプリケーション内に留まっていることが分かる。

3-4. 2.45 GHz 帯への適用

これまで周波数 5.8 GHz をターゲットとするポスト壁導波路型マイクロ波アプリケーションについて述べてきたが、 2.45 GHz 帯 ISM バンドにおいても本構造でマイ

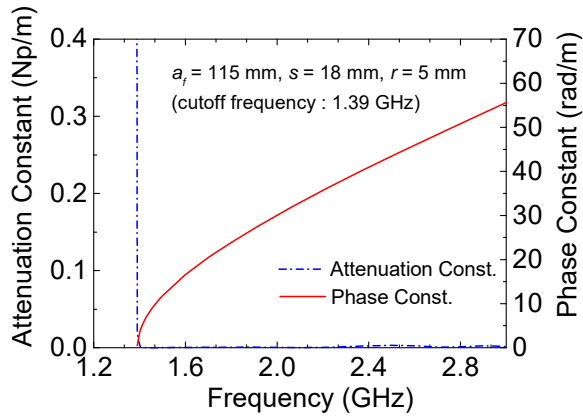


Fig. 7: Frequency characteristics of phase constant and attenuation constant for 2.45 GHz-band post-wall waveguide.

クロ波アプリケータを構成できる。ここでは、2.45 GHz を動作帯域とするポスト壁導波路の設計例と、それを用いたマイクロ波アプリケータの設計及び昇温シミュレーション結果を示す。

上述の 5.8 GHz 帯ポスト壁導波路では導波路内部を PTFE で充填し、それを支持物として利用して流路を設けていた。2.45 GHz 帯では波長が長くなることから、ポスト壁導波路の寸法も比較的大きくなる。また、比較的大きなマイクロ波電力を入力することが予想されるため、ここではポスト壁導波路の内部を空気($\epsilon_r = 1$)とした場合の検討を行った。Fig.7 は、2.45 GHz で動作するように導波路幅 a_f 、金属柱の半径 r および配置間隔 s を調整することで得られたポスト壁導波路の位相定数および減衰定数を示している($a_f = 115$ mm, $s = 18$ mm, $r = 5$ mm)。導波路の高さ h は、 a_f の半分程度になる 50 mm を選択している。遮断周波数は 1.39 GHz、減衰定数は動作帯域でほぼ 0 を示しており、マイクロ波漏洩の少ない 2.45 GHz で十分動作する中空のポスト壁導波路寸法が得られていることが分かる。

ポスト壁導波路に組み込む流路の寸法は、任意に変更可能である。本研究では、容量が計算しやすい 1 辺 10 mm の正方形流路を $h/2$ かつ $a_f/2$ の場所に設けることとした。なお、実際に製作する場合には、ガラス管やチューブで流路を構成し、中空に浮かせる工夫が必要になる。この正方形流路を金属柱間の隙間を利用して配置する場合、隙間寸法 $s - 2r = 8$ mm では流路幅 10 mm に足りない。そこで Fig.8 のように、流路両側の金

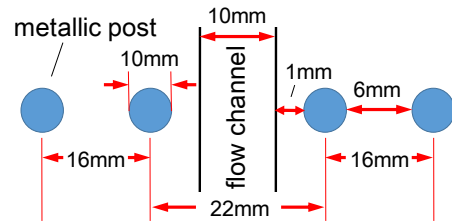


Fig. 8: Shifting of metallic posts for arrangement of flow channel.

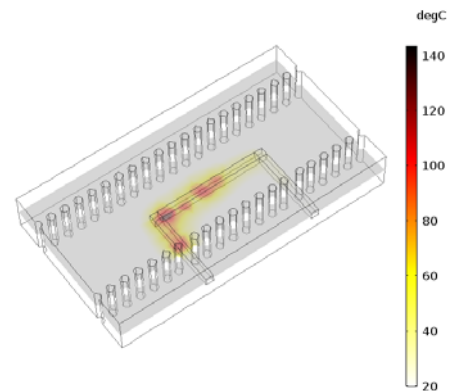


Fig. 9: Simulated temperature distribution of water under microwave irradiation (2.45 GHz, 100W, 60 s).

属柱 2 本の間隔を 2 mm ずつ広くして隙間が 1 mm 空く状態で流路を通した。COMSOL Multiphysics による水の昇温シミュレーション結果を Fig.9 に示している。シミュレーションでは、水の複素比誘電率 $78 - j9$ [2]、熱伝導率 0.615 W/(mK)、比熱容量 4.2 kJ/(kgK)、周囲温度 20 °C の環境で、2.45 GHz のマイクロ波 100 W を 60 秒間入力した。Fig.9 より、相変化を無視すれば、加熱の中心付近では理論上 140 °C 程度まで水温が上昇すると見られる。なお、このときの加熱に用いられる水の量は、ポスト壁内側の流路部分に約 26.7 mL、そのうち直線区間(8s 区間)に約 16.2 mL である。これより、2.45 GHz 帯でも同様のポスト壁導波路型マイクロ波アプリケータを構成できるものと考えられる。

4. 実験

設計および数値シミュレーション結果の妥当性を確認するために、ポスト壁導波路を用いた 5.8 GHz マイクロ波アプリケータを試作し、マイクロ波照射下の水およびエチレングリコールの昇温特性を測定した。Fig.10 に、試作したアプリケータの写真を示す。本実

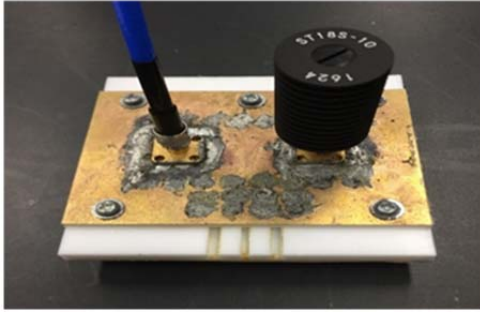


Fig. 10: Fabricated microwave applicator for experiment (5.8 GHz).

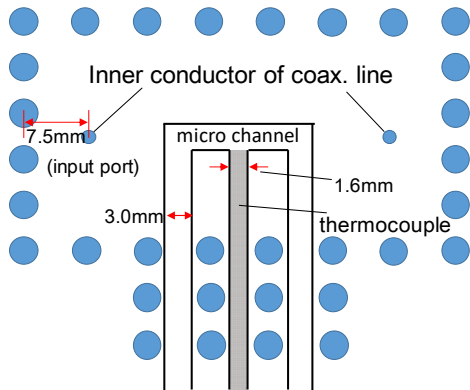


Fig. 11: Inner structure of fabricated microwave applicator.

験では、2枚の PTFE シート(厚さ : 6.0 mm、2.0 mm)を重ね合わせることで流路を形成した。流路自体は、厚さ 6.0 mm の PTFE シートに掘り込んで、厚さ 2.0 mm の PTFE シートで蓋をする形になっている。そして、両側から厚さ 0.3 mm の真鍮シートで挟み、これをポスト壁導波路の平行導体板としている。最後に、半径 $r = 1.5$ mm の丸棒(鉄製)を挿入して流路を埋め込んだポスト壁導波路構造を完成させた。Fig.11 に、試作したアプリケーションの内部モデルを示している。前節で述べたように、幅 3.0 mm の流路が円形金属柱の間隙を利用して設置され、ポスト壁導波路中央部に長さ 17.4mm (= 2s + 3.0 mm)の直線区間を設けている。また、流路設置部からのマイクロ波漏洩を防止するため、2 段の金属柱が付加されている。なお、温度測定用の熱電対プローブを差し込めるように、ポスト壁導波路の側方から流路内まで幅 1.6 mm の挿入孔を設けている。

ポスト壁導波路へのマイクロ波入力には前述の同軸-ポスト壁導波路変換構造を介して行い、出力側は 50 Ω の終端器(最大 10 W)で終端する。本アプリケーションは、非共振型の導波路構造を採用しているので、溶媒によ

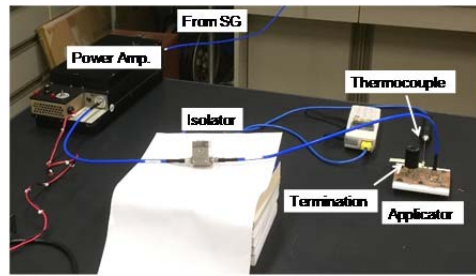
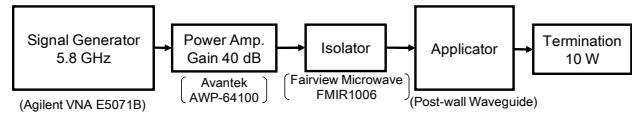


Fig. 12: Experimental setup consisting of VNA (signal source), power amplifier, isolator, and applicator.

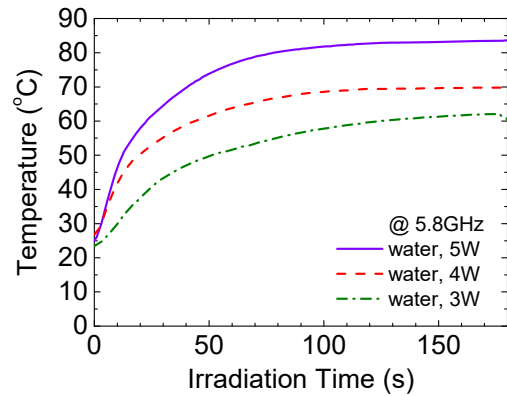


Fig. 13: Experimental results of temperature-time profiles of water under microwave irradiation.

って吸収されなかったマイクロ波の電力を終端器で消費させる必要があるためである。入出力端子としては、SMA コネクタを用いている。

Fig.12 は、実験系を表す概略図である。本実験では、ベクトルネットワークアナライザ(Agilent E5071B)を 5.8 GHz 信号源として使用し、その出力をパワーアンプ(Avantek AWP-64100)で 5 W まで増幅させる。マイクロ波電力がパワーアンプ側へ戻って来ないようにするため、アンプ出力とポスト壁導波路照射構造との間にアイソレータを別途挿入している。

周波数 5.8 GHz において、それぞれ 3 W、4 W、5 W のマイクロ波照射下における水の昇温実験を行った。実験では、1 mL の水をマイクロ流路へ注入した。Fig.13 にマイクロ波照射を行った水の温度変化測定結果を示す。3 W のマイクロ波が入力された場合、水温は 24 °C から 61.0 °C まで上昇していることが分かる。また、4 W

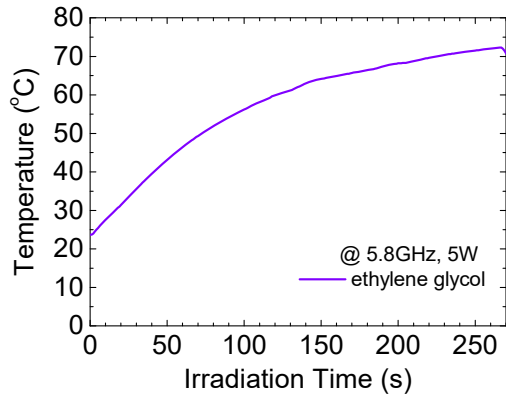


Fig. 14: Experimental result of temperature-time profile of ethylene glycol under microwave irradiation.

および5 Wを入力した場合には、それぞれ69.8 °Cと83.6 °Cまで上昇していることが確認できる。

Fig. 5の計算結果では、例えば3 W入力の場合87 °Cまで上昇しているが、本実験結果では61.0 °Cになっている。この違いの原因としては、試作アプリケーションの工作精度に加えて、シミュレーションで考慮していない外部支持構造物への熱流出が影響して、計算結果との違いが生じているものと考えられる。特に、マイクロ波入力部は溶媒のない状態で整合するよう設計されているため、不整合状態による実効入力電力が低下したものと推察される。水温の上昇速度を比較すると、シミュレーションでは150秒程度でほぼ定常値に達するが、実験の構造でも100~150秒程度の時間がかかっている。従って、測定値は数値シミュレーションより低い温度であるが、本マイクロ波アプリケーションの有効性を確認することができる。

また、エチレングリコールを用いて同様の昇温実験を行った。Fig.14は、5 Wのマイクロ波電力を照射したエチレングリコールの温度変化を示すグラフである。水の場合と比較すると温度上昇にやや時間がかかるが、270秒後には72 °Cまで到達していることが分かる。これより、5 Wもしくは10 W程度までのマイクロ波電力を用いることで、エチレングリコールについても十分加熱できるものと考えられる。

5. 結論

ポスト壁導波路構造に基づく5.8 GHzマイクロ波アプリケーションを提案し、マイクロ波照射下の水の温度変

化を数値シミュレーションおよび実験により確認した。また、エチレングリコールの昇温実験を行った。本アプリケーションは、数ミリリットルの溶媒を加熱するのに適した中サイズのアプリケーションであり、実験結果から判断すると、5~10 W程度のマイクロ波電力で実用的な加熱が可能と推測できる。

引用文献

1. 和田雄二、竹内和彦、マイクロ波化学プロセス技術、シーエムシー出版、(2006).
2. J. Barthel, K. Bachhuber, R. Buchner, H. Hetzenauer, "Dielectric spectra of some common solvents in the microwave region. Water and lower alcohols," *Chemical Physics Letters*, **165**, (1990) 369-373.
3. J. Hirokawa, M. Ando, "Single-layer feed waveguide consisting of posts for plane TEM wave excitation in parallel plates," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **46**, (1998) 625-630.
4. D. Deslandes, K. Wu, "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, **11**, (2001) 68-70.
5. E. Moldovan, R. G. Bosisio, K. Wu, "W-band multiport substrate-integrated waveguide circuits," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **54**, (2006) 625-632.
6. M. Kishihara, I. Ohta, K. Okubo, "Design of a broadband cruciform substrate integrated waveguide coupler," *IEICE Transactions on Electronics*, **E94-C**, (2011) 248-250.
7. 岸原充佳、山島芸、内海裕一、"ポスト壁導波路を用いたチップサイズ連続マイクロ波照射構造"、電気学会論文誌E、**133**、(2013) 365-371.
8. Y. Utsumi, A. Yamaguchi, T. Matsumura-Inoue, M. Kishihara, "On-chip synthesis of ruthenium complex by microwave-induced reaction in a microchannel coupled with post-wall waveguides," *Sensors and Actuators B: Chemical*, **242**, (2017) 384-388.
9. S. Cabrini, S. Kawata, *Nanofabrication Handbook*, CRC Press, (2012).

10. M. Kishihara, I. Ohta, K. Okubo, J. Yamakita,
“Analysis of post-wall waveguide based on H-plane
planar circuit approach,” *IEICE Transactions on
Electronics*, **E92-C**, (2009) 63-71.

Manuscript received: June 8, 2018
Revised August 18, 2018
Accepted August 24, 2018