

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01320

研究課題名(和文) 高精細3Dプリンティング技術による6G用機能性導波管の開発

研究課題名(英文) Development of functional waveguide for 6G by high-definition 3D printing technology

研究代表者

三尾 典克(MIO, Norikatsu)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：70209724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：次世代無線通信方式(Beyond 5G, 6G)の実現に必須である300GHz帯での導波管を、3DプリンタRECILSとめっきを用いて実現する技術の研究を進めた。RECILS製導波管は、金属導波管と同等な伝搬特性を実現できることを確認、また、連結共振器構造型バンドパスフィルタ導波管も製作し、その特性はシミュレーション結果と非常によく一致した。また、湾曲導波管、ねじれ導波管、スパイラル導波管を作製し、何れも挿入損失が1dB/inchであった。

本成果によって、6Gさらには、7Gの実現に必須となる導波管デバイスを、高精度で、使いやすく、又、安価で提供することを、世界に先駆けて可能にできる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代無線通信方式である6G、7の実現に向けた研究開発は、世界各国で競争が激化している。この実現には、100GHz以上の信号を扱うことになるが、金属製ケーブルでは損失が急激に大きくなり、導波管を使用することになる。しかし、この帯域での導波管の作製は非常に困難で、さらに、高価となっている。このような技術課題の解決に向け、3Dプリンタとめっき技術による導波管作製技術の研究開発を進め、本技術は、自由な形状の導波管を安価に作製できることを世界に先駆けて示した。

研究成果の概要(英文)：We have conducted research on a technology that uses the 3D printer RECILS and plating to create waveguides for signal transmission in the 300GHz band, which is essential for the realization of next-generation wireless communication systems such as Beyond 5G and 6G.

As a result, we confirmed that waveguides made with RECILS can achieve propagation characteristics equivalent to those of metal waveguides. Furthermore, we fabricated a waveguide with a coupled resonator structure band-pass filter, and its characteristics matched the simulation results very closely. Additionally, we produced bent waveguides, twisted waveguides, and spiral waveguides, all of which had an insertion loss of less than 1dB per inch. This achievement enables us to provide waveguide devices, which are essential for the realization of 6G and even 7G, with high precision, ease of use, and at low cost, ahead of the rest of the world.

研究分野：物理学

キーワード：THz 導波管 3Dプリンタ めっき

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

無線通信分野では、2022年から5Gシステムの商用化が開始され、今後、ますます、高速、大容量無線通信の実現(Beyond 5G, あるいは6G)に向けた研究開発が加速することが想定される。特に、ヨーロッパを中心に、6G以降の研究開発の動きもある。

高速、大容量無線通信では、キャリア周波数の高周波化が進み、100GHzから300GHzが想定されている。このような高周波領域では、金属ケーブルによる高周波信号の伝送では、損失が急激に増加し、その解決策として金属導波管が必要となる。しかし、300GHzの電磁波の波長は1mmで、この周波数帯(Jバンド、220~325GHz)で標準化された導波管の断面サイズは、0.86×0.43mmと、サブmmスケールとなる。さらに、標準的な長さは1inchとなり、その中空構造のアスペクト比は60以上となる。その為、従来からの金属加工では作製が難しくなっており、さらに、市販の300GHz帯の導波管は非常に高価であり、数万円/cmにもなる。さらに、通信システムでは、周波数制御、信号の合波、分波などが必要であるが、この周波数帯では、このような機能導波管デバイスは、さらに高価である。今後、6G、さらにその次の高周波帯での研究開発を進めるには、導波管デバイスの高機能化、使いやすさの向上、さらには低コスト化が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、Jバンドでの導波管、及び、バンドパスフィルタ(BPF)、自由形状導波管の導波管デバイスを安価で提供できる技術を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

3-1 Jバンド用導波管の造形技術

これまで、金属導波管は切削技術を基本とした金属加工で作製されている。しかし、切削では、導波管として必須な中空構造の作製は、難しくなり、サブmmスケールの高アスペクト比構造(smsHS)の作製は、難易度は高くなる。さらに、3次元曲線導波管となると作製することは不可能である。

一方、3Dプリンタ技術は、積層技術であり、中空構造の作製を得意としている。さらに、3次元自由中空構造の造形も可能である。しかし、Jバンド導波管の断面サイズは、サブmmスケールで、また、外形サイズは数cmであることから、本目的のための3Dプリンタは、

1. 20~30µmの造形解像度

2. 手のひらサイズの造形が可能であること

の2つの条件を満たす必要がある。しかしながら、現在の3Dプリンタでは、この2条件を同時に満足することが非常に難しく、例えば、高解像度という点では、2光子吸収を利用した3Dプリンタがあるが、数mmの造形に、膨大な時間を必要とし、実質的に造形は不可能である。また、金属3Dプリンタは、金属粉末をレーザー光で熔融造形するものであるが、冷却時にクラックが発生し、低損失の導波管作製は困難である。このような状況の中で、唯一、条件を満足する3Dプリンタは、UV樹脂硬化型3Dプリンタであり、その分類の中でも、東京大学フロンティア研究機構が開発してきた3DプリンタRECILSのみである。RECILSに関しては、

<http://www.utripl.u-tokyo.ac.jp/dcps/RECILS202010/>

をご覧ください。

3-2 サブmmスケールの樹脂製中空構造へのニッケル(Ni)、銅(Cu)めっき

RECILSによって3次元自由形状のsmsHSの造形が可能となるが、これは、樹脂製であるために、中空構造に電磁波を閉じ込めることは不可能である。この問題に対しては、中空構造表面にめっきを施すことで、導波管の機能を実現した。smsHSへのめっきに関しては、長野県工業技術総合センター化学部、塚田理研工業(長野県駒ヶ根市)の協力を得、めっき液をsmsHSに注入する方法を開発した。

3-3 Jバンド用導波管の特性評価

Jバンド導波管の評価方法として、単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)をフォトミキサーとして信号源とし、また、作製した導波管からの透過強度をTHzパワーメータ(VDI製PM-5b)を用いて測定し、挿入損失を求めた。

4. 研究成果

4-1 smsHSへのめっき膜の形成

ポンプ注入法でsmsHSでのめっき膜の厚さ分布は、導波管をその長手方向に沿って切断に

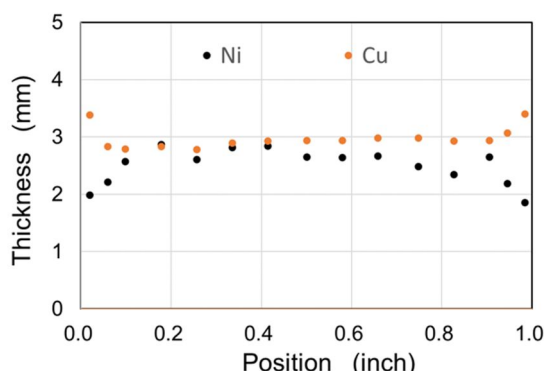


図1 RECILSで造形した中空構造表面のめっき厚分布

導波管表面を X 線蛍光膜厚計で測定した。この測定では、長野県工業技術総合センターの装置を借用した。その一例を図 1 に示す。フランジ部に盛り上がりはみられるが、ほぼ一様なめっき膜が形成されていることを確認した。

4-2 RECILS 製導波管の特性

RECILS で造形後、snsHS に Ni および、Cu めっき膜を形成した導波管を図 2 に示す。これは、長さが 1 インチ、両端は標準化フランジで、他の導波管を直接結合することが可能である。このストレート導波管の挿入損失は、0.5 ~ 0.6dB/inch で、金属導波管に同等の特性が確認された。

機能化導波管デバイスの作製として、まず、BPF 導波管の作製を行った。この BPF 導波管は、5 個の共振器を連結させたもので、その X 線 CT 画像を図 3(a) に示す。各共振器を構成している 6 個の共振器アイリスは、オーバーハング構造である。この造形は、他の 3D プリントでの造形はほとんど不可能であり、これも RECILS の大きな特徴である。

この導波管の透過特性を図 3 (b) に示す。連結共振器の中央部の共振器長 L が 490、440、410 μm の場合の特性で、透過域では、ほぼ 1dB の透過率が確保されている。また、点線は、同形状の金属銅製の BPF のシミュレーション結果で、RECILS 製 BPF の特性は、シミュレーション結果とよく一致することが確かめられた。



図 2 RECILS で造形し、中空部および両端のフランジにめっき膜を形成した WR-3 導波管

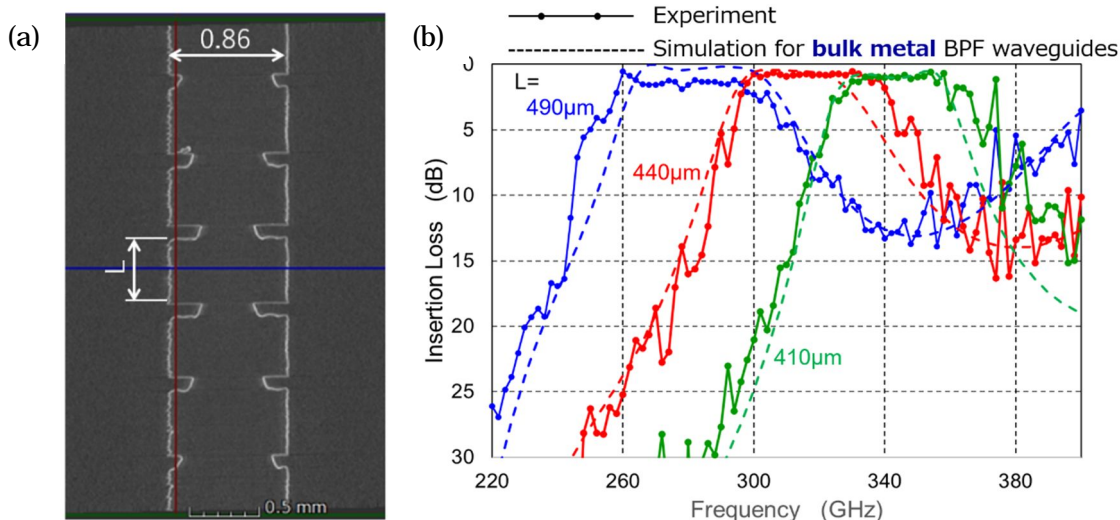


図 3 RECILS で造形し、中空部および両端のフランジにめっき膜を形成した WR-3 導波管

また、湾曲導波管、ねじれ導波管、さらには湾曲とねじれを組み合わせたスパイラル導波管を作製した。図 4 は、スパイラル導波管の X 線 CT 画像である。これらの導波管構造での挿入損失は、何れも 1 dB/inch 以下で、良好な伝搬特性が確認された。

以上のように、3D プリント RECILS とめっきとを組み合わせた J バンド導波管作製技術は、金属導波管とほぼ同じ特性を実現できることが確認された。また、信号の合波、分波を可能とする Y 分岐導波管も造形されている。

さらに、スパイラル導波管は、3 次元構造であり、金属導波管では作製が不可能である。今後、RECILS 導波管作製技術を発展させることで、3 次元 THz 導波管回路の実現が期待される。

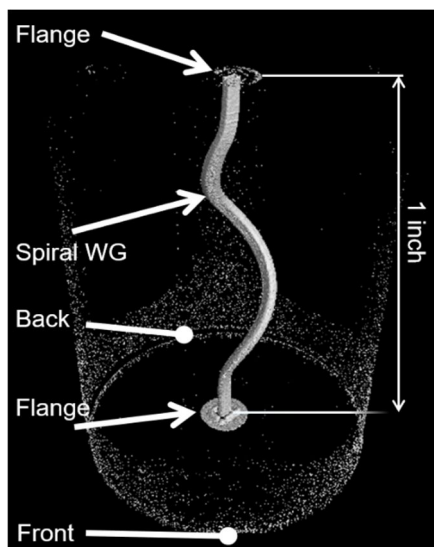


図 4 スパイラル導波管の XCT 画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kentaro Soeda, Norikaza Naganuma, Kuniaki Konishi, Hiroharu Tamaru, Norikatsu Mio, Hiroshi Ito, Junji Yumoto
2. 発表標題 3D-Printed Waveguide For 220GHz-325GHz Band For 220GHz-325GHz Band
3. 学会等名 The International Society of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junji Yumoto
2. 発表標題 D-Printed and Surface Metallized Plastic Waveguides for sub-THz Communications
3. 学会等名 3rd Int. Conf. Materials Science and Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Soeda, H. Suzuki, S. Yokobori, K. Konishi, H. Tamaru, N. Mio, M. Kuwata-Gonokami and J. Yumoto
2. 発表標題 RECILS: High resolution and high-speed SLA 3D printer using a plane building platform and a cylindrical window
3. 学会等名 Lasers in Manufacturing Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------