

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630142

研究課題名(和文) テラヘルツ波用チューブリーキー導波路とそれを用いたテラヘルツ波回路素子の実現

研究課題名(英文) Development of THz tube-leaky waveguides and optics using them

研究代表者

松浦 祐司 (MATSUURA, YUJI)

東北大学・医工学研究科・教授

研究者番号：10241530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、テラヘルツ波用の導波路型光学素子の開発を目的とした。まず、チューブリーキー導波路を複数隣接させた方向性結合器を提案し、ビーム伝搬法を用いて評価を行った結果、結合長は導波路の内径に大きく依存し、内径1.0 mmの場合、長さ9 cmの現実的な長さで波長200 μm のテラヘルツ波を50%分岐できることが判明した。この設計をもとに、内寸3.0 mm角の溝を刻んだ長さ27 cmの真鍮製の金属棒を2本向い合せる形で配置し、その中央部に厚さ80 μm のポリエチレン膜を挟んだ構成の中空導波路型光学素子を製作し評価を行った結果、波長250 μm の領域で伝送パワーが50%分岐することを確認した。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop optical devices for terahertz wave based on hollow waveguides. A directional coupler utilizing coupling between tube-leaky waveguides is proposed and it is investigated by using a beam propagation method. As a result, it is found that the coupling length highly depends on the inner diameter of the waveguide and for diameter of 1 mm, a 9-cm long, 50%-division coupler for 200 μm wavelength is designed. Then a hollow-waveguide coupler are fabricated by inserting a 80- μm thick polyethylene film between two brass strips of 27-cm long having a 3-mm width square slot. The results of measurement of the power shift between waveguides using terahertz time-domain spectroscopy show that 50% power division is obtained at 250 μm

研究分野：医用光工学

キーワード：テラヘルツ導波路 方向性結合器 中空光ファイバ

1. 研究開始当初の背景

近年、テラヘルツ応用が展開するにつれてフレキシブルな導波路に対する要求が高まってきており、国内外で各種の導波路が提案されているが、現状では、中空導波路が市販されているものの広い普及には至っていない。そのため、各種のテラヘルツシステムは光学テーブル上でミラーやビームスプリッタなどの光学部品により構成され、安定性やコストの面で問題がある。

申請者らはテラヘルツ波伝送路として、樹脂チューブの内面に金属薄膜を形成した中空光ファイバを開発した。また、赤外光伝送路としては、チューブリーキー導波路と呼ばれる中空光ファイバも実現している。この導波路は誘電体薄膜のみで構成されたもので、膜内における光の干渉を利用することにより、中空コア内に光を閉じ込めて伝送することが可能である。

しかし赤外光の場合、誘電体薄膜はきわめて薄くする必要があり、導波路を自立させるために、図1のようなハニカム構造を用いる必要があった。一方、波長の長いテラヘルツ領域にこの構造を導入すれば、単独でチューブ形状を維持する強度が得られるとともに、複数のリーキー導波路を隣接させることにより、漏れや結合などにより伝送パワーの移行が可能になると考え、本申請の発想に至った。

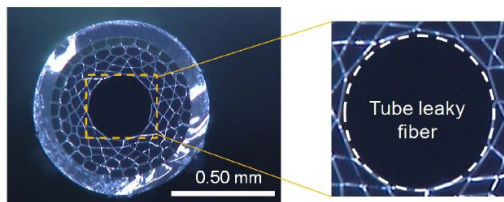


図1 赤外光伝送用チューブリーキー導波路

2. 研究の目的

赤外光領域において機能することが確かめられているチューブリーキー導波路をテラヘルツ領域に拡張するためには、この波長域において透明で、かつ薄肉チューブ状に加工が容易な材料を選択するとともに、その製造工程を確立化する必要がある。それとともに、複数の導波路を隣接させた場合のテラヘルツ波の導波路間結合について、光学シミュレーションを用いて綿密な計算を行い、分岐や方向性結合器回路を構成するための条件を明らかにする。そしてその結果に基づき、各種のテラヘルツ波回路の試作を行い、その有効性を示すための特性評価を行うことを

目的とする。

テラヘルツ波については光源や分光法についての研究が幅広く展開されており、実用化されたシステムもいくつかあるものの、導波路や光回路素子について検討された例は少ない。テラヘルツ波領域では実現されていない、チューブリーキー導波路を実現しようとするのが本研究の目的のひとつであり、さらにそれを利用して各種のテラヘルツ波回路素子が構成できることを示すことは学術的なインパクトが大きい。また、これらの回路素子が実現されれば、応用システムを構成する際に非常に有用となり、テラヘルツ技術研究の進展を大いに加速することが期待される。

3. 研究の方法

(1) 方向性結合器の構造設計

チューブリーキー導波路は誘電体薄膜のみで構成されるために低コストで製作でき、膜内における光の干渉を用いることで中空コア内にテラヘルツ波を閉じ込めて安定した伝送が可能となる。また、チューブリーキー導波路を複数隣接させ、そのうち1つの導波路のみを励起すると、導波モードおよび漏れモードの結合により他方の導波路へパワー移行が生じる。この原理を利用し、現実的な方向性結合器の構造設計を行った。

(2) 中空導波路型光学素子の製作・評価

2分岐導波路を実現するに当たり、まずは結合部のみで構成された中空導波路型光学素子を製作し、導波路間結合によるパワー移行の評価を行った。実験では、内寸 3.0 mm 角の溝を刻んだ長さ 27 cm の真鍮製の金属棒を2本製作することで、矩形型の中空導波路を構成した。図2に示すように、これらの金属棒を向かい合わせる形で配置し、その中央部にポリエチレン膜を挟むことで、中空導波路型光学素子を製作し、テラヘルツ時間領域分光法により、導波路間における伝送パワーの移行の評価を行った。

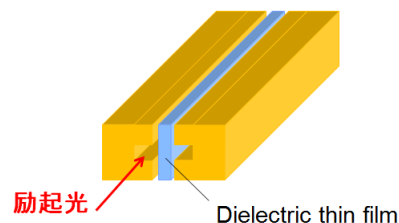


図2 矩形導波路を用いた中空導波路型光学素子

4. 研究成果

(1) 方向性結合器の構造設計

導波路間結合の評価は、ビーム伝搬法を用い、スラブ導波路についての2次元モデルに対して行った。ポリマー薄膜で構成されたチューブリーキー導波路を想定し、屈折率 1.5 の誘電体層（厚さ 45 μm ）で構成された同一径の複数導波路を隣接して配置し、そのうちの1つの導波路に最低次モードの界と一致するガウスビーム（TE 波、波長 200 μm ）を入射した。まず、単一導波路の伝送損失を求めた結果、図3に示すように導波路径の減少とともに漏れ損失が増大するが、伝送損失は内径 1.5 mm の導波路でも 3.0 dB/m と充分小さいことが分かった。

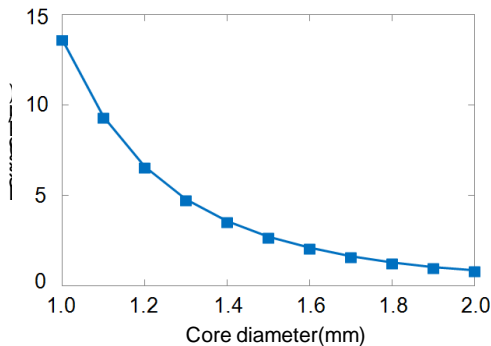


図3 単一導波路の伝送損失計算値

次に、2本の導波路を並べて配置したモデルに対して計算を行ったところ、内径 1.0 mm の導波路において、9 cm 程度の導波路長で 50% 分岐が可能ながことが判明した。続いて、現実的な2分岐導波路の構造設計として、図4に示すように直線状の結合部の終端に分岐を配置した Y 分岐導波路を設計したところ、35% という比較的小さな結合損失で分岐素子を構成できることが分かった。以上の結果より、現実的な長さの Y 分岐導波路の実現の可能性が示された。

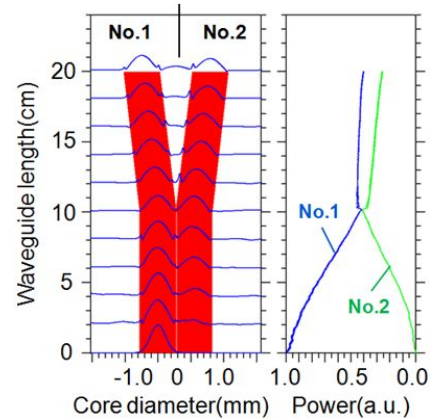


図4 Y字型モデルにおける結合シミュレーション
(内径 1.0 mm)

(2) 中空導波路型光学素子の製作・評価

図5は、屈折率 1.54 のポリエチレン膜について、周波数 0.8 THz における理論伝送損失が最低となる膜厚である 80 μm とした場合の伝送パワースペクトルの測定結果である。空気中の水蒸気の吸収の影響が見られるものの、周波数 0.38 ~ 0.48 THz の領域で、伝送パワーがほぼ 50% 分岐することが確認でき、誘電体薄膜を利用した方向性結合器の実現の可能性が示された。

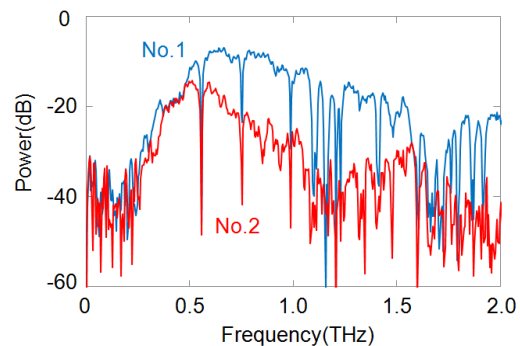


図5 厚さ 80 μm のポリエチレン膜を用いた中空導波路型光学素子における伝送パワー

以上、本研究では、テラヘルツ波用の導波路型光学素子の開発を目的とし、チューブリーキー導波路を用いたテラヘルツ波用の方向性結合器の構造設計および誘電体薄膜を利用した中空導波路型光学素子の試作・評価を行った。ビーム伝搬法を用いて複数導波路における導波路間結合の計算結果から、内径 1.0 mm の導波路において長さ 9 cm 程度の現実的な長さで、波長 200 μm のテラヘルツ波を 50% 分岐することができ、比較的小さな結合損失で Y 分岐導波路を構成できることが分かった。そして、内寸 3.0 mm、長さ 27 cm の真鍮製の 2 本の矩形型中空導波路間にポリエチレン膜を挟んだ中空導波路型光学素子

を製作し、その伝送パワー特性を測定したところ、0.4 THz 付近で、伝送パワーが 50%分岐することを確認した。これにより、チューブリーキー導波路を用いた方向性結合器の実現の可能性が示された。

今後は最適な誘電体薄膜を利用し、矩形導波路を用いた Y 分岐導波路およびチューブリーキー導波路を用いた方向性結合器の実現を目指す。

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 1 件)

C. Huang, S. Kino, T. Katagiri, Y. Matsuura, "Infrared hollow optical fiber probes for reflectance spectral imaging," Appl. Opt., 査読有 vol. 54, no. 14, pp. 4602-4607 (2015).

[学会発表](計 4 件)

伊藤公聖, 片桐崇史, 松浦祐司, "時間領域分光法によるテラヘルツ波用中空光ファイバの伝搬モード特性の評価," 2016 年電子情報通信学会総合大会, 2016 年 3 月 15 日, 九州大学(福岡)

伊藤公聖, 片桐崇史, 松浦祐司, "テラヘルツ波用中空ファイバの伝搬モード特性-時間領域分光法による評価-" 平成 27 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2015 年 8 月 27 日, 岩手県立大学(滝沢)

伊藤巧真, 片桐崇史, 松浦祐司, "導波路間結合を用いたテラヘルツ波用ビームスプリッタ ビーム伝搬法による構造設計," 2015 年電子情報通信学会総合大会, 2015 年 3 月 10 日, 立命館大学(草津)

伊藤巧真, 松浦祐司, 片桐崇史, "チューブリーキー導波路を用いたテラヘルツ波用ビームスプリッタ," 平成 26 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2014 年 8 月 29 日, 山形大学(米沢)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松浦 祐司 (MATSUURA, YUJI)
東北大学大学院医工学研究科・教授
研究者番号：10241530

(2) 研究分担者

片桐 崇史 (KATAGIRI, TAKASHI)
東北大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90415125

木野 彩子 (KINO, SAIKO)
東北大学大学院医工学研究科・教育研究支援者

研究者番号：30536082