

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82675

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18638

研究課題名（和文）可視回折限界イメージング実現のための革新的光導波路回路開発

研究課題名（英文）Development of integrated optics for visible light diffraction limited imaging

研究代表者

小谷 隆行（Kotani, Takayuki）

大学共同利用機関法人自然科学研究機構（新分野創成センター、アストロバイオロジーセンター、生命創成探究・アストロバイオロジーセンター・助教

研究者番号：40554291

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は大気乱れの影響をなくし、高コントラストの可視回折限界イメージングを可能にする、光導波路回路の開発が目的である。基本的な導波路回路特性を知るために様々なパラメーターで分岐・結合回路、導波路の幅、厚み、交差回路、曲率を持った導波路回路といった基本的な回路と、位相シフターを内蔵した分岐結合回路である多モード干渉導波路MMI（Multi-Mode Interferometer）の開発を行い、それらの透過率・分岐・結合の波長依存性、偏光特性、クロストークを測定した。これらの一部はより性能向上が必要ではあるが、最終目標である、5分岐20出力回路の実現に向けて基本的な回路は準備ができたと考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまで大気乱れの影響により回折限界のイメージングが出来なかった、可視光での回折限界撮像を目指したものである。大気の乱れをリアルタイムで補正する補償光学は、可視光では惑星の反射光を検出するような高コントラストが得られないが、本研究で開発した導波路回路により、将来的には口径30メートル級望遠鏡などを用いることで、可視光での太陽系外惑星の直接撮像観測が可能になると考えている。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop an optical waveguide circuit that eliminates the effects of atmospheric turbulence and enables high-contrast, visible diffraction-limited imaging. Basic waveguide circuits such as Y-coupler, X-coupler, waveguide width, thickness, crossed waveguides, and curvature waveguide circuits with various parameters to determine basic waveguide circuit characteristics, and a MMI (Multi-Mode Interferometer), a splitter and combiner circuit with a phase shifter and measured their transmittance, split ratio, coupling ratio, wavelength dependence, polarization characteristics, and crosstalk. Although some of these circuits need further performance improvement, we believe that the basic circuits are ready for the realization of our final goal, a 5-input, 20-output circuit.

研究分野：太陽系外惑星

キーワード：太陽系外惑星 干渉計 導波路 回折限界 可視光

1. 研究開始当初の背景

地球大気の乱れの影響を受けずに、望遠鏡が本来持つ空間分解能 (= 回折限界) の観測を行うことは天文学者の悲願である。近年は、リアルタイムに大気揺らぎを補正する補償光学の発展により、赤外線においては回折限界像を得ることができるが、可視光では補償光学をもってしても、未だ鮮明な回折限界像を得ることができていない。図1はすばる極限補償光学SCEXAOによって得られた可視光イメージであるが、特に0.1秒角以内(近傍の星形成領域で14AUに相当)といった極めて小さい角度スケールでは、系外惑星の直接撮像が可能なほどの高いコントラストにはほど遠いというのが現状である。これは可視域では大気揺らぎが強く補償光学の性能が追いつかないことが原因である。

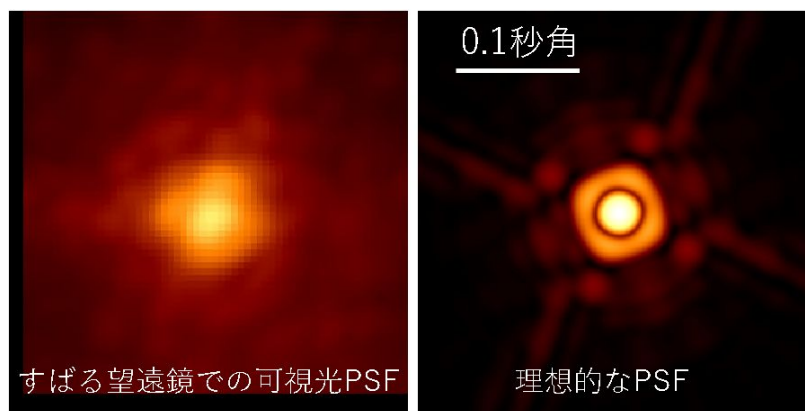


図1：左：すばる望遠鏡極限補償光学 SCEXAO で取得した可視光の PSF。右：大気揺らぎがない場合の理想的な PSF。

図1はすばる極限補償光学SCEXAOによって得られた可視光イメージであるが、特に0.1秒角以内(近傍の星形成領域で14AUに相当)といった極めて小さい角度スケールでは、系外惑星の直接撮像が可能なほどの高いコントラストにはほど遠いというのが現状である。これは可視域では大気揺らぎが強く補償光学の性能が追いつかないことが原因である。

2. 研究の目的

本研究ではこの問題を打破するために、近年 VLTI/ GRAVITY の成果などで注目を集めている光干渉計技術を応用し、大気揺らぎがある中でも正確な天体像の再生を可能にする、革新的なデバイスの開発を行う。これを用いることで、8メートル級望遠鏡でありながら、近赤外線での30メートル級望遠鏡に匹敵する空間分解能と、系外惑星の直接撮像が可能なほどのコントラスト(4桁以上)を達成することが可能になる。

3. 研究の方法

本研究の手法は、研究代表者の小谷が実証に初めて成功した Pupil Remapping 法 (Kotani et al. 2009, Optics Express, 17, 1925) をさらに発展させたものである。この手法では、図2に示すように、1) 単一望遠鏡を、マイクロレンズアレイを用いて複数の小口径望遠鏡に分割し、シングルモードファイバーへ入射する。ファイバーは乱れた波面を除去し、完全にフラットな波面を作り出す。2) 分割した光を光学素子により干渉させ、干渉縞の visibility を測定する。3) 電波干渉計で用いられる像再生アルゴリズムと似た手法により、天体像を再生する。ファイバーによる波面フィルターと独自の像再生法により、大気揺らぎの影響を受けずに、4桁以上の極めて高コントラストの回折限界像を得ることができる。しかしながら、光を干渉させる光学系は、光の波長オーダーの非常に厳しいアライメントや安定性が必要であることと、干渉させる光の数が多いと、光学系が複雑になりすぎて実現不可能になるという問題があった。実際にこの手法を用いた観測結果では、上記の理由により達成できるコントラストが2桁程度に留まっている (Huby et al. 2013, A&A, 560, A113)。

これを解決するのが、本研究で開発を行う光導波路回路である(図3)。これはシリコン基盤上に、半導体パターン転写技術によって微細な光の通り道(導波路)を作製するもので、複雑な光干渉光学系を容易に実現できるうえ、可動部や調整機構が全くないため極めて安定である。このような導波路回路は、光通信用に近赤外線では広く用いられており、可視光領域での利用はあま

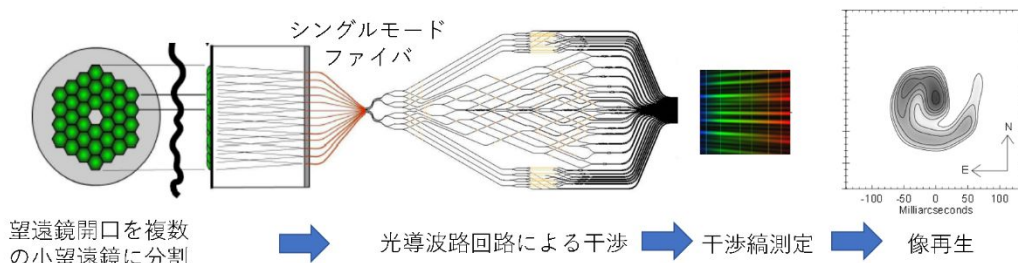


図2：本研究で提案する光干渉を用いた回折限界像取得方法

りされていなかった。今回はこれを初めて天文用途に利用する。

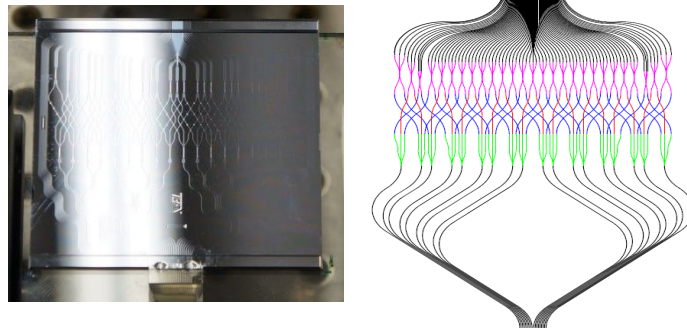


図3：過去に開発した近赤外線 18 ビーム結合光導波路

4. 研究成果

本研究の1年目は、基本的な導波路回路の要素である X カプラ、Y 分岐、交差回路、SSC (Spot Size Converter) を、様々な導波路パラメーターで製作し、損失、結合率、分岐比、偏光依存性を調べた (図 4)。その結果、1) X カプラに関しては、波長 658nm において挿入損失は 2% ~ 50% 以上と幅広い値を示したが、分岐比 50% 程度のものに関しては、損失は 5 ~ 10% であった (図 5)。2) Y 分岐に関しては、分岐比は概ね $50 \pm 10\%$ であったが、挿入損失は 30 ~ 40% と大きく、今後の改善の余地が大きい (図 6)。3) 2 本の導波路を交差させた際の損失とクロストークについては、損失は交差角度 20, 30, 40, 50, 60 度で最大 5% 以下と小さく、交差角度が小さいほど損失が小さい傾向がみられた。クロストークについては、いずれの角度でも 0.03% 以下と非常に小さいことがわかった。4) 入力ファイバーと導波路回路のモードフィールド径を一致させ接続損失を小さくする SSC (Spot Size Converter) については、ベストのもので損失は 20% 程度であったが、偏光依存性が大きく、これはモード径の変換がどちらかの偏光状態にしか適用できないことが原因であると考えられる (図 7)。

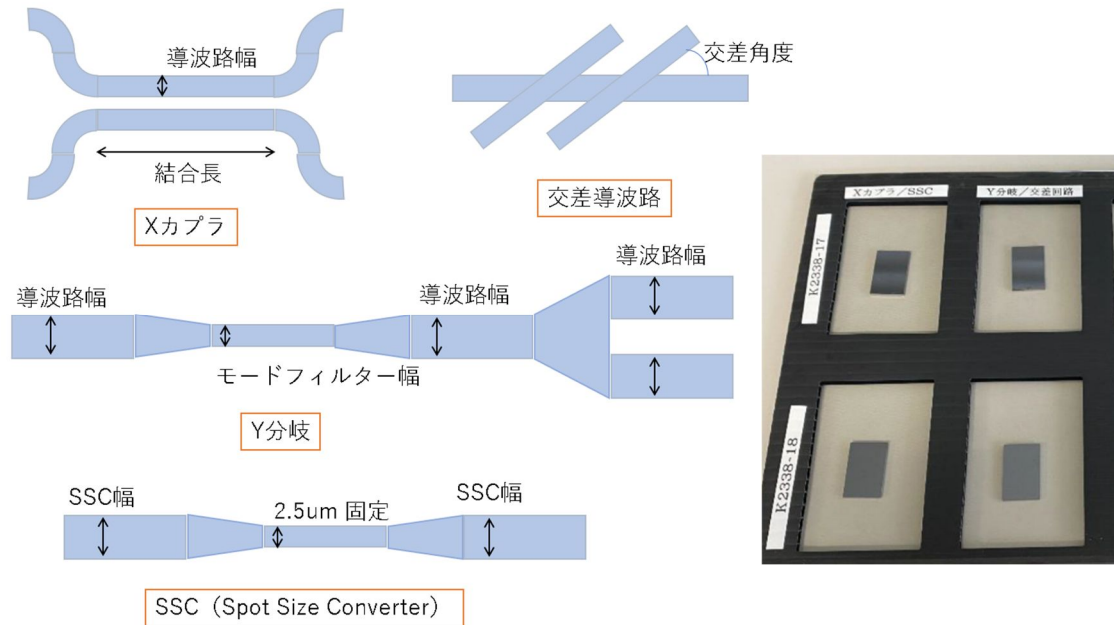


図4：開発した導波路回路

本研究の最終目標である 5 分岐 20 出力回路の製作には、初年度に開発した分岐・結合回路は、特に損失と波長依存性において十分な性能が得られないことと、現在の設計では天体の visibility を測定するには位相変調が必要であり、大気揺らぎの影響を受けやすいことがわかった。そのため最終年度では、5 分岐 20 出力回路製作は行わず、これらの問題を解決できる、新しい位相シフターを内蔵した分岐結合回路である多モード干渉導波路 MMI (Multi-Mode Interferometer) の開発を行った (図 8)。これは 2 入力 2 出力の導波路回路であり、かつ 2 出力の光の位相差を 90 度持たせるものである。この MMI と Y 分岐を組み合わせることにより、ABCD コンバイナーと呼ばれる、2 つの入力の光を干渉させ、かつ異なる位相 4 点での干渉縞を出力できる回路を実現でき、位相変調が必要でないため極めて安定かつ大気揺らぎの影響を受けにくい。合計 42 個の異なる導波路パラメーターの回路を製作した中で、最も特性が優れたもの

は損失 10%程度で、比較的広い帯域 (658+/-50nm) を実現できることがわかった。また分岐比は 50+/-10%、偏光の消光比は 6%程度であった。これらの一部はより性能向上が必要ではあるが、5分岐 20出力回路の実現に向けて基本的な回路は準備ができたと考えている。

X coupler (K2338-18-13, core thickness = 2.8 um, 658nm)

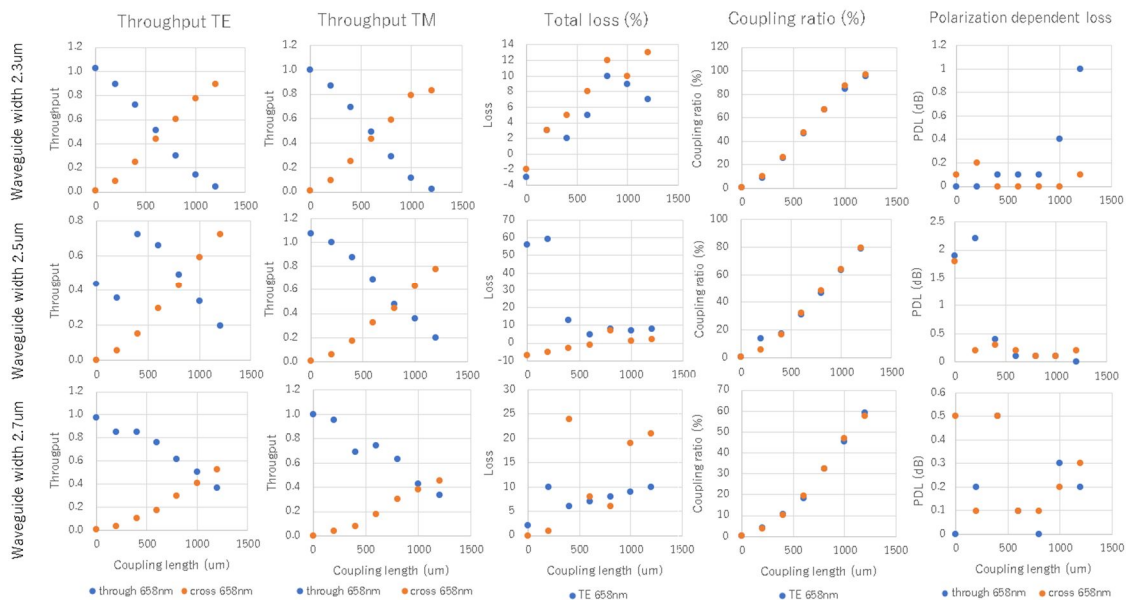


図5：Xカプラの挿入損失、分岐比、偏光依存性の測定（一部のみプロット）

Y splitter (K2338-17-14, core thickness = 2.6 um, 658nm)

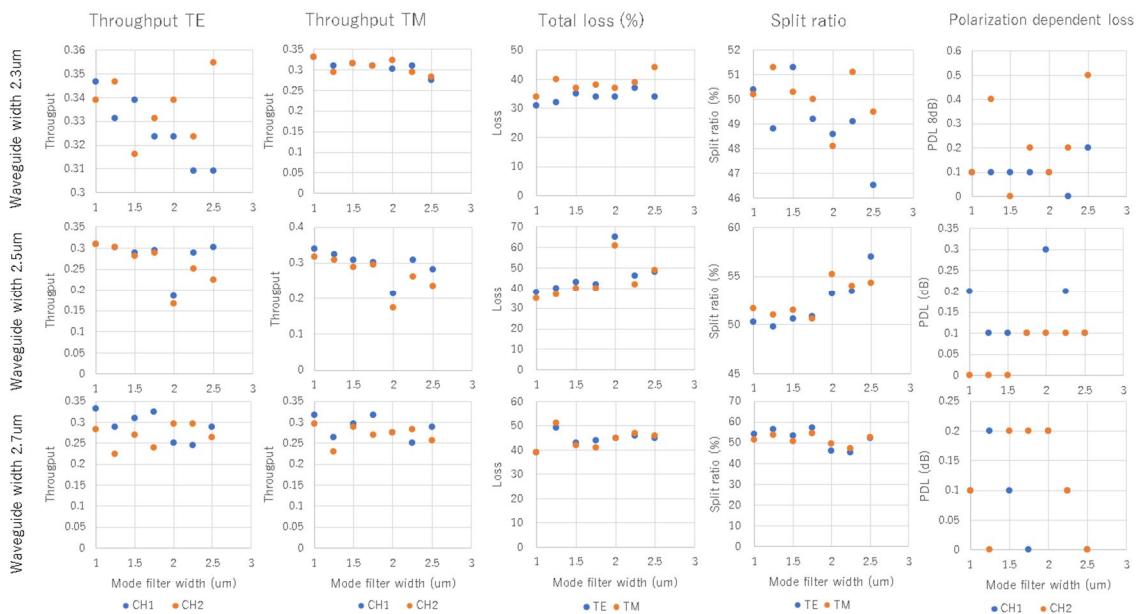


図6：Y分岐の挿入損失、分岐比、偏光依存性の測定（一部のみプロット）

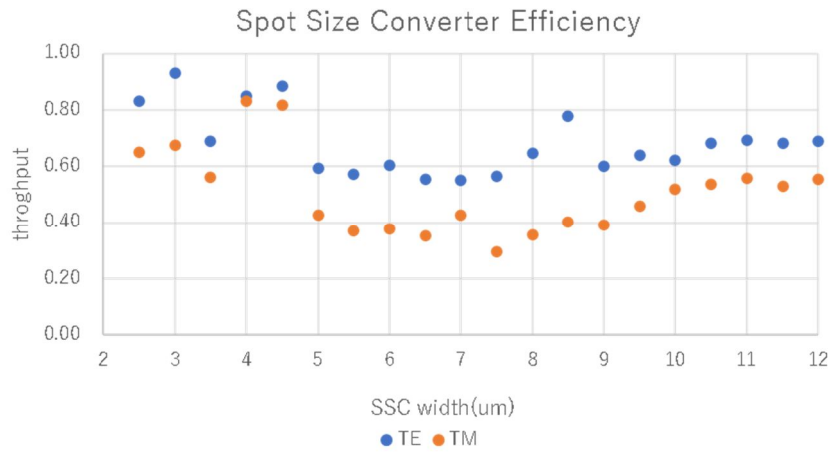


図 7 : SSC の透過率。TE、TM 両方の偏光状態についてプロットしてある。



図 8 : 多モード干渉導波路 MMI (Multi-Mode Interferometer) 。2つの入力光を干渉させ、出力 1 と 2 の間に 90 度の位相差を持たせるものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------