

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23740163

研究課題名（和文） 光集積回路を用いた高コントラスト撮像分光装置の開発

研究課題名（英文） The development of an integrated optics for high-contrast imaging spectroscopy

研究代表者

小谷 隆行 (KOTANI TAKAYUKI)

国立天文台・太陽系外惑星探査プロジェクト室・研究員

研究者番号：40554291

研究成果の概要（和文）：本研究では、太陽系外惑星の直接撮像を目指した、地上望遠鏡において大気の影響をほぼ完全に排除し、極めて高いダイナミックレンジの像を得るための光集積回路開発を行った。開発した18入力81出力の光集積回路の特性を測定した結果、回路間特性にばらつきはあるものの、光を干渉させ、位相差をつけて出力する回路として機能していることを確認した。18入力数、81出力数の光集積回路は、天文学用としては最も大規模なものである。

研究成果の概要（英文）：I developed an optical integrated optics in order to obtain a high-contrast image by removing the effect of atmospheric turbulences for direct imaging of extra-solar planets from the ground. The characterization of the developed 18-input, 81-output integrated optics shows that it can act as an interferometric beam combiner with phase shifters. This 18-beam 81-output integrated optics is one of the most complex integrated optics for astronomy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：光赤外線天文学、惑星探査、応用光学・量子光学・光干渉計、PLC

1. 研究開始当初の背景

1995年に太陽系外惑星が初めて発見されて以来、多くの系外惑星が見つかっている。そのほとんどが間接的な方法による発見であり、惑星を直接空間的に分解して、光を直接撮像した例は、木星より10倍も重く例外的に発見しやすい惑星のみである。よってより軽く暗い惑星の直接撮像を行い、大気組成を詳しく調べることは、天文学における最大の課題の一つとなっている。

しかし、惑星と恒星の明るさの比（コントラスト）は5桁以上であると予想されており、惑星の光は、恒星の回折光や大気揺らぎによるスペckルノイズ(散乱光)に容易に埋もれて

しまう。地球や木星と似通った惑星は、恒星に非常に近い領域に多く存在していると考えられているが、特に主星から0.5秒角以内の領域を探索することは、大気の乱れをリアルタイムに補償する補償光学をもってしても難しい。

2. 研究の目的

この限界を打ち破るには、全く新しい手法で大気揺らぎの影響を取り除くことが必要であり、そのための手法の一つとして、干渉計の技術を応用した「瞳再配置法」が注目されている。「瞳再配置法」は、望遠鏡の開口を複数の小さな開口に分割し、それらをあたかも小口径望遠鏡

で構成された干渉計として用いる。干渉計技術は、高い空間分解能が特徴であり、主星に近い領域を高コントラストで撮像するのに向いている。

しかしながら、この手法を実際の観測に応用するには、開口の分割数は少なくとも10以上は必要であり、通常的手法だと、それらを干渉させる光学系は極めて複雑かつ大規模なものになる。また非常に高い安定性も要求されるため、実現が難しいという問題がある。本研究では、これらの問題を解決し、瞳再配置法を実現するための、画期的な光集積回路の開発とその性能評価を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本応募研究は、私がこれまで行った瞳再配置法のプロトタイプ装置開発の成果を基にして行った。光集積回路は、シリコン基板上に超微細加工技術により導波路を形成するものであり、元々は光通信のコンポーネントとして開発され広く利用されている。特徴としては、ナノメートルの精度で、光分岐・結合・位相シフターなどの複雑な光導波路を生成することが可能であり、また可動部がなくコンパクトなため、極めて安定である。

大気揺らぎの影響を抑え、天体の情報を正確に再現するには、干渉させることができる光のペアが多いほど良い。そのため、できるだけ多数の光入力に対応できる回路が必要となる。私がこれまでに開発した光集積回路は、8つの光入力を持ち、36の干渉出力をするものであるが、本研究ではこれを大規模化し、18の光入力に対応できる回路を開発する。

回路の大規模化に際して問題となるのが、干渉縞をサンプリングするための位相シフターの構造である。これまでは、干渉縞を4点でサンプリングするために、1つの干渉出力につき0, 90, 180, 270度と4つの位相差を付けた出力を行っていたが、回路が大規模になるにつれて出力数が急激に増加し、それに伴い回路間のクロストーク・損失が増えてしまうという問題点があった。そこで本研究では、位相シフターを改良し、0, 120, 240度の3つの位相シフターとし、干渉縞を必要最低限の数でサンプリングすることで出力数を減らす回路構成とした(図1)。また、入力した全ての光を相互に干渉させるのではなく、ある程度相関数を限ることで、感度とコントラストの両立を図った。

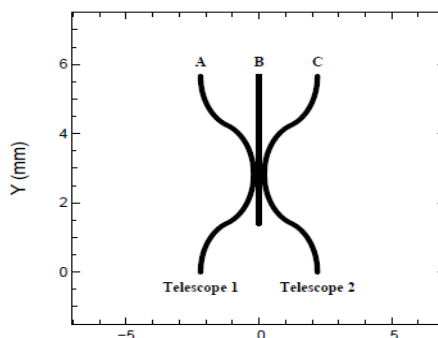


図1：3カプラーの概念図。下部2つの入力から光を入射し干渉させる。出力光はそれぞれお0, 120, 240度の位相差が付いており、干渉縞を3点でサンプリングすることができる。

4. 研究成果

本研究では、NTTエレクトロニクスと共同で、18入力81出力光集積回路の開発を行った。開発に際してまずは、鍵となるコンポーネントである、新しい位相シフター(3カプラーと呼ぶ)の設計を行い、数値シミュレーションにより0, 120, 240度の位相シフターとして機能することを確認した。次に、3カプラーを実際に試作して特性を確認した(図2)。理想的な3カプラーは、入力光を1:1:1の強度比で分割して出力する。この場合に、位相シフト量が0, 120, 240度となる。よって、分岐比を測定することで、位相シフターとして機能するかどうか分かる。測定の結果、分岐比率を測定した結果、波長1.55 μ m付近では、分岐比はほぼ1:1:1だが、波長依存性が強く出ていることがわかる。ただし、非等分の場合でも、位相シフトの量としては許容できる値である。このように、重要な構成部品である3カプラーの開発に成功した。

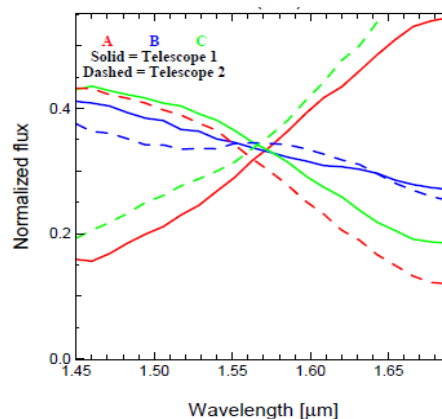


図2：3カプラー入力の一つに光を入射させ、出力された光の強度比の波長依存性を測定した。入力理想的な3カプラーは、入力光を1:1:1の強度比に分割して出力する。波長依存性が強く出ていることがわかる。

次に、3カプラーを用いた、小規模な干渉計回路である、4入力12出力回路を製作し、干渉回路が機能するかを確認した。これによって、より入力数の多い大規模回路の開発に目途を付けた。

以上の基礎開発の結果・経験を踏まえて、最終目標である18入力81出力回路の設計・製作を行った。(図3)、(図4)は設計した回路の概略図と実際に製作した光集積回路である。

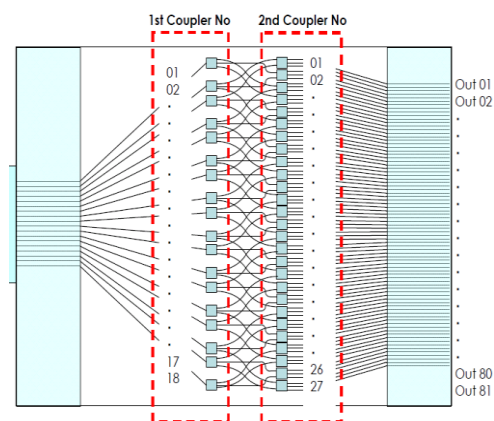


図3：18入力81出力回路の模式図。左から光ファイバーで18の光が入射される。この回路により81個の干渉出力を得ることができる。

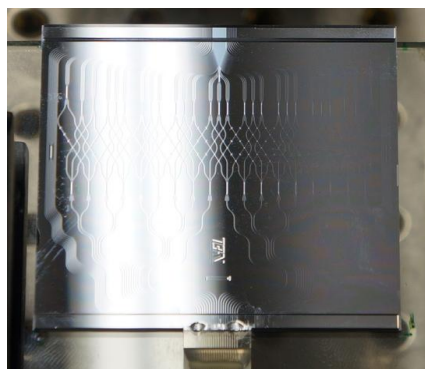


図4：製作した18入力81出力回路

製作した回路が、光を干渉させる光学系として機能しているかを、実験室の光学系にて確認した。波長1.55 μm のレーザーを2つに分割してそれぞれ別々のチャンネルに入力し、出力を測定する。位相シフト量を求めるために、入力光の一つのOPDを変化させ、3つの出力強度がどのように変化するかを測定した。(図5)、(図6)はそれぞれのチャンネルの出力光の時間変化を示したものである。OPDを変化させるにつれて、干渉縞が出ている。また、3つの干渉出力を比べると、それぞれ位相が120度づつずれているのがわかる。これは、3カプラーによる位相シフターが、設計通り機能していることを示す。

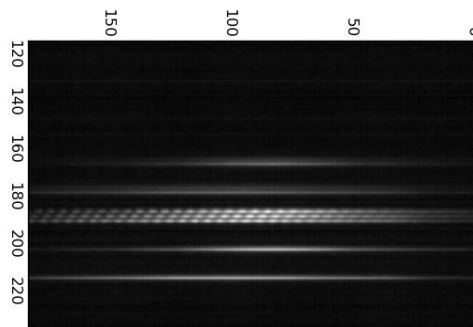


図5：実験室で得られた2ビーム干渉縞。横軸は光路長差、縦軸は検出器のピクセル。真ん中の列(3ビーム)のみ干渉した出力である。

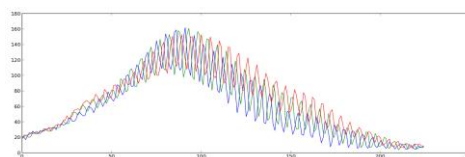


図6：図5の干渉縞部分のみをプロットしたもの。横軸は光路長差、縦軸は強度。各色は3つある干渉計出力のチャンネルを示す。

一方、位相シフターには強い波長依存性があることがわかっている。また各カプラーごとに特性が大きく異なることもわかっている。これは大規模な回路製作時の製造プロセスに起因するものであり、今後の課題である。解決方法としては、回路設計を見直してよりコンパクトにする、波長依存性の少ない位相シフターへと変更する、などが考えられる。

本研究で開発した18入力81出力の光集積回路は、天文学用としては世界で最も大規模なものであり、他に例を見ない。この素子の開発に成功したことにより、恒星に極めて近い場所に存在する太陽系外惑星の検出に大きく近づいたと言える。特に、将来の口径30メートル級望遠鏡による、地球型惑星探査のための有力な観測手法の一つとなり得る。

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)

[学会発表] (計1件)

小谷隆行、”光赤外線干渉計観測のための光集積回路の開発”、第二回可視赤外線観測装置技術ワークショップ、
2012年12月18日、国立天文台三鷹キャンパス

6. 研究組織

(1)研究代表者

小谷 隆行 (KOTANI TAKAYUKI)

国立天文台・太陽系外惑星探査プロジェクト室・
研究員

研究者番号：40554291

(2)研究分担者

該当者なし

(3)連携研究者

該当者なし