

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：34304

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17615

研究課題名(和文) 赤外線天体観測用フォトニック結晶スーパーレンズの開発

研究課題名(英文) Development of photonic crystal superlens for mid-infrared telescopes

研究代表者

藤代 尚文 (FUJISHIRO, Naofumi)

京都産業大学・神山天文台・研究員

研究者番号：60601789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、望遠鏡口径で決まる回折限界を超える角度分解能をもつ赤外線天体撮像装置の実現を目指し、フォトニック結晶スーパーレンズの開発を進めた。波長10ミクロン帯用のフォトニック結晶スーパーレンズについては、フォトレジストSU-8を用いた2光子吸収レーザーリソグラフィ装置による成形方法を選定し、理論設計と試作を試みた。設計においては、フォトニック結晶スーパーレンズの出射後に、入射前よりもビーム幅が小さくなる解を示すことができた。試作については、理論設計モデルの形状を十分な精度で再現するサンプルを加工できた。ただし設計、試作のいずれについても実用化に向けて課題が残されており、更なる研究が必要である。

研究成果の概要(英文)：We developed a photonic crystal superlens to realize an infrared astronomical imaging device with an angular resolution beyond the diffraction limit determined by the telescope aperture. For the photonic crystal super lens for the 10-micron wavelength band, we chose a fabrication method by a two-photon polymerization laser lithography using a photoresist SU-8 and attempted theoretical design and trial manufacture. In the design, we have shown a solution in which the beam width becomes smaller after transmission of the photonic crystal superlens than before the incident. In the manufacture, we have made a sample that reproduces the shape of the theoretical design model with sufficient accuracy. However, both the design and the manufacture have problems to be put to practical use, and further research is necessary.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：フォトニック結晶 天文学 望遠鏡 赤外線 二光子重合 三次元造形

1. 研究開始当初の背景

赤外線天文学の分野では、あかり宇宙望遠鏡、スピッツァー宇宙望遠鏡、ハーシェル宇宙望遠鏡の深宇宙探査により、波長 10 ミクロン ~ 200 ミクロンの中間 ~ 遠赤外線の波長帯においても赤方偏移 1 を超える遠方銀河が検出されるようになり、その特性が次第に明らかになってきた。銀河から放射される中間 ~ 遠赤外線は、生まれただの若い星、または活動銀河核の活動により暖められた塵からの放射と考えられており、銀河の形成と進化を調べる上で重要な波長帯である。遠方宇宙にある赤外線光度が高い銀河について、電波、サブミリ波の干渉計観測、およびハッブル宇宙望遠鏡の可視光撮像観測によって物理的なサイズを測定すると、赤方偏移 0.5 以上の遠方銀河は 5kpc 程度であるのに対して、近傍の銀河は 1kpc 以下であり、両者に明らかな違いがあることがわかってきた。これは、赤外線を放射する物理プロセスが、近傍(=現在)と遠方(=過去)の宇宙で異なることを示唆しており、精査が必要である。しかし当然ながら、電波、サブミリ波、可視光を放射する物理プロセスと、赤外線を放射するプロセスは異なっているので注意が必要であり、赤外線を放射する構造の物理的なサイズを直接測定できることが望ましい。ところが、波長 20 ミクロンの中間赤外線においては、既存の赤外線宇宙望遠鏡の角度分解能は、回折限界により 5 秒角程度(赤方偏移 1 で 40kpc に相当)にとどまっており、十分な解像度を得ることができなかった。

古典的な光学理論においては、望遠鏡の角度分解能は回折限界で制限され、角度分解能を向上させるためには望遠鏡口径を大きくする必要がある。2018 年 10 月に打ち上げが計画されている口径 6.5m のジェームズウェッブ宇宙望遠鏡を用いれば、同波長帯で 0.5 秒角程度(赤方偏移 1 で 4kpc に相当)の角度分解能を得られることが期待されるが、遠方銀河の赤外線を放射する構造の物理的なサイズを測定する目的には、まだ十分な解像度とは言い難い。また、数 kpc におよぶ物理的なサイズが分かったとしても、1kpc 未満の銀河の内部構造(星形成領域、活動銀河核)の分解には至らない。

望遠鏡の巨大化は、必然的に開発期間の長期化とコストの増大につながる。昨今の我が国、および世界各国の経済状態から鑑みるに、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡を超える巨大宇宙望遠鏡の早期実現は困難である。事実、中間赤外線の波長帯においてジェームズウェッブ宇宙望遠鏡を超える角度分解能の実現を目指していた、赤外線干渉計を原理とした地球型惑星探査機 (TPF-I; Terrestrial Planet Finder Interferometer) の開発計画は無期限延期となっている。

以上の通り、中間 ~ 遠赤外線の波長帯においては、遠方銀河の内部構造を調べるうえで十分な角度分解能が得られる望遠鏡が実現

される見通しは立っておらず、遠方銀河の真の姿を解き明かすことが不可能な状況が続くことは明らかである。

一方、フォトニクス、プラズモニクス、ナノフォトニクスといった古典的な光学理論を超えた最先端光技術分野においては、スーパーレンズ、ファイバースコープのような回折限界を超える分解能をもつ光学デバイスが実現されてきた。そこで研究代表者は、前研究課題(科研費課題番号: 25800113)の研究成果を受け、フォトニック結晶スーパーレンズに焦点をおき、望遠鏡の回折限界を超える光学デバイスの検討をすすめてきた。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、フォトニック結晶スーパーレンズを用いて、望遠鏡口径で決まる回折限界を超える高角度分解能が得られる撮像装置を実現することである。フォトニック結晶スーパーレンズは、誘電体の微細構造によって人工的に負の屈折率をもたせたデバイスであり、(特長 1) 入射角度の変化に対して射出角が敏感に変化する、(特長 2) 凹凸形状がない平板のため集光の仕方が入射位置によらない、という通常のレンズには見られない特長をもつ。(特長 1) を用いた F 値変換作用によって、ビームサイズを調整することができる。さらに、(特長 2) によって、望遠鏡焦点位置において分解不可能な 2 つの画角のビームが、結像位置を変えることなく同様に集光する。その結果、図 1 の概念図に示すように、フォトニック結晶スーパーレンズの焦点面において両ビームを分解可能と考えられる。これが可能であるならば、既存の望遠鏡光学系および固体撮像素子と組み合わせ、光学系の分解能を向上させられると期待される。

そこで本研究の具体的な目標を、波長 10 ミクロン帯の中間赤外線、および波長 100 ミクロン帯の遠赤外線において機能する、上述のようなフォトニック結晶スーパーレンズの設計・試作・実験を行い、達成可能な角度分解能を理論的・実験的に明らかにすることに設定した。

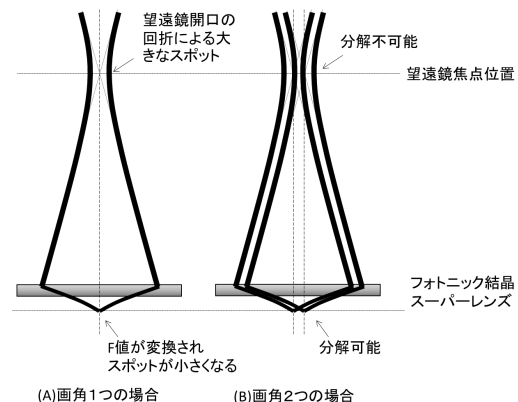


図 1 装置の原理

3. 研究の方法

本研究は、以下の2つを平行して実施する方針で進めてきた。

(1) 設計

平面波展開法、厳密結合波理論(以下、RCWA法)、時間領域差分法(以下、FDTD法)の3つの電磁場解析による理論計算によって、フォトニック結晶スーパーレンズの設計を行う。第1に、フォトニック結晶に用いる光学材料と、フォトニック結晶の加工方法を選択する。第2に、平面波展開法によって波数空間におけるフォトニックバンド構造および等振動数曲線を計算し、負の屈折効果をもちスーパーレンズとして機能するフォトニック結晶の周期構造を決定する。第3に、RCWA法によってフォトニック結晶の透過率を計算し、光が入射・出射するフォトニック結晶のインターフェース部の構造を最適化する。最後に、FDTD法によって光の伝播シミュレーションを実施し、点像分布関数を確認する。上記手順を繰り返し行い、フォトニック結晶スーパーレンズの最適解を探索する。なお本研究では、まず2次元フォトニック結晶で検討を進める。

(2) 試作・実証実験

(1)で選択した光学材料と加工方法によって、フォトニック結晶スーパーレンズの試作を実施する。

また、フォトニック結晶スーパーレンズを組み込む赤外線天体撮像装置は、レンズやミラーなどの古典的な光学素子で構成された望遠鏡と組み合わせ使用し、その角度分解能を向上させるものである。そのため、試作品の実証試験のためには、既存技術で作られた実証光学系が必要である。回折限界を超える角度分解能を目指すため、試験で使用する望遠鏡光学系は幾何収差を十分に補正したものでなければならない。また本研究で開発する天体撮像装置は、宇宙望遠鏡もしくは究極補償光学と組み合わせ使用を想定しており、大気の揺らぎ(シーイング)の影響があってはならない。そこで本研究では、大気揺らぎの影響が小さい実験室において使用可能な、収差をよく補正した望遠鏡シミュレータを設計・製作する。

最後に、望遠鏡シミュレータを用いて試作したフォトニック結晶スーパーレンズの試験を行い、分解能の向上を確認する。

4. 研究成果

(1) 設計

想定するフォトニック結晶スーパーレンズの構造を、図2に示す。本デバイスを側面からみると、基板に円孔が周期的に並んだ正方格子構造と、光が入射・出射する入出力端部で構成されている。波長10 μm 帯用フォトニック結晶スーパーレンズについては、基板の厚みは100 μm 程度が必要と見込まれ、フォ

トニック結晶としてはサイズが大きい部類に入る。一方、円孔の直径は数マイクロンであり、高精度で円孔の形状を実現するためにはナノメートルオーダーの微細加工技術が必要とする。また、光学材料は波長10 μm 帯の中間赤外線を透過する材料でなければならない。このような条件を満たすフォトニック結晶の加工方法として、波長10 μm 付近において吸収率が比較的小さいと見込まれるMICROCHEM社製フォトレジストSU-8 3050を使用した、2光子吸収法を原理とするレーザーリソグラフィによる3次元造形法を選定した。

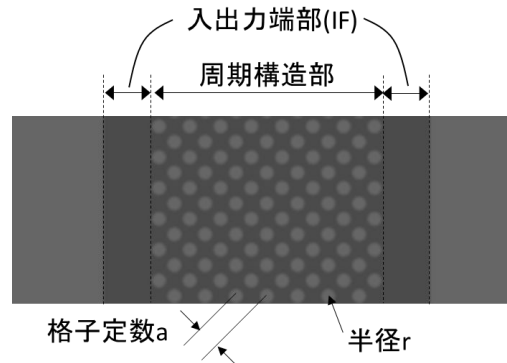


図2 フォトニック結晶スーパーレンズの構造

フォトニック結晶スーパーレンズの詳細設計においては、SU-8 3050の詳細な光学定数が必要である。そこで、スピナーを用いて単結晶シリコン基板上にSU-8 3050を塗布したサンプルを作成し、分光エリプソメトリ法によりその光学定数を測定した。図3は光学定数の測定結果であるが、波長帯によっては消衰係数が高く、吸収が大きいことが分かった。そこで本研究では、波長10~20マイクロンの間で消衰係数が最も小さくなる波長14 μm をフォトニック結晶スーパーレンズの設計波長とし、波長14 μm におけるSU-8 3050の屈折率と消衰係数の実測値を設計に用いた。

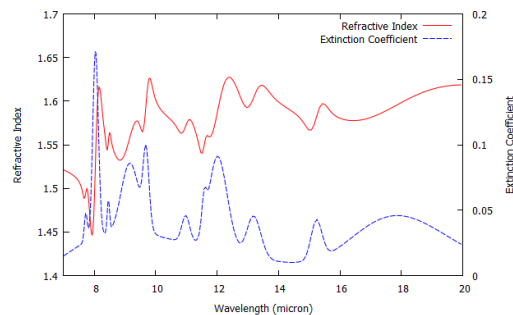


図3 SU-8 3050の光学定数測定結果

所望の集光効果を実現させるために、周期構造部を伝播する電磁波が負の屈折効果に対応する群速度をもつように、正方格子構造の格子定数aと円孔半径rの最適化を平面波展

開法による計算で実施した。さらに、できるだけ光の透過率を高めるために、RCWA法で入出力端部の厚みを最適化した。以上の手順によって最適化したフォトニック結晶スーパーレンズに対して行った、FDTD法による伝播シミュレーション結果を図4に示す。図5は、本シミュレーション結果から導出した、入射ビームと出射ビームのピークを規格化した点像分布関数の比較である。出射ビームの半値全幅が、入射ビームの半値全幅より小さくなるのが理論的に確かめられた。

ただし、出射ビームの半値全幅は入射ビームの85%程度であって改善の幅が小さいことと、出射ビームの透過率が悪く、入射ビームと比較すると点像分布関数のピーク強度が1/100程度しかない点が課題となっている。実用的なデバイスとするためには、前者に対してはフォトニック結晶スーパーレンズの周期構造部、後者に対しては入出力端部の形状について更に最適化を進める必要がある。

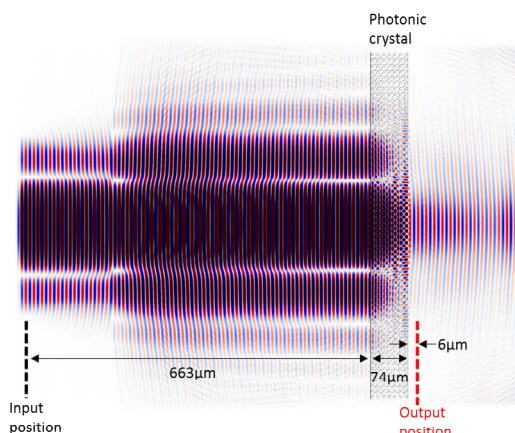


図4 FDTD法シミュレーション結果

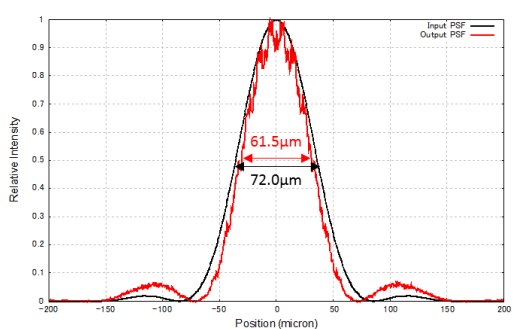


図5 入射・出射ビームのピークを規格化した点像分布関数の比較

波長 $100\ \mu\text{m}$ 帯の遠赤外線用フォトニック結晶スーパーレンズについては、代表的なテラヘルツ領域の光学材料について、加工方法とともに実現可能性を検討中である。

(2) 試作

2光子吸収レーザーリソグラフィ装置を使用して、上述の中間赤外線用フォトニック結晶スーパーレンズの試作を試みた。前処理としては、フォトレジスト SU-8 3050 をガラス基板上にスピンコートにて成膜したのち、65 および 95 に加熱したホットプレート上でソフトベイクを実施した。次に、3D CAD で作成したフォトニック結晶スーパーレンズの部分モデル(図6上段)を、レーザー・リソグラフィシステムで倍率 $100 \cdot \text{NA}1.4$ の油浸対物レンズを使用して、円孔に沿った方向にレーザーを照射して描画を行った。事後処理としては、再びホットプレート上でポストベイク、溶剤 SU-8 Developer による不要部分の除去、イソプロピルアルコールによる洗浄を経て、サンプルを取り出した。図6下段は、走査電子顕微鏡によるサンプルの評価観察結果であり、概ね設計通りの形状を実現できることを確認した。

一方、当初想定していたレーザーの照射方向は円孔に垂直な方向であって、この場合は実用上十分なサイズでの加工が可能であったが、この加工条件では円孔の形状を十分な精度で加工することができなかった。そのため、実用上十分なフォトニック結晶スーパーレンズを実現するには、今回試作したサンプルと同じものを10個以上作成し、それらをスタックする必要がある。なおこのスタック作業については、高精度の位置決めが可能な民生用の微小部品組み立て装置の使用を想定しているが、その実現可能性を別途検証する必要がある。

また現状の加工方法では、液体による事後処理によって試作サンプルが基板から剥がれて流出し、回収ができないことがあり、また回収できても傷がついてしまうことが高頻度で発生した。実用化には、この問題を克服しなければならないことが重要な課題として残されている。

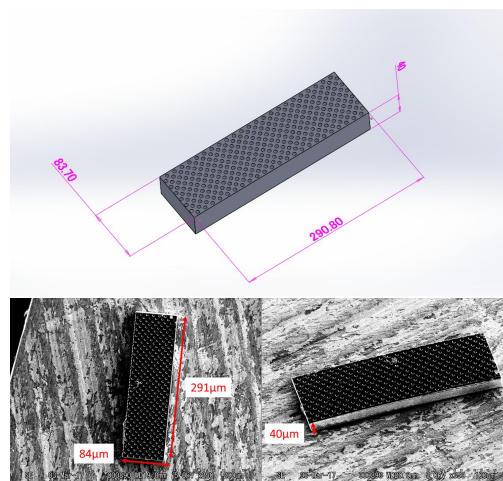


図6 試作サンプル。上段：設計モデル、下段：走査電子顕微鏡画像

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)

N. Fujishiro, "Design and fabrication of photonic crystal superlens for mid-infrared telescopes", SPIE Photonics West, 2017年2月1日, サンフランシスコ(アメリカ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤代 尚文 (FUJISHIRO, Naofumi)
京都産業大学・神山天文台・研究員
研究者番号: 60601789