

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800104

研究課題名(和文)長波長中間赤外線モスアイグリズムの開発

研究課題名(英文)Development of a moth-eye grism for long mid-infrared wavelengths

研究代表者

上塚 貴史(Kamizuka, Takafumi)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：30613509

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文):本研究は、近年開拓が進む長波長中間赤外線天文観測の効率化に有効な、高効率かつ冷却耐性のあるグリズムの実現をめざすものである。高効率化に重要な反射防止機構として、冷却耐性も期待できるモスアイ構造に着目し、シリコングリズムの両面にモスアイ加工を施した「両面モスアイシリコングリズム」を実現するための加工プロセスの確立と最適化を進めてきた。結果、両面モスアイシリコングリズムを完成させることができた。

研究成果の概要(英文):This research aims at developing a grism with high throughput and heat cycle durability for improving efficiency of astronomical observations in long mid-infrared wavelengths. Anti-reflection is important for maximizing throughput, and heat cycle durability is also required for use in infrared astronomical instruments. Moth-eye structure is expected to meet these requirements, and its formation is employed for the anti-reflection technique. By optimizing fabrication processes, a double-sided moth-eye silicon grism is successfully obtained.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：中間赤外線天文学 モスアイ グリズム

1. 研究開始当初の背景

中間赤外線を利用した天文観測は、宇宙空間に存在する固体微粒子(ダスト)を捉えるのに適している。ダストは地球のような惑星を作る材料であり、このダストが観測できる中間赤外線天文観測は、惑星を形作る材料の起源や、惑星に至るまでの進化過程を研究する上で重要な手段となっている。

近年の中間赤外線観測では、長波長領域の観測が開拓されてきている。短波長領域では比較的容易に観測が可能であるが、長波長領域(特に 25 ミクロン以上の波長帯)では 5000 m 級の標高にある天文台や、飛翔体を用いなければ観測が難しい。最近はこの観測手段が発達してきたことで観測が開拓されるようになり、本波長帯の観測技術の発展が要求されている。

本波長帯で求められている観測技術の一つが、高い効率を発揮する透過型光学素子の実現である。透過型光学素子は、光学系を単純かつコンパクトに設計することができ非常に有用であるが、高い効率が要求される天文観測用途においては、特に材料の透明性と表面反射の低減が重要となる。さらに中間赤外線天文観測機器では、光学系を 20 K 近くまで冷却する必要があるため、素子の冷却耐性も求められる。この「十分な冷却耐性と高い効率を持った透過光学素子」が長波長中間赤外線では実現されておらず、その開発が求められていた。

2. 研究の目的

本研究は、長波長中間赤外線用の透過光学素子の一つとしてグリズムを扱う事とし、「十分な冷却耐性と高い効率を持った長波長中間赤外線用グリズム」の実現を目指す。

先述の通り、効率を向上させるためには本波長帯において吸収が十分小さい素材を使う必要がある。さらに入手性・加工性の点も考慮して、本研究ではシリコンからなるグリズムの開発を行う事とする。

高効率の達成に重要なもう一つの点は表面反射の低減である。一般的に表面反射を抑える技術として、反射防止膜のコーティングが利用されるが、膜の厚みは波長が長くなるにつれて厚くなり、本研究で求められる冷却耐性が低下する。実際反射防止膜を施した長波長中間赤外線用のフィルタでは、熱サイクルによって破損が起きる例も見受けられ、これに代わる反射防止機構の開発が必要である。本研究では新たな反射防止機構としてモスアイ反射防止構造に着目する。

モスアイ構造は蛾の眼の表面にあるような、波長程度のスケールを持った凹凸構造である。このような構造をシリコンの表面に加工することは電子線リソグラフィ・反応性イオンエッチングを用いることで可能であり、形成された構造はシリコンのみからなるため、熱変形にも強く冷却耐性の要求をクリアすることができる。

以上の点から、本研究では「十分な冷却耐性と高い効率を持った長波長中間赤外線用グリズム」を実現するために、「モスアイシリコングリズム」の実現のための技術開発を行う事とした。

このようなグリズムが実現できれば、効率的な長波長中間赤外線分光観測が可能となり、将来の観測研究に与えるインパクトも大きい。また、今後の長波長中間赤外線天文観測機器のコンパクト化・高効率化に有効な基礎技術を確立することができる。

3. 研究の方法

シリコン平板へのモスアイ形成は十分に確立した技術であるが、複雑な形状を持つグリズムへのモスアイ加工プロセスは確立されていない。このため、プロセスの確立・最適化を試作・評価を通して進める。解決すべき課題として(1)面性状の良いシリコングリズムの実現、(2)階段面(ブレースパターン)を含むグリズム両面へのモスアイ加工の実現の二点が挙げられる。これらの課題を順番に解決し、両面モスアイシリコングリズムの実現を目指す。

製作するグリズムのパラメータとして、格子定数が 124 ミクロン、ブレース角が 4 度という値を採用する。また、モスアイ構造のパラメータとして、ピッチを 5 ミクロン、凹凸の高さを 15-20 ミクロンに設定し、このようなサンプルの試作を行った。

4. 研究成果

(1) 面性状の良いシリコングリズムの実現

本研究では最初に、面性状が良いシリコングリズムの形成に取り組んだ。シリコングリズムの形成では、くさび形のプリズム形状の形成と、その表面に対する階段状のブレースパターンの形成が必要となる。前者についてはシリコン基板の切り出しと研磨加工によって実現でき、後者については異方性エッチングによって実現することができる。

どちらの技術も個別には実績のある方法であったが、組み合わせで使用した場合に、研磨によって発生した微細な研磨痕が、後のエッチングの際に浸食され、最終的に深い溝を形成してしまう現象が確認された。最も深い溝で数ミクロンの深さがあり、これはグリズム形状の形成後に行うモスアイ加工を正常におこなえないレベルのものであった。このため、このような溝が発生しないように加工手順の最適化を進めた。

その結果、図 1 のようにグリズムの表面性状を改善することができた。図中左はエッチングにより研磨痕が先鋭化したサンプルであり、右は加工手順の最適化により表面性状が改善されたグリズムサンプルである。表面にはブレースパターンが形成されており、裏面は平坦面である。裏面については、高輝度ランプをあて、傷を浮かび上がらせている。傷の深いサンプルでは多くの傷が見られる

が、改善したサンプルでは傷の数を大きく低減できている。改善後のサンプルには、一本明確な傷が見られるが、この傷の深さを測定したところ、サブミクロンレベルのものであり、後に実施するモスアイ形成には問題の無いレベルに納まっていることがわかった。これにより、十分に表面性状のよいグリズムを得る事に成功したと考える。

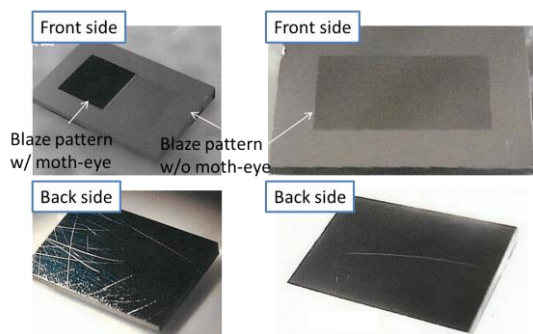


図 1 試作サンプルの表面性状の改善。左は研磨痕が先鋭化したグリズムサンプル。右は表面性状改善後のグリズムサンプル。

(2) グリズム両面へのモスアイ加工の実現

表面性状の良いグリズムが完成したため、次にその両面に対してモスアイ構造を形成する加工に取り組んだ。

ブレードパターン上にモスアイを形成する際は、電子線リソグラフィに用いるレジストの均一性が非常に重要であることが明らかになったため、本研究ではコーティングの手法として、複雑な形状にも均一にコーティングが施せるスプレーコートを採用した。これによりレジストの均一性が向上し、モスアイ構造をブレードパターン上に良好に形成できるようになった。また、裏面へのモスアイ形成に関しては、本サンプルのようにくさび形の両面に対してモスアイを形成するのは初めての試みであったが、平坦面へのモスアイ形成は十分に経験があり、これを問題なく実現することができた。

本試作で完成した両面モスアイグリズムの外観を図 2 に示す。くさび形をしたシリコン基板の半面の両面に対し、モスアイ加工がなされている様子が分かる（図中の黒色部分）。もう半面は試験評価用にモスアイ加工をせずにあえて残してある。表面にはブレード加工によるパターンが見えている。

図 3 はモスアイ構造の電子顕微鏡写真である。完成したサンプルと同じ条件で加工したサンプルの写真であり、左には断面図を、右にはブレードパターン上に形成されたモスアイを俯瞰した図を示している。断面図から、形成されたモスアイ構造は設計通りのピッチ・高さの凹凸構造になっていることが確認された。また俯瞰図からは、ブレードパターン上にモスアイ構造を高い均一性で規則正しく形成できていることがわかった。以上

の結果から、本研究の目標であった両面モスアイグリズムの実現を良好に達成できたとと言える。

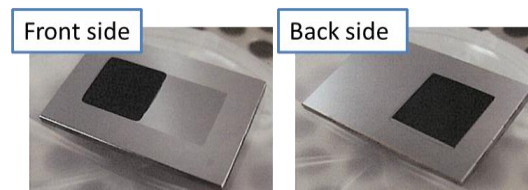


図 2 完成した両面モスアイグリズム。黒色部がモスアイ加工部。表面はブレードパターン加工面、裏面は平坦面である

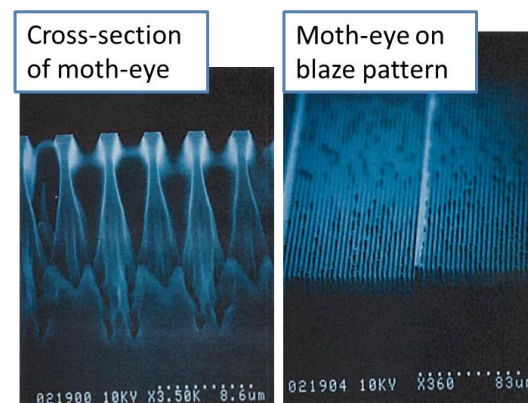


図 3 完成した両面モスアイサンプルのモスアイ構造の電子顕微鏡写真

本研究ではグリズムの光学的な評価試験を済ませることができなかった。本研究で形成することのできたモスアイ構造は、これまでの研究で平坦面やレンズの曲面に形成することのできたモスアイと同等の形状をしている。光学的な性質も同等の物になると考えられ、全透過率は 80% 以上になると期待される（モスアイが無い場合は 50% 程度にとどまる）。この効果を実証する試験を今後進め、天文観測機器への応用につなげていく。

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）

(1) Kamizuka, T., Miyata, T., Sako, S., Imada, H., Ohsawa, R., Asano, K., Uchiyama, M., Okada, K., Uchiyama, M., Wada, T., Nakagawa, T., Nakamura, T., Sakon, I., and Onaka, T., “Development of high-throughput silicon lens and grism with moth-eye anti-reflection structure”, Proceedings of SPIE, 査読無, Volume 9151, 2014, article ID 91515G, DOI: 10.1117/12.2055756

[学会発表] (計 2 件)

(1) 上塚 貴史、宮田 隆志、酒向 重行、大澤 亮、浅野 健太朗、内山 瑞徳、岡田 一志、内山 允史、毛利 清、尾中 敬、左近 樹、今田 大皓、中川 貴雄、和田 武彦、「モスアイ構造を用いた長波長中間赤外線高効率光学素子の開発」、2015/03/18-21、日本天文学会春季年会、大阪大学

(2) Kamizuka, T., Miyata, T., Sako, S., Imada, H., Ohsawa, R., Asano, K., Uchiyama, M., Okada, K., Uchiyama, M., Wada, T., Nakagawa, T., Nakamura, T., Sakon, I., and Onaka, T., “Development of high-throughput silicon lens and grism with moth-eye anti-reflection structure”, “SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation 2014”, 2014/06/22-27, Palais des congrès de Montréal, Montréal, Quebec, Canada

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上塚 貴史 (KAMIZUKA TAKAFUMI)

東京大学・大学院理学系研究科・研究員
研究者番号：30613509

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし