

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04975

研究課題名(和文)水銀フリー短波長光源のための深紫外顕微鏡対物レンズ開発

研究課題名(英文)Development of deep-ultraviolet objective lens for future short-wavelength light source

研究代表者

清水 俊彦 (Shimizu, Toshihiko)

大阪大学・レーザー科学研究所・准教授

研究者番号：80415182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、深紫外域に対応した屈折式顕微鏡対物レンズの開発である。本申請で深紫外対物レンズを作成し、急務である次世代短波長光源の研究開発に資するものとする。短波長光は吸収されやすく、紫外を下回る領域ではほとんどの材料で吸収される。また、単一材料でレンズを作成しても特定波長以外では十分な集光特性が得られない。申請者は短波長まで優れた透過特性を所持している複合フッ化物材料を見出し、それを使用して色消しレンズ作成および性能評価を行った。結果、紫外領域において、色収差低減が確認された。またレンズもイメージング分光器に組み込むことが可能となり、深紫外対応装置として結実した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本申請では、独自に開発を進めてきたフッ化物紫外域透明材料をレンズ素材へと応用し、深紫外屈折式対物レンズを開発することで、未開拓の光領域に新しいイメージング手法を提供する。フッ化物結晶は先行研究が多数あるが、レンズ材料としての品質を持つ結晶は育成が困難であった。本研究により、これを解決しこれまで「見る」事が困難であった光領域にアクセス可能にする。このレンズを用いたイメージング分光器等の計測機器の実用化及び材料開発(半導体光源等)やクリンプロセス(水質検査・浄化)分野のイノベーションが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop refractive microscope objective lenses in the deep ultraviolet region. In this application, we aim to create an objective lens in the deep ultraviolet region to contribute to the research and development of the next generation of short wavelength light sources that are urgently needed.

Short-wavelength light is easily absorbed by most materials in the region below the ultraviolet. Even if a lens is composed of a single material, sufficient light collection characteristics cannot be obtained at wavelengths other than those specified. We discovered a composite fluoride material with excellent transmission characteristics up to short wavelengths, and used it to make a color-blocking lens and evaluate its performance.

As a result, it was confirmed that the chromatic aberration in the ultraviolet region was reduced. The lens can also be incorporated into an imaging spectrometer, making the device compatible with the deep ultraviolet region.

研究分野：深紫外分光

キーワード：深紫外光学技術

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

深紫外光は、産業・学術・医療分野において大きい需要が存在する。その代表例である青色 LED の開発はノーベル物理学賞に選ばれ、社会的にも注目を集めた。青色 LED よりもさらに波長が短い光源の実現は、社会に存在する半導体を使用した装置や光学観測装置、さらには医療・環境の装置の性能が一桁以上向上し、我々の生活環境を大きく豊かなものにできる。深紫外波長域で産業的に事業化されている光源は水銀ランプやエキシマレーザーなどが存在している。

しかし、人体に影響を与える水銀や有毒ガスを使用することから環境負荷や安全性といった問題と、非固体光源であることから安定性・メンテナンス性などに解決すべき課題がある。特に水銀を使用する光源は水俣条約の発効がなされると見込まれていることから、産業の現場から排除されることが容易に推察される。そのため、これら水銀ランプやエキシマレーザーに代わる次世代の短波長の固体光源開発が必須である。

半導体レーザーは小型化・低電力で有害物質の放出がないクリーンな光源である。これまで、広いバンドギャップを持つ材料がほとんど存在しなかったことから深紫外用光源の開発が困難とされてきたが、近年の青色 LED の発展に伴う窒化物系の広範な探索により、AlGaIn など深紫外領域の発光材料が見出された。結晶成長制御により発光効率も改善可能であることが明らかにされ、深紫外半導体レーザーが急速に実現しつつある。深紫外半導体レーザーの実用化・産業化のために、半導体素子の発光のメカニズムの解明と品質の評価手法の最適化が求められている。評価には物理的な素子の欠陥やダメージの計測の他に素子の各場所での発光の違いを計測する必要がある。発光を得るための手法としては電流注入法、光注入法、電子線注入法があるが、特に素子にダメージを与えない深紫外での光注入計測手法が解決手法として求められている。また、発光場所は微細なため、その同定には顕微イメージング計測が求められる。

これら深紫外半導体レーザーに加え環境センシング用途でもイメージング計測が期待されており、深紫外イメージング装置の開発が急務である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、深紫外域に対応した屈折式顕微鏡対物レンズの開発である。

イメージング装置の開発には、集光・結像からなる像転送系が必須要素である。集光・結像は大きく分けて反射光学系(曲面鏡)や屈折光学系(レンズ)、回折光学系(ゾーンプレート)がある。レンズは屈折率の異なる媒質内を通過させることで光を集めるため、光透過性を持つことが必要である。現在の短波長光において屈折光学系はその領域での光透過性がほとんどないため、反射光学系が主流であり、実際の半導体検査などで採用されている。反射光学系は光軸上の光を捉えることができない、開口が小さい等の問題点がある。反射光学系は基本的に光の色によって集光の度合いが異なる収差(色収差)はないが像の収差補正には結局複雑な非球面鏡がいるのでそこまでは有利ではないと考えられる。また構造上光が鏡に遮られる部分が存在する。色収差は無いとはいえ、短波長域では光軸上に垂直に入射する場合の反射が難しくなり、特殊コーティングや多層膜化といった高価な鏡が必要である。また、複数の方向の異なる鏡を使用しそれぞれの位置関係の微調整が必要となるため、システムに組み込まれた中でメンテナンスや改良を行うのは難しいという問題もある。一方、屈折光学系は光軸上に対象-像転送系-検出器が一系列に並び、光を遮る部分もない。また、レンズの口径が開口径となり光を多く取り入れることができる。しかし、屈折式対物レンズは、短波長領域で色収差を解消するレンズ材料の確立が課題となり実現には至っていない。本申請では、独自に開発を進めてきたフッ化物紫外域透明材料をレンズ素材へと応用し、深紫外屈折式対物レンズを開発することで、未開拓の光領域に新しいイメージング手法を提供する。フッ化物結晶は先行研究が多数あるが、レンズ材料としての品質を持つ結晶は育成が困難であった。本研究により、これを解決しこれまで「見る」事が困難であった光領域にアクセス可能にする。このレンズを用いたイメージング分光器等の計測機器の実用化及び材料開発(半導体光源等)やクリーンプロセス(水質検査・浄化)分野のイノベーションが期待できる。

### 3. 研究の方法

課題となるのが「この光領域で十分に透明かつレンズ加工可能な光学材料の確保」「色収差を軽減する材料組み合わせの決定」という点である。本研究で開発する対物レンズのスペックは、レンズ系全体の透過率 70 %以上、色収差を 1 %以下、開口数(NA)0.1 以上を目標とする。課題の解決方法については既に検討が進んでおり、申請者が結晶成長から光学特性評価(透過率・屈折率)まで研究を進めてきた 2 種類の深紫外透過材料を中心に設計を行う。波長域は先に述べた AlGaIn 深紫外光源への適用を念頭において、その発光波長域である 120 ~ 300nm で使用できるものとする。

### [研究目標 1] 紫外域透明材料による屈折光学系（レンズシステム）設計

設計に必要なレンズ材料のパラメータを出す。透過率・屈折率の計測を大阪大学の装置で行う。そのデータをもとにシミュレーションによりレンズの最適な設計を行う。

### [研究目標 2] 光学素子クオリティの材料開発

想定波長域での透過率が低いとレンズとして使用できない。また標準サイズの顕微鏡対物レンズを切り出すには、1インチ以上の結晶プールが必要となる。作製法を検討し、結晶を育成依頼し入手する。

### [研究目標 3] 紫外域透明材料による屈折光学系（レンズシステム）評価

目標 1 の設計をもとに目標 2 の材料をレンズに加工する。レンズの性能は大阪大学の装置を使用して評価する。完成した対物レンズの実用性試験では、深紫外光源（レーザー・ランプ）をバックライトとして、分解能テストターゲットを対物レンズ及び紫外 CCD カメラで観察し、空間分解能・色収差を評価する。

## 4. 研究成果

本研究の目的は、深紫外域に対応した屈折式顕微鏡対物レンズの開発である。本申請で深紫外対物レンズを 3 年間で作成から実用フェーズまで実施し、急務である次世代短波長光源の研究開発を推進させることを行う。短波長光は吸収されやすく、紫外を下回る領域ではほとんどの材料で吸収される。また、単一材料でレンズを作成しても特定波長以外では十分な集光特性が得られない。申請者は短波長まで優れた透過特性を所持している複合フッ化物材料を見出した(図 1)。レンズの性能評価には透過率、色収差、集光性能の調査が必要である。見いだされた材料を基

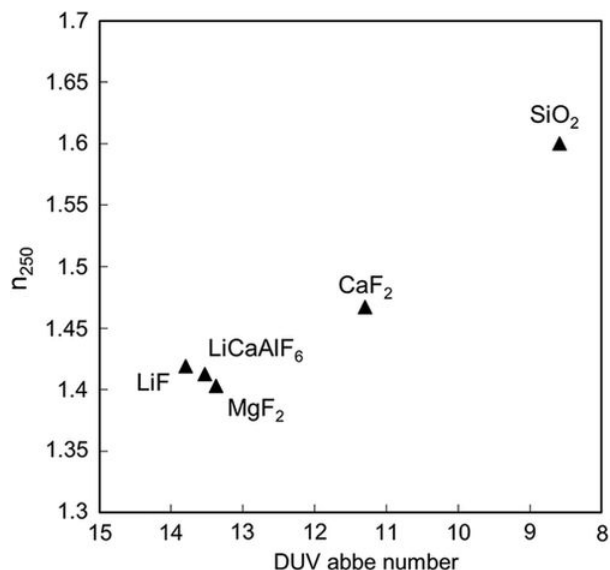


図 1 検討をおこなったフッ化物種[1]

に作成を行った色消しレンズについて、透過率評価と集光に色収差の影響がどれくらい現れるか確認した(図 2)。目標としている材料の特性として、透過域が 190nm ~ 可視光域で 1cm あたりの透過率が 90%、潮解性、複屈折が少なくレンズへ加工が可能としている。計測の結果、吸収端は 123nm であり、十分な透過性能があると結論付けた。加工されたレンズに関して、透過率の計測を行った。真空紫外光は大気に吸収されるため、実験は真空条件下で実施する。透過率の測定には UVSOR の固体分光用ビームライン BL7B を用いて行った。BL7B は固体試料分光用ビームラインとして設置されており、真空紫外領域 (VUV) から赤外領域 (IR) までの波長を連続的に選択可能である。また、応募者所有の赤外・可視光・紫外レーザーシステムを利用しての集光・色収差評価を行った。結果、紫外領域において、単レンズよりも大きく色収差が低減されていることがわかった。

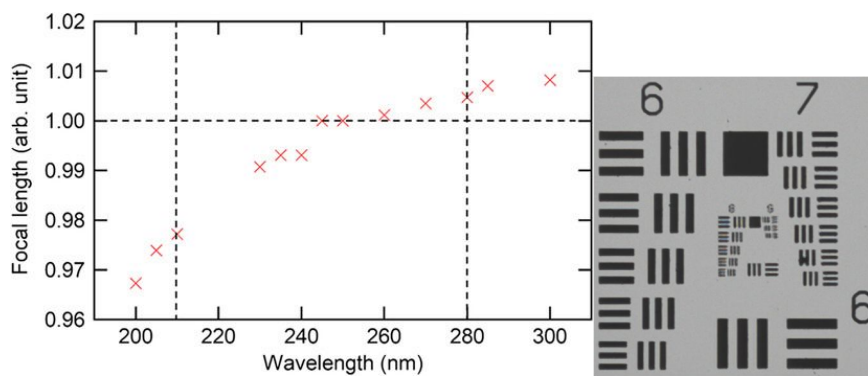
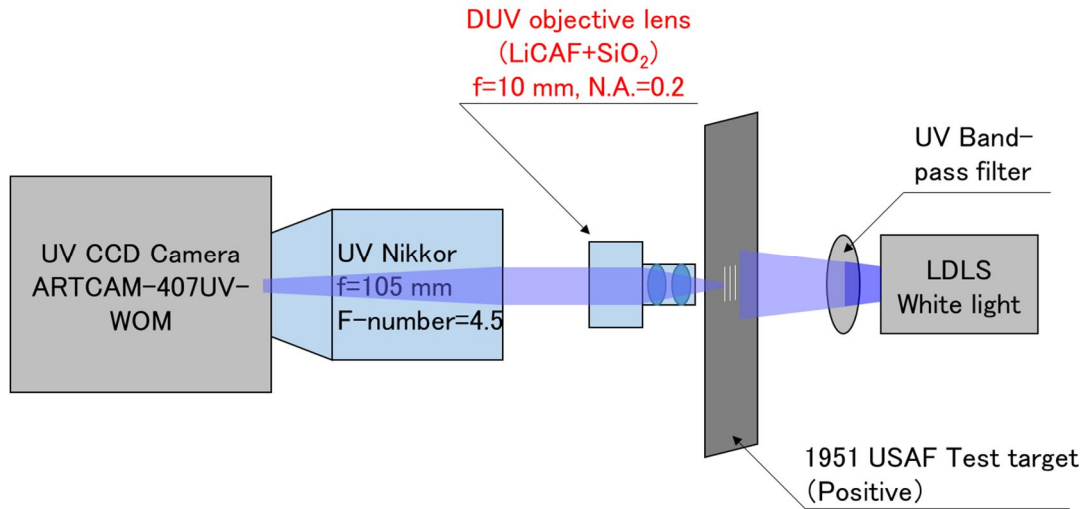


図2 フッ化物色消しレンズ評価[1]

集光性能に関しても試作レンズと市販品の比較により行った。比較の結果、(深紫外用途ではない)市販品と遜色がない性能であり、球面収差が低減されているケースもあった。このため、民生品に本課題成果のレンズを組み込むことで深紫外対応化も期待できる。

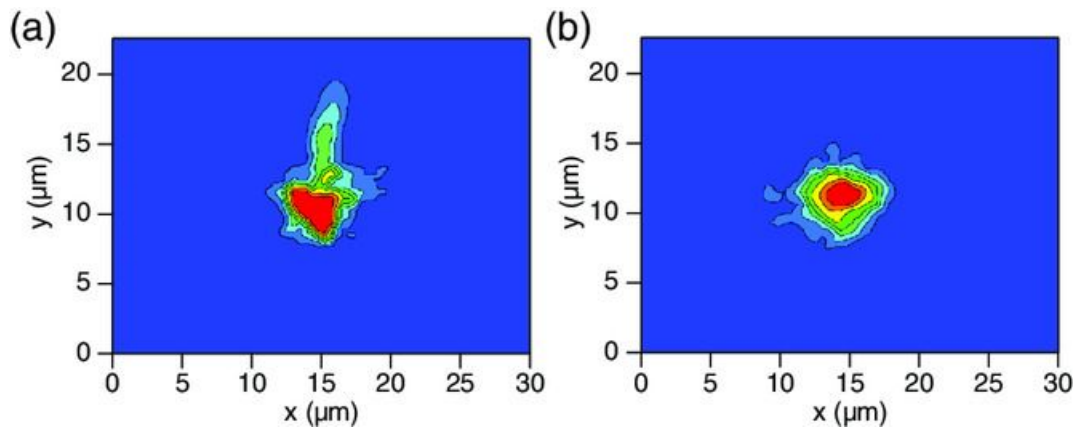


図3 集光性能評価[1] (a) 試作レンズ、(b) 市販レンズ

最終的に顕微レンズのほかにより口径の大きい深紫外色消しイメージングレンズの作成にも成功し、イメージング分光器に組み込むことが可能となり、深紫外対応のイメージング分光器として結実した。

成果の一部は引用文献[1]として発表を行った。

<引用文献>

[1] Y. Minami et al., "Achromatic Deep Ultraviolet Lens Using Novel Optical Materials," Physica Status Solidi B-Basic Solid State Physics, **257**, 1900480(2020)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Minami Yuki, Cadatal-Raduban Marilou, Kuroda Koki, Shinohara Keito, Lai Youwei, Yamanoi Kohei, Sarukura Nobuhiko, Shimizu Toshihiko, Ishii Ryota, Kawakami Yoichi, Kabasawa Nobuo, Amano Takashi, Kiyohara Kosuke, Kiyohara Motosuke	4. 巻 257
2. 論文標題 Achromatic Deep Ultraviolet Lens Using Novel Optical Materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 1900480 ~ 1900480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.201900480	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔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
研究分担者	山ノ井 航平 (Yamanoi Kohei)  (30722813)	大阪大学・レーザー科学研究所・助教  (14401)	
研究分担者	猿倉 信彦 (Sarukura Nobuhiko)  (40260202)	大阪大学・レーザー科学研究所・教授  (14401)	

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		
ニュージーランド	Massey University		