

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18747

研究課題名（和文）破壊的干渉照明を用いた次世代極細光ファイバ直径のナノ精度計測原理の確立

研究課題名（英文）Diameter measurement of next generation nano optical fiber using destructive interference illumination

研究代表者

道畑 正岐（Michihata, Masaki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：70588855

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、サブマイクロメートルファイバの直径を、対向伝搬ビームによって形成される定在波照明を用いて評価する新しい光計測技術を提案した。定在波の空間位相を積極的に制御することで、散乱光強度分布が変化した。その変化傾向の解析から、直径約500 nmの光ファイバの直径を30nmのばらつきで測定することができた。測定された直径は、SEMによる測定値とよく一致した。これらの結果から、本手法の精度は数十ナノメートルであることが検証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、その場直径計測する新規光学計測原理を提案し、その原理を確認することで、本手法の有効性を示した。Mie散乱理論を基にした従来の光学計測手法は、光ファイバの直径が光波長以下になると、直径推定は困難となる（計測限界は700 nm程度）。我々はこの限界の突破に挑戦する新規計測原理を提案する。2方向から光を照射する定在波照明は、照明光が空間的強度分布を持ち、光強度ゼロの破壊的干渉位置には散乱光は発生しない。つまり、照明光強度分布を掛け合わせた散乱光強度分布が得られるため、700 nm以下でも、直径変化に対する散乱光強度分布の変化が得られ、高精度計測できた。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a new optical measurement technique to evaluate the diameter of submicrometer fibers using standing wave illumination formed by counter-propagating beams. By actively controlling the spatial phase of the standing wave, the scattered light intensity distribution changed. From the analysis of the changing pattern, the diameter of an optical fiber with a diameter of about 500 nm could be measured with a variation of 30 nm. The measured diameter agreed well with that measured by SEM. These results verify that the accuracy of this method is several tens of nanometers.

研究分野：計測工学

キーワード：ナノファイバー マイクロファイバー 干渉照明 テーパー光ファイバー

1. 研究開始当初の背景

現在、マイクロ・サブマイクロファイバーは様々な分野で用いられている。例えば、医療用マスクのようなフィルター、繊維強化プラスチックのような強化材が代表的な用途である。また、マイクロ/サブマイクロ光ファイバーは、コンピューティングや量子フォトンクス用の次世代光回路への応用も期待されている。マイクロ/サブマイクロファイバーの品質管理は、今後、さらに重要になることが考えられる。中でも、直径は最も基本的で重要なパラメータの一つで、マイクロ/サブマイクロファイバーの直径は、数 10 ナノメートルから数 10 マイクロメートルに及ぶ。しかし、その光ファイバの要求を満たす計測手法は存在しない。一般的な測定評価技術は走査型電子顕微鏡 (SEM) であり、高分解能でダイナミックレンジが広い。SEM の欠点は、やはり、真空の測定環境が必要な点である。次に、光学的手法も広く用いられている。光学顕微鏡を用いると、回折限界のために測定可能な直径が制限され、例えば、1.8 nm~数 100 nm は計測可能である。光散乱の場合、測定された散乱光強度分布と散乱理論によって計算された分布を比較することで、ファイバー径を推定する。円筒物体からの光散乱は、ミー散乱理論を用いて厳密に解析できるが、照明波長以下のファイバー径では、ミー散乱はレイリー散乱に遷移するため、散乱光強度分布に特徴がなくなり計測が難しい。そこで、本論文では、サブマイクロメートル径のファイバを測定する新しい光学的手法を提案するものである。

2. 研究の目的

本研究では、その場直径計測する新規光学計測原理を提案する。Mie 散乱理論を基にした従来の光学計測手法は、光ファイバの直径が光波長以下になると、直径推定は困難となる(計測限界は $\phi 700$ nm 程度)。我々はこの限界の突破に挑戦する新規計測原理を提案する。2 方向から光を照射する定在波照明は、照明光が空間的強度分布を持ち、光強度ゼロの破壊的干渉位置には散乱光は発生しない。つまり、照明光強度分布を掛け合わせた散乱光強度分布が得られるため、 $\phi 700$ nm 以下でも、直径変化に対する散乱光強度分布の変化が得られ、高精度計測できる。

本研究では、光学手法による次世代極細光ファイバの直径を 10 nm 程度の精度でその場計測する計測原理を提案し、その計測原理の実験検証および精度評価を目的とする。

3. 研究の方法

従来のミー散乱理論に基づく測定では、平行光をファイバに入射し、散乱光分布を測定・解析する。本研究では、照明光に対向ビームを用いた (図 1)。ビームはファイバーの周囲に定在波を形成する。単一ビーム照明と異なり、定在波照明は空間変調された強度パターンであり、当然、散乱光強度分布に影響を与える。さらに、ファイバーに対する定在波の空間位相によって、散乱光強度分布も変化する。変化する散乱光強度分布を分析することにより、サブマイクロメートルファイバの直径を測定を狙った。定在波の空間ピッチは $1/2$ 波長。波長 632nm のレーザーを使用した場合、定在波のピッチは 316 nm となる。マイクロファイバーを測定する場合、定在波の複数の波長がファイバーで散乱されるため、散乱光の強度分布に複数の山と谷が現れる。サブマイクロメートルファイバーの場合、定在波のピッチはファイバー直径に近いので、散乱光強度分布に現れる強度の谷はわずかである。そこで、定在波の位相を積極的に制御することにより、強度谷の角度的な位置ずれを測定する方法を提案した。ファイバー径は、強度の谷の角度位置シフトパターンに基づいて決定される。

次に、ファイバーからの理論的な散乱光強度について理論的に計算を行った。照明光として、波長 λ を持つ 2 つのコリメートレーザーを対向伝搬させたものを想定する。定在波照明はファイバの軸に垂直に入射する。図 2(a)に示すように、ファイバー径を変えて散乱光強度分布を計算した。入射ビームの偏光はファイバー軸に平行とした。ファイバー径が小さくなるにつれ、散乱光の強度分布は単純になる。90°付近に強度の谷があることに注意する必要があるが、これは定在波照射によるものである。したがって、ファイバー径を評価するためには、90°付近の散乱光強度を測定する必要がある。開口数(NA)0.55 の対物レンズを用いた場合、33.4°の角度範囲の散乱光が得られ、その場合、図 2(b)のような散乱光強度分布が測定できる。前述したように、サブマイクロメートルファイバの角度測定範囲にはいくつかの谷が存在する。

次に、定在波の位相が異なる場合の散乱光強度分布を計算した (図 3)。ファイバーの直径は 500 nm とした。定在波の位相によって、強度の谷の角度位置がずれるが、前方散乱光と後方散乱光の強度分布は変化しない。強度の谷の位置のシフト傾向は、図 4 に示すように、ファイバー径に敏感に依存する。従って、強度の谷の位置ずれを測定することで、ファイバ径を求めることができる。

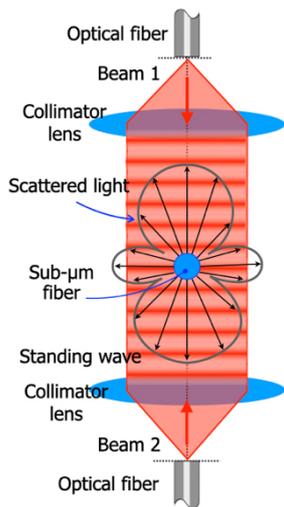


図 1 計測のコンセプト

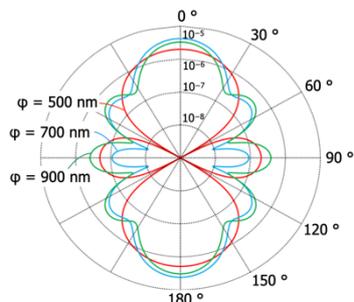


図 2 光ファイバー直径の違いによる散乱光強度分布の変化

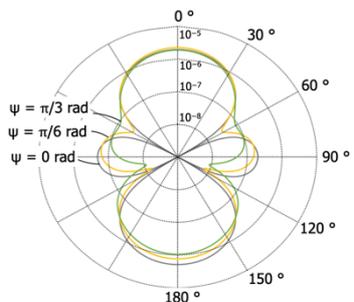
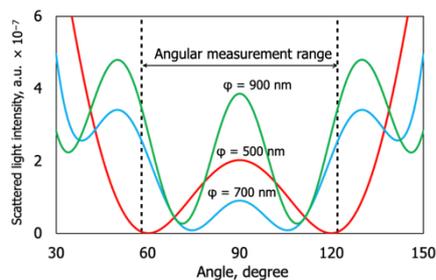


図 3 入射定在波照明の位相の違いによる散乱光強度分布の変化

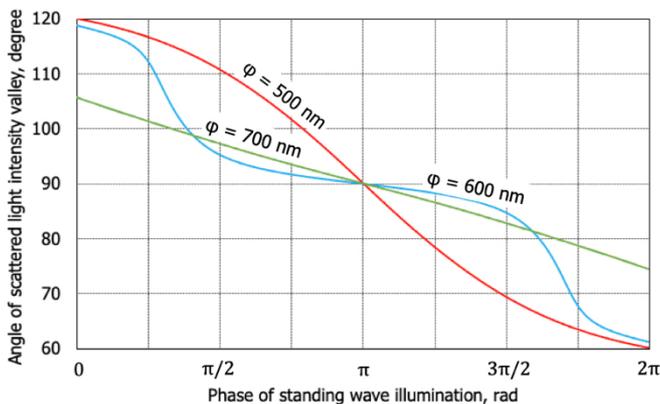
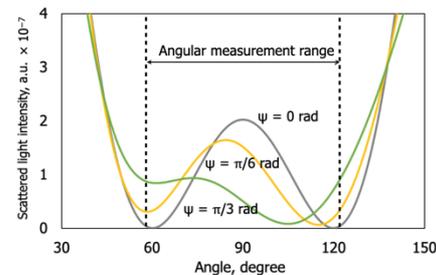


図 4 散乱光強度分布の谷となる角度が入射定在波位相変調によって変化するパターン

4. 研究成果

提案手法の実験的な検証を行なった。まず、直径 500 nm 程度の光ファイバの数カ所で強度の谷の角度位置のずれを測定し、実験的に得られた結果を理論値と比較した。強度の谷の角度は、測定した散乱光強度分布に 2 次の多項式をパラメータフィッティングすることで検出した。結果を図 5 に示す。黒丸のプロットと赤の実線は実験値と理論値を示している。理論値は直径をパラメータとして変化し、実験値と最も一致するものを示した。図 5 に記した直径は、理論値の直径を示す。理論値との乖離の決定的な理由の一つは、ファイバーの不安定性であることに注意すべきである。定在波のピッチが 280 nm 付近であったため、ファイバのたわみが数 nm であったにもかかわらず、散乱光強度分布が変化した。理論的に、直径 500~700nm の範囲では、S 偏光よりも P 偏光の方が、強度の谷の角度位置のシフトの傾向変化が激しいことが事前に求められているが、その傾向は実験データと一致した。以上の実験データを考慮すると、提案手法の測定モデルは妥当であることが確認できる。

最後に、光ファイバの直径分布を提案手法と開発した計測システムを用いて測定した。測定結果は SEM で得られた結果と比較した。直径は、長さ 3 mm にわたって 250 μm 間隔で光ファイバの 13 の位置で測定した。各位置において、P 偏光と S 偏光の両方について、強度の谷の位置シフトのパターンを測定した。直径を実験的に求めるために、理論値に基づく測定が実施された。様々なファイバー径に対する強度谷位置シフトの理論値をライブラリとしてあらかじめ用意しておいた。測定された強度谷位置シフト量と最も一致する理論値がライブラリから選択された。本論文では、P 偏光について、直径 450 nm から 790 nm までの理論値を 10 nm 間隔で用意した。測定した直径分布を図 6 に示す。測定は各ポイントで 5 回行った。平均値と標準偏差を示した。SEM の直径は、同じ作製条件で作製した別のファイバーのデータであるため参考値である。

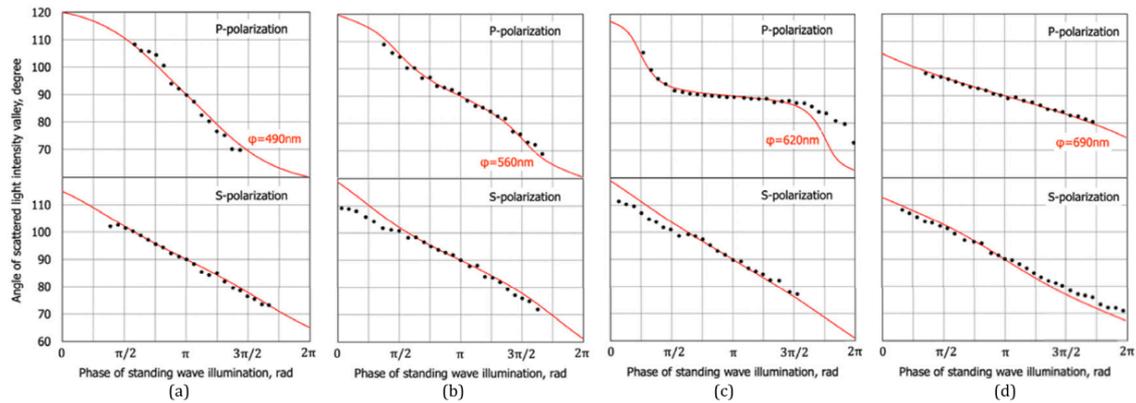


図5 実験的に測定した散乱光強度分布変化のパターンとそれを用いた直径計測結果

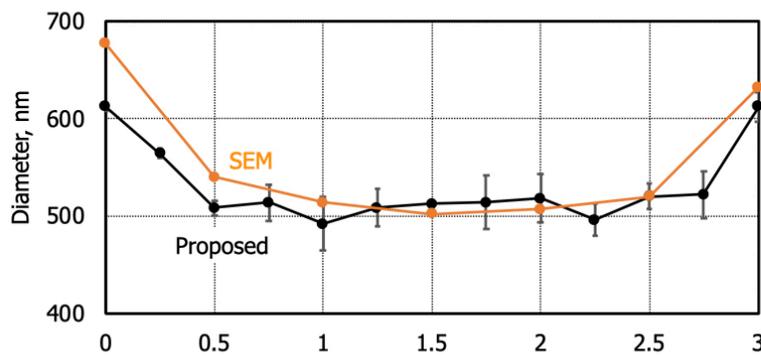


図6 直径 500 nm 程度の光ファイバーの直径分布の計測結果

図6より、提案手法では約 500 nm の繊維径を 30nm のばらつきで測定できることがわかった。SEM の結果と比較すると、測定された直径は同じオーダーであり、直径分布も一致していることから、数十 nm の測定精度が確認されたことがわかる。

本研究では、サブマイクロメートルファイバの直径を、対向伝搬ビームによって形成される定在波照明を用いて評価する新しい光計測技術を提案した。定在波の空間位相を積極的に制御することで、散乱光強度分布が変化した。その変化傾向の解析から、直径約 500 nm の光ファイバの直径を 30nm のばらつきで測定することができた。測定された直径は、SEM による測定値とよく一致した。これらの結果から、本手法の精度は数十ナノメートルであることが検証された。

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Michihata Masaki, Murakami Sojiro, Kadoya Shotaro, Takahashi Satoru	4. 巻 71
2. 論文標題 Measurement of diameter of sub-micrometer fiber based on analysis of scattered light intensity distribution under standing wave illumination	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CIRP Annals	6. 最初と最後の頁 421 ~ 424
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cirp.2022.03.008	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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 村上宗二郎
2. 発表標題 定在波照明を用いたマイクロ光ファイバのインプロセス直径計測(第5報) -サブマイクロ光ファイバのインプロセス直径計測-
3. 学会等名 2022年度精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://sites.google.com/view/masakimichihata/home?authuser=0

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	高橋 哲 (Takahashi Satoru) (30283724)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	門屋 祥太郎 (Kadoya Shotaro) (60880234)	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教 (12601)	

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