

光ファイバー探針によるレーザービーム断面強度分布の測定

高柳 淳夫・厚美 憲作・梅田 倫弘

東京農工大学工学部機械システム工学科 〒184 小金井市中町 2-24-16

Optical Beam Profile Measurement Using Optical Fiber Tip

Atsuo TAKAYANAGI, Kensaku ATSUMI and Norihiro UMEDA

Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16, Nakachou, Koganei 184

An optical fiber tip developed for a near field optical microscope is utilized for an optical beam profiler. The apex of the optical fiber tip is three dimensionally scanned in a measured beam and the scattered light picked up by the fiber is detected at the other end of fiber. It is shown that metal coating on the fiber tip is effective for improving spatial resolution. Also, it is found that there is a preferable thickness of coating in order to maintain the detected signal intensity. Finally, the non-gaussian beam profile is measured by our proposed method.

1. はじめに

レーザー光束の断面強度分布の測定は、レーザー光の評価項目のなかでも重要事項のひとつである。例えば、レーザーの横モード特性や集束レンズの取差、あるいはレーザー顕微鏡の横分解能を評価するために行われている。これまでに次のような方法が使われている。

- (1) スリット（ピンホール）走査¹⁾
- (2) ナイフェッジ法²⁾
- (3) 回転ワイヤ法^{1,2)}
- (4) 撮像デバイス

(1)の方法の測定分解能は、スリットやピンホールの大きさに依存している。高分解能測定を実現するにはスリット幅やピンホール径を小さくする必要があるため、検出信号のSN比の低下をもたらす。(2)、(3)の方法は微分法であるため、実際の形状を求めるためには、走査変位に対して積分する必要がある。精度に限界がある。また、特殊な強度分布は計測できない。(4)の方法は測定分解能が素子の1画素のサイズに限定されるため、高分解能測定は期待できない。

そこで最近、走査型近接場光学顕微鏡 (scanning near field optical microscope: SNOM)³⁾ やフォトン走査型トンネル顕微鏡 (photon scanning tunneling microscope: PSTM)⁴⁾ に使われている光ファイバー探針を、ビーム断面強度分布測定のためのプローブとして

使用することを考案した。光ファイバー探針はその先端開口の大きさが近接場顕微鏡の横分解能を決定する重要な要素となっている。光ファイバー探針の製作法にも依存するが、報告されている先端曲率は $0.1\ \mu\text{m}$ 以下であるため、ビーム断面強度分布において高分解能測定が期待できる。

一方、先端をテーパ状にした光ファイバーを検出開口とする光断面強度分布が報告されている⁵⁾。しかしテーパ光ファイバーの金属コーティングの効果、あるいは測定分解能等の検出特性については明らかにされていない。本報告では、光ファイバー探針をプローブとするビーム断面強度分布の測定法について実験装置および種々の実験結果を報告し、その有効性を示す。

2. 原理と実験装置

2.1 原理

光ビームの断面強度分布を点計測によって測定する場合、観測視野を制限する手法が重要な技術になる。従来はピンホールやスリット等の遮光方法によって行っている。これに対し、本研究では光ファイバー先端を先鋭化させた光ファイバー探針を用いているのが特徴である。

光ファイバー探針は、前述のようにSNOMやPSTMの誘電体プローブとして使われている重要な素子で、この先端曲率半径が顕微装置の横分解能を決定す

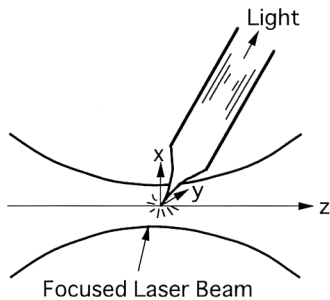


Fig. 1. Schematic drawing of measurement principle for beam profiling.

る。波長以下の大きさの先端曲率をもつ光ファイバー探針をエバネッセント波が存在する場に挿入すると、エバネッセント波によって照明された試料表面においてファイバー探針の先端曲率と同程度の大きさの表面構造とが結合して効率よく光を導波させ、他端に出射する。あるいは、試料表面近傍に存在するエバネッセント波をファイバー探針先端の微小散乱球によって散乱させ、その散乱光の一部が導波してファイバー他端に出射するとも考えてよい。

同じような状況は遠視野領域においても生じる。例えば、Fig. 1のようにレンズによる集光領域に波長程度の曲率半径をもつファイバー探針を挿入する。これによってファイバー探針の先端は微小散乱球として作用し、散乱光の一部がファイバー内を導波して散乱場の光強度に比例した光が他端に出射する。したがって、微小散乱球すなわちファイバー探針先端をレーザー光が集束する空間内で走査させながらファイバー出射端からの光強度を記録すれば、レーザー光束の断面強度分布が得られる。一般にファイバー探針の先端曲率半径を $0.5 \mu\text{m}$ 以下にすることは十分可能であるから、波長程度の位置分解能が得られることが期待される。また、従来のスリット法やピンホール法に比べ、検出部がファイバー端であるため、検出部の取扱いが容易で、任意のレーザー光束の位置に検出部をセットできる自由度をもっているのが特徴である。

2.2 実験装置

Fig. 2 に実験装置の概要を示す。この中で検出の位置分解能を決める重要な素子が光ファイバー探針である。前述した SNOM や PSTM に用いられるプローブの主な材料は、細径ガラス管と光ファイバーである。前者の場合、熔融延伸して先端開口径を 100 nm 程度にする方法が使われる⁶⁾。一方、後者の場合には化学エッチング

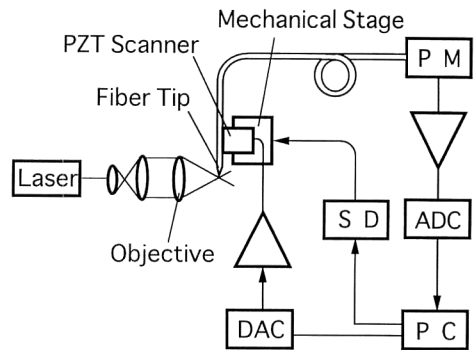


Fig. 2. Experimental apparatus of beam profiler using optical fiber tip. PM: photomultiplier, ADC: analogue to digital converter, DAC: digital to analogue converter, SD: mechanical stage driver, PC: personal computer.

法⁷⁾や熔融延伸法⁸⁾がある。化学エッチングによる探針は、先端円錐部と台座部の距離が $100 \mu\text{m}$ 以下と短いため、台座部における反射による影響を受けやすい。そこで、本実験では円錐部を長くできる熔融延伸法を用いた。具体的には、コア径 $10 \mu\text{m}$ の単一モード石英光ファイバーをガスバーナーで加熱熔融させて、自重で変形する前に一定速度で延伸する。この際、十分な加熱と一定の引張速度が、先端を鋭くかつ曲がらせずにテーパ状に形成させることである。熔融延伸だけのファイバー先端はほぼ 500 nm 以下に再現よく加工できるが、最終的には引張力によって切断されるためその先端部は破断面となり、方向性のある散乱体となっている可能性が高い。そこで、 $\text{NH}_4\text{F}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=10:1:1$ の組成のバッファーフッ酸に 10 分程度先端部を浸漬させて化学エッチングを行うことによって、先端部に丸みを与えると同時にさらに先端曲率を小さくさせることにした。このようにして製作した光ファイバー探針先端部の SEM 写真を Fig. 3 に示す。曲率半径が 300 nm 以下の光ファイバー探針が得られているのがわかる。

Fig. 2 において、光ファイバー探針によって検出された光は光ファイバー内を導波し、出射端からの光は、光電子増倍管 PM で光电変換されて AD 変換器を通してコンピューターに取り込まれる。また、光ファイバー探針は、最大変位 $10 \mu\text{m}$ の積層ピエゾ圧電素子 (PZT) を 3 軸直交に組み合わせたトライポッドスキャナーの 3 軸の交点に固定される。3 軸の PZT の変位は DA 変換器を通してコンピューターで制御される。トライポッドスキャナーに使われている PZT にはよく知られているように印加電圧に対する変位にヒステリシスがある。使

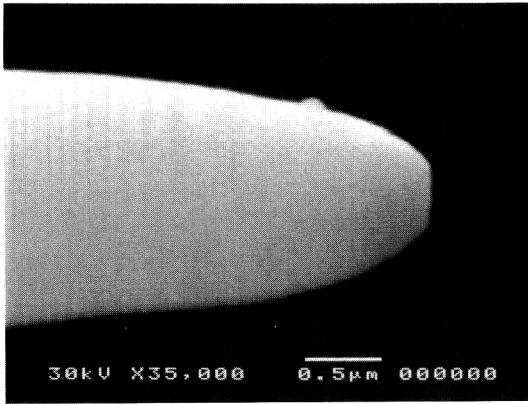


Fig. 3. SEM micrograph of apex of optical fiber tip used in experiment.

用したPZTでは100Vの印加電圧変化に対し、最大 $0.6\mu\text{m}$ のヒステリシス誤差が実測されているため、光ファイバー探針の最大位置決め誤差は $0.3\mu\text{m}$ となる。一方、このトライポッドスキャナーは、 $1\mu\text{m}$ ステップで移動可能な3軸ステージに設置され、粗動位置決めに使われる。

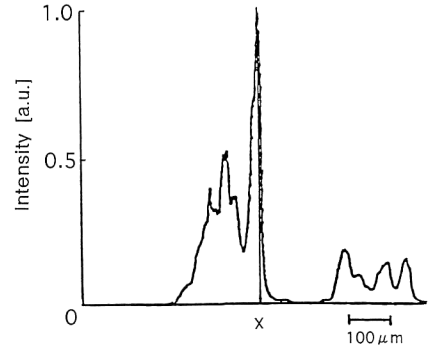
3. 実験結果

3.1 基礎特性

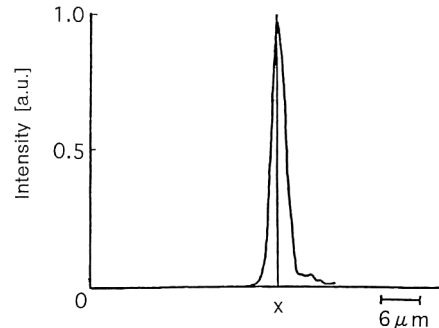
Fig. 2の装置構成を用いて633nm He-Neレーザーの平行ビームを10倍の対物レンズで集光させたときの集光点におけるビーム断面強度分布の測定を試みた。この際、測定座標系は、Fig. 1に示すように光軸方向を z 座標、それに直交する方向を x, y 座標とした。

Fig. 4は光ファイバー探針先端に金薄膜コートをした場合とコートした場合における測定分布形状の一例である。光ファイバー探針の光軸と集束レーザービームの光軸がなす角度は 90° である。これからコーティングされていない材料では光ファイバー探針の先端部以外のテーパ部の側面からも光が入射して $100\mu\text{m}$ 以上のビーム断面形状となっており、しかもガウス分布とならず不規則な分布となっていることがわかる。これに対し、金薄膜を探針側面にコーティングすることによって半値全幅(FWHM)が $3\mu\text{m}$ 程度のガウス形状に近い分布となっていることがわかる。

さらに、ファイバー探針の光軸とレーザー光束のなす角が 90° で、 $y=0$ における x 座標を変えたとき得られる測定ビーム形状のFWHMを、 z 位置に対して測定した。なお、 z 軸の原点は対物レンズの焦点に設定してある。金薄膜をコーティングした場合とコーティングしな



(a)



(b)

Fig. 4. Beam profiles of focused He-Ne laser beam using uncoated fiber tip(a) and coated fiber tip(b).

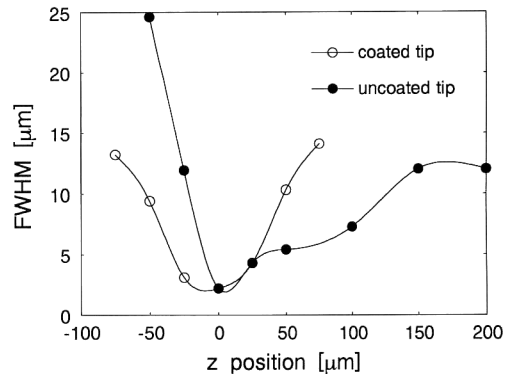


Fig. 5. FWHM values of focused beam vs. z position with uncoated and coated fiber tip.

い場合におけるファイバー探針による測定結果をFig. 5に示す。金薄膜がコーティングされていない探針による測定結果においては、FWHM値が z 座標の原点に対して非対称な変化を示している。これは、対物レンズによる集束光の光強度分布から考えられない特性であり、プ

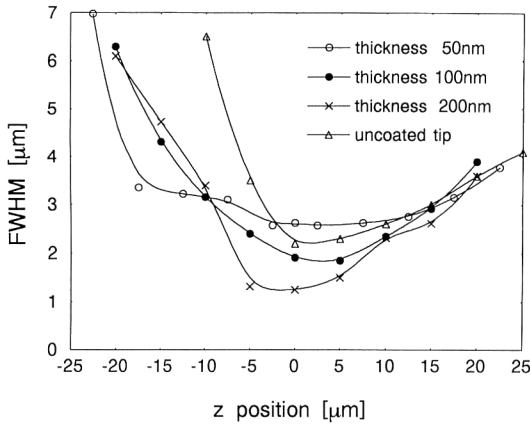


Fig. 6. FWHM values of focused beam vs. z position as a parameter of coating thickness.

ローブ先端部以外の円錐部側面からの入射光による影響であると考えられる。これに対し、金薄膜がコートされた探針では、 z 座標の原点の前後で対称的な振舞いを示していることがわかる。これから、光ファイバー探針への金薄膜コーティングは、測定位置分解能を向上させるうえで必要不可欠であることがわかる。

そこで、探針の金薄膜の最適な膜厚を調べるために、膜厚をパラメータとして焦点を中心に z 軸方向に $\pm 20 \mu\text{m}$ の位置におけるビーム断面形状の FWHM 値を測定した。その結果を Fig. 6 に示す。各膜厚において $z=0$ で極小値が得られており、さらに膜厚 200 nm で FWHM 値が $1.2 \mu\text{m}$ と最小であることがわかる。すなわち、膜厚をより厚くすることによって探針先端近傍で露出されるファイバー探針面積が最小になり、その結果、光の散乱に寄与する先端球の直径が小さくなっているため、より測定位置分解能が向上したことがわかる。しかし、さらに膜厚を厚くすると検出光量が減少し、測定系の SN 比の低下を招き、測定精度を劣化させると考えられる。

前節で述べたように、探針の膜厚を 200 nm とすることで、検出信号の SN 比の低下を最小限にとどめ、かつ、検出位置分解能が最大になることがわかった。そこで、200 nm の金薄膜をコーティングした探針を用いて、探針の軸と入射ビーム光軸とのなす角度を変えたときの z 座標に対する FWHM 値を測定した。その結果を Fig. 7 に示す。また、スリット法による FWHM 値の測定結果も併せて示す。これから正の z 方向位置での測定結果は、前述したように PZT トライボッドスキャナーの位置決め誤差の範囲内で入射角に依存していないことが

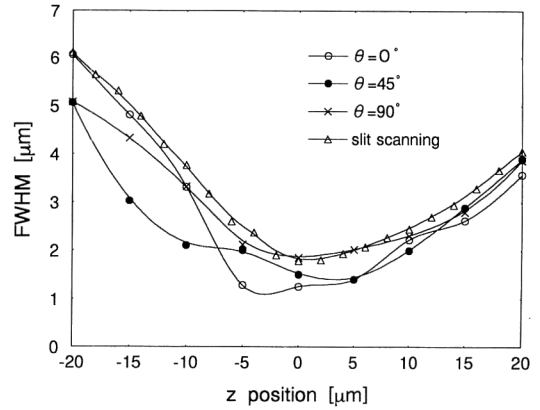


Fig. 7. FWHM values of focused beam vs. z position as a parameter of setting angle of fiber tip axis. The result measured by slit scanning method is also shown.

わかる。これに対し、負の z 方向位置、すなわち焦点位置より対物レンズ位置に近いところでは $\theta=45^\circ$ での測定結果が $\theta=90^\circ$ に比べて $1\sim 2 \mu\text{m}$ だけ差がある。これは使用した光ファイバー探針の先端が非対称な構造になっていたこと、あるいは対物レンズでの多重反射による干渉効果の影響の可能性が考えられる。また、スリット走査法による測定結果と比較した場合、ほぼ同等かそれよりも 10% 程度小さな FWHM 値が計測されていることがわかる。これは、スリット走査法において使用したスリットが $2 \mu\text{m}$ であったため、実際の FWHM 値よりも大きな測定値となったことが考えられる。これに対し、光ファイバー探針法では探針先端の曲率半径程度の検出開口径であるため、より精度の高い測定値が得られたと考えられる。

以上より、 z 座標に対し FWHM 値がほぼ θ に依存しないことから、探針先端が測定レーザー光束を散乱させる微小球として作用していると解釈できる。これは先端曲率が $0.5 \mu\text{m}$ 以下である光ファイバー探針法の方がスリット法に比べ高い位置分解能が得られている Fig. 7 の測定結果によって裏付けられる。

3.2 円環開口集束ビームの測定

本方法による特殊なビーム断面形状の計測への有効性を確認するため、円環開口を通過した光束の集束ビームの断面強度分布を測定した。

測定に用いた円環開口は、外半径が 5 mm、内半径が 4 mm で、集束レンズは $\text{NA}=0.4$ の 20 倍の対物レンズを用いた。200 nm 厚の金薄膜をコーティングした光ファイバー探針を、 $\theta=0^\circ$ に設定して測定した結果を Fig.

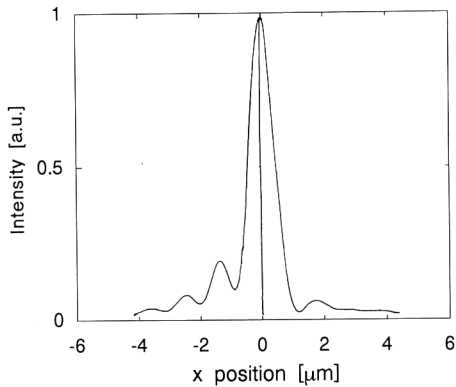


Fig. 8. Beam profile of focused beam through annular aperture.

8に示す。これからFWHM値は $0.96\ \mu\text{m}$ と、円開口に比べ、20%だけ減少していることがわかる。また、第2主極大の位置は 1.45 および $1.80\ \mu\text{m}$ で、かつその大きさは主極大に比べ 0.135 , 0.44 と非対称であることがわかる。この非対称性は入射波面の平行性や使用した円環開口の点対称性に問題があったこと、および、開口中心とレーザー光束、および対物レンズの光軸が完全に一致していなかった可能性が考えられる。

4. ま と め

SNOMやPSTMなどの近接場顕微鏡に使われている光ファイバー探針を用いて光ビームの断面強度分布を測定することを試みた。その結果、光ファイバー探針に金属薄膜コーティングをすることで測定精度が向上すること、測定光束の光軸と探針の角度依存性は少ないこと

がわかった。また、従来の測定法のひとつであるスリット法と比較して測定精度が向上していること、および非ガウス分布の断面強度分布をもつ光束に対しても有効であることがわかった。

本方法の特徴として以下の点が挙げられる。(1)スリット法より高分解能でかつSN比も低下しない。(2)任意の断面強度分布の光束を測定できる。(3)検出部を任意の位置に設定しやすい。

文 献

- 1) J. M. Fleischer and C. B. Hitz: "Gaussian beam profiling: how and why," *Lasers Optonics*, **6** (1987) 61-64.
- 2) G. C. Lim and W. M. Steen: "Measurement of the temporal and spatial power distribution of a high-power CO_2 laser beam," *Opt. Laser Technol.*, **14** (1982) 149-153.
- 3) E. Betzig, A. Lewis and M. Isaacson: "Near-field diffraction by a slit: implications for superresolution microscopy," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 1890-1900.
- 4) D. Courjon, K. Sarayedine and M. Spajer: "Scanning tunneling optical microscopy," *Opt. Commun.*, **71** (1989) 23-28.
- 5) M. Iiyama, T. Kamiya and H. Yanail: "Optical field mapping using single-mode optical fibers," *Appl. Opt.*, **17** (1978) 1965-1971.
- 6) E. Betzig, M. Isaacson and A. Lewis: "Collection mode near-field scanning optical microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, **51** (1987) 2088-2090.
- 7) T. Pangribuan, K. Yamada, S. Jang, H. Ohsawa and M. Ohtsu: "Reproducible fabrication technique of nanometric tip diameter fiber probe for photon scanning tunneling microscope," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) L1302-L1304.
- 8) G. A. Valaskovic, M. Holton and G. H. Morrison: "Parameter control, characterization, and optimization in the fabrication of optical fiber near-field probes," *Appl. Opt.*, **34** (1995) 1215-1228.