

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560413

研究課題名（和文）光ミリ波技術と二光子吸収現象の融合によるナノ変位計測

研究課題名（英文）Nano-scale displacement measurement by fusing optical millimeter wave technology and two-photon absorption phenomenon

研究代表者

田中 洋介（TANAKA YOSUKE）

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20283343

研究成果の概要（和文）：ナノ材料作製やバイオ技術などでは、試料の厚さや表面粗さをナノ精度で測定する必要がある。この場合、一般に測定範囲は、数  $\mu\text{m}$  以内に限られる。本研究では、光ミリ波と呼ばれる光源、並びに、非線形現象の一種である二光子吸収応答を利用する手法を提案し、数  $\text{mm}$  以上の広い測定範囲にわたり、ナノ精度計測が可能であることを実験により示した。更に、この技術を発展させ、数  $10\text{km}$  遠方の光ファイバ反射点を数  $\text{m}$  の誤差で計測可能なシステムを作製した。

研究成果の概要（英文）：Nano-precision measurement is required for measuring sample thickness and surface roughness in the field of nano-material production process, bio technology and others, where the measurement range is usually limited to within several  $\mu\text{m}$ . In this study, we proposed a novel measurement method that uses a light called optical millimeter wave and a nonlinear phenomenon known as two-photon absorption process, and then experimentally confirmed the possibility of nano-precision measurement. Furthermore, we developed the same method into a system for measuring the reflection point of an optical fiber at several  $10\text{ km}$  away within an error of several meters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：二光子吸収、光ミリ波、変位計測

## 1. 研究開始当初の背景

ナノ精度の計測は、一般に測定範囲が数  $\mu\text{m}$  程度に限られている。もし、より広い範囲での測定が可能になれば、バイオ分野、ナノ

加工分野をはじめ、様々な分野での応用範囲拡大が期待できる。

研究代表者らは、測定範囲が通常の干渉計よりも広がる手法として、受光素子の二光

子吸収応答を利用した距離計測について、基礎検討を行ってきた。しかし、ナノ精度の計測を数 mm の測定範囲で行なうことは、未開拓の領域であった。

検討の結果、光源に光ミリ波を用いることができれば、数 mm の測定範囲でもナノ精度計測が可能なことを着想するに至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、数 mm の測定範囲に対し、ナノ精度の変位計測を実現するため、光源の二光子吸収応答と光ミリ波光源を利用した計測手法を検討することを目的とした。

目的達成に向けて、まず、100GHz を超える広い周波数範囲を高速掃引する光ミリ波掃引器の実現を目標とした。そのために、2 台のレーザ光のビートを利用した光ミリ波光源を検討することとした。最終的に、数 mm のレンジに対し、ナノ精度の距離測定を実現するシステムの構築と評価までを目標とした。

## 3. 研究の方法

図 1 の実験系により、提案手法の原理確認を行った。2 台の波長可変 LD からの出射光をそれぞれ偏波コントローラに通し、直線偏光とし、偏波保持 (PM) ファイバカップラで合波して、光ミリ波を得る。この光ミリ波を偏光子に通した後、偏波軸の軸ずれ角度が  $45^\circ$  の偏光ビームスプリッタ (PBS) に入力する。PBS で直交する偏波に分けられた光ミリ波は、それぞれ信号光、参照光として異なる光路長の PM ファイバを伝搬する。信号光路には、PM ファイバ入出力の可変遅延線が挿入されており、光路長差を調整できる。2 つの光ミリ波は、もう一台の PBS により偏波状態が直交したまま、互いに干渉することなく合波される。合波された光ミリ波は、Er 添加ファイバ増幅器 (EDFA) で増幅され、レンズにより Si-APD へ集光される。Si-APD から出力される二光子電流をピコアンメータで計測し、PC でデータ処理を行う。

光源側では、2 台の波長可変 LD のうち、1 台の周波数を掃引し、もう 1 台の LD の周波数は一定とした。このとき、Si-APD で検出された二光子電流は、図 2 のように、

周波数掃引と共に、正弦波状に変化する。この変化の周期の逆数から、距離差がわかる。具体的には、得られたデータをフーリエ変換し、スペクトルのピーク点から距離差を求める。最適な測定条件を検討し、本手法における測定精度の評価を進めた。

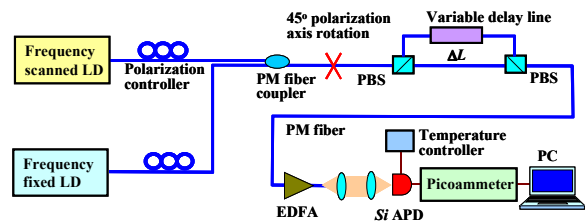


図 1 光ミリ波と受光素子の二光子吸収応答を用いた距離変位計測の原理確認

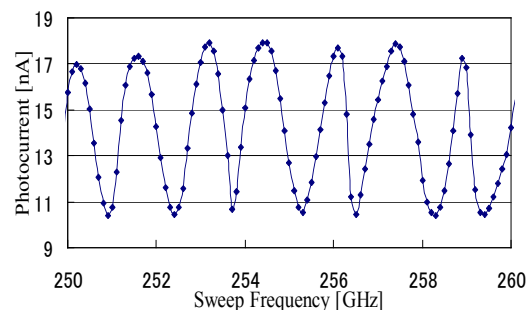


図 2 受光素子で検出される二光子電流

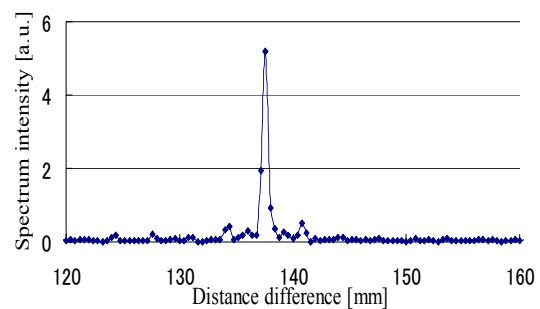


図 3 二光子電流データのフーリエ変換により得られる反射点の一例

本研究は、本来非常に微小な変位測定のために開始した。しかし、研究を進めるにつれ、測定レンジと測定誤差の比を保持したまま、非常に長距離の計測にも応用できることに思い至った。

そこで、30 km の光ファイバの反射点を図 4 の実験系で測定し、長距離反射点検出への応用を検討した。この系では、光ミリ波に代り、新たにロックイン検出を導入した。

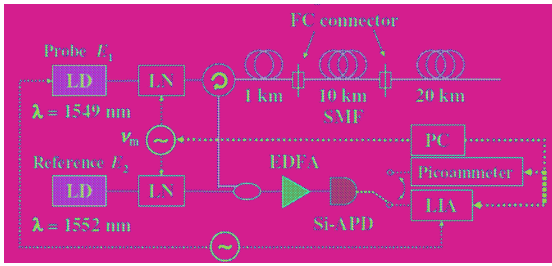


図4 受光素子の二光子吸収電流とロックイン検出を利用した長距離反射点計測

#### 4. 研究成果

本研究では、安定な光ミリ波の生成が、高い測定精度を得る上での重要な鍵となった。光ミリ波周波数掃引の安定性は、図1の周波数可変レーザの周波数掃引の安定性によって決まる。我々は、レーザの周波数を変化させる際、制御信号を急激に変化させると、その瞬間、レーザの発振周波数が大きく変動し、そのことが測定精度の劣化につながることを見いだした。そこで、発振周波数の掃引ステップを維持しつつ、周波数の切り替えを滑らかにこなす制御手法を考案し、計測に適用した。その結果、考案した制御手法を適用することで、測定精度が一桁向上し、繰返し精度  $2 \times 10^{-4}$  を達成した。図5のように、7mmの測定距離に対し  $1 \mu\text{m}$  以内の再現性を達成しており、これは実験環境での揺らぎを考慮すると非常に良好な値である(図5)。更に、変位測定においても、線形な特性が確認され、繰返し精度  $5 \times 10^{-4}$  を達成した。更なる精度の向上には、レーザの絶対周波数の安定化が必要になるものの、現時点で 10mm 以上の測定レンジと  $10^{-4}$  の繰返し精度は、従来の多くの計測手法を上回る性能といえる。

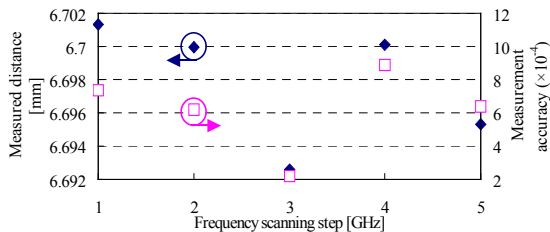


図5 繰返し測定精度の評価結果

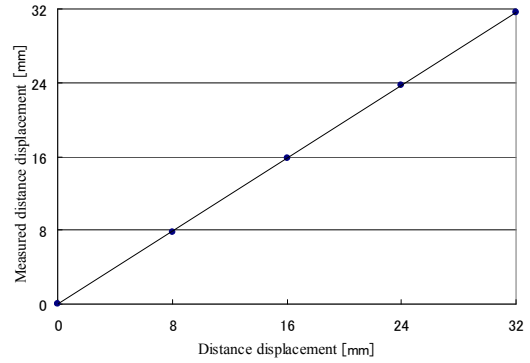


図6 変位測定の結果

続いて、図7に、二光子吸収による距離変位計測を非常に長距離の光ファイバ反射点計測に応用した結果を示す。今回、新たにロックイン検波技術を導入したことにより、10 km および 30 km 遠方の反射点が明瞭に観測された(図7 (a))。ロックイン検波を用いない従来手法(図7 (b))と比較して、格段のノイズレベル低減が実現していることがわかる。このような計測は、今後、光ファイバ通信網における破断点位置の正確な特定などへの応用が大いに期待される。

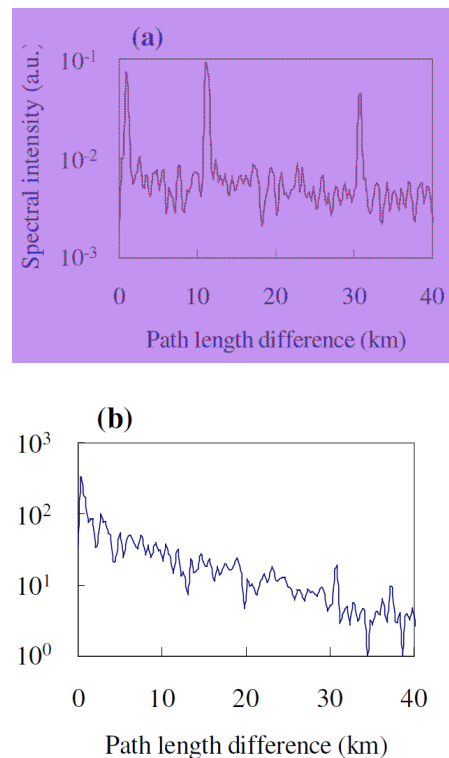


図7 受光素子の二光子吸収による長距離反射点計測 (a) ロックイン検出の導入、(b) 従来法

## 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] Y. Tanaka, D. Meguro, N. Endo, T. Kurokawa, “Distance displacement measurement with two-photon absorption process in Si-APD and high-speed optical millimeter wave scanner,” Proc. SPIE vol. 7753, no. 7753-349, 2011.  
DOI:10.1117/12.885969 (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

[1] Y. Kudo, D. Suzuki, K. Kashiwagi, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, “Distance measurement over 30 km using highly sensitive two-photon detection,” CLEO-PR&OECC/PS 2013, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 2013. 7. 2. (発表確定)

[2] 工藤、鈴木、柏木、田中、黒川、「Si 受光素子の二光子吸収を利用した距離変位計測のダイナミックレンジ拡大」第 60 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、2013 年 3 月 27 日。

[3] 鈴木、齊藤、遠藤、田中、黒川、「受光素子の二光子吸収を用いた 10 mm レンジでの高精度距離計測」電子情報通信学会東京支部学生会、東海大高輪キャンパス、2012 年 3 月 3 日。

[4] 鈴木、遠藤、目黒、田中、黒川、「光ミリ波掃引光源と Si-APD の二光子吸収応答を利用した距離変位計測」光波センシング技術研究会 LST47-24, 東京理科大学 神楽坂キャンパス 森戸記念館、2011 年 6 月 15 日。

[5] 鈴木、遠藤、目黒、柏木、田中、黒川、「Si-APD の二光子吸収応答と光ミリ波による距離変位計測-位相変調によるキャリア光干渉雑音の抑圧-」電子情報通信学会東京支部第 16 回学生会研究発表会、東京電機大学神田キャンパス 7 号館、2011 年 3 月 12 日。

[6] 目黒、遠藤、田中、黒川、「Si-APD の二光子吸収過程と高速光ミリ波掃引器による距離変位計測」光波センシング技術研究会 LST-46, 東京理科大学 神楽坂キャンパス

森戸記念、2010 年 12 月 7 日。

[7] D. Meguro, Y. Tanaka, T. Kurokawa, “High speed optical millimeter wave sweeper and its application to distance displacement measurement,” 16th Microoptic Conference (MOC’ 10), Hsinchu, Taiwan, 2010. 11. 2.

[8] N. Endo, Y. Tanaka, T. Kurokawa, “Distance displacement measurement for short distance using two photon absorption in Si-APD and wide scanning range optical millimeter wave sweeper,” 16th Microoptic Conference (MOC’ 10), Hsinchu, Taiwan, 2010. 11. 2.

[9] 目黒、遠藤、田中、黒川、「受光素子の二光子吸収を用いた距離変位計測のための高速光ミリ波掃引器」、光応用計測の最前線 (第 61 回東工大精研シンポジウム) 東工大 蔵前会館、2010 年 7 月 22 日。

[10] D. Meguro, K. Kashiwagi, Y. Tanaka, T. Kurokawa, “High speed optical millimeter sweeper using laser diode with direct current modulation and MZ interferometer,” 7th International Conference on Optics-photonics design & fabrication (ODF ’10), PACIFICO (YOKOHAMA), 2010. 4. 21.

[11] N. Endo, Y. Tanaka, T. Kurokawa, “Improvement in accuracy and speed on distance displacement measurement based on two-photon absorption of Si-APD,” 7th International Conference on Optics-photonics design & fabrication (ODF ’10), PACIFICO (YOKOHAMA), 2010. 4. 20.

[その他]

研究代表者プロフィール

<http://kenkyu-web.tuat.ac.jp/Profiles/7/0000627/profile.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 洋介 (TANAKA YOSUKE)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：20283343

(2) 研究分担者

黒川 隆志 (KUROKAWA TAKASHI)  
東京農工大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：40302913

(3) 連携研究者

なし