

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630170

研究課題名(和文)光非線形ヘテロダイン検波による超高性能分光技術

研究課題名(英文)Ultra-high performance spectroscopy based on nonlinear optical heterodyne detection

研究代表者

田中 洋介(TANAKA, YOSUKE)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20283343

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、受光素子の非線形応答を利用した『光非線形ヘテロダイン検波』の提案と原理確認、分光技術への応用を目的として行った。提案手法は、広帯域、偏波無依存、高分解能な分光が期待できる。実際に作製した検波装置は、1mW以下の入射光パワーに対しても、非線形効果による出力を高感度検出できた。この検波装置で、サンプルの透過光スペクトルを測定し、原理確認を行った。更に、提案手法の距離計測への応用を着想し、50km以上のファイバからの反射点検出や、僅かな距離変位を測定した。これらの技術は、サンプルの屈折率変化、濃度変化等の測定に応用できる。本研究により、提案手法の有効性が確認された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have proposed and confirmed the principle of "nonlinear optical heterodyne detection" based on nonlinear output of a photodetector. We also have investigated its applications. The proposed method is expected to realize wide-band, polarization-independent, and high-resolution spectroscopy. We have confirmed the principle by sensitively detecting the spectra of a light transmitted from a sample. Furthermore, we have got an idea of applying the method to distance measurement. We have detected the reflection point at the end of 50-km optical fiber. We have also measured a small displacement with this method. These techniques are applicable to measurement of refractive index change and concentration change for a sample. In this study, we have successfully confirmed the effectiveness of the proposed method.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：二光子吸収 分光計測 距離計測

1. 研究開始当初の背景

物体に光を照射した際の透過光や反射光の周波数、強度等から、様々な物理量や化学量を観測する分光計測は、多くの科学技術分野で使用されている。身近な応用では、CO₂、NO_xをはじめ、様々な環境ガスの観測に利用できる。また、物体の化学組成のみならず、位置、速度など物理的挙動の解析にも応用可能である。

これまでの高精度な分光法には、ヘテロダイン検波を用いる方法が検討されている。しかし、一般にヘテロダイン法で数 100 GHz 以上の広帯域化は困難である。また、古くから利用されている回折格子を用いる分光法も、広帯域化と高分解能化の両立は難しい。しかし、計測範囲の広帯域化が実現すれば、物体の組成や、物理的挙動についてのより詳細な情報が得られる。そこで、本研究では、新たな分光測定法として、従来のヘテロダイン法を凌駕する広帯域性と高精度性を有する手法を新たに着想し、その有効性を検討することとした。

2. 研究の目的

本研究では、受光素子の非線形応答を利用した『光非線形ヘテロダイン検波』を提案した。これは、信号光と参照光の周波数差が THz オーダーであっても、信号光と参照光のパワー積に比例したヘテロダイン信号が得られる検波手法である。研究開始にあたり、以下を目標とした。

(1) 光非線形ヘテロダイン検波システムの実験系構築と基本特性の確認

(2) スペクトル計測への応用

更に、研究着手後、本検波手法の有効な応用として、

(3) 距離計測への応用

が可能なることに着目し、新たな目的として追加した。この距離や距離変位計測は、サンプルの濃度変化測定にも応用できる非常に重要な技術である。

3. 研究の方法

(1) 広帯域かつ高感度な光非線形ヘテロダイン検波系の構築と評価

光非線形ヘテロダイン検波を行うため、Si 受光素子の二光子吸収応答を利用することとした(図 1)。一般に、Si 受光素子は可視光にしか感度がなく、波長 1.5 μm の赤外光に対しては光電流を発生しない。しかし、単位面積あたりの照射パワーを高くすると、波長 1.5 μm の光に対し、入射パワーの二乗に比例した光電流が出力される。これが、Si 受光素子における二光子吸収応答である。この特性を利用すると、試料を反射/透過した光と、信号増幅用の局発光との光強度積の時間平均に比例した信号が、容易に得られる。通常の電界干渉を利用した場合、電界振幅の積に比例した出力を得られるが、これは時間平均をとると 0 になってしまう。但し、二光子吸収電

流は、数 10 nA と微弱なため、高感度な測定系が必要になる。本研究では、ロックインアンプを用いた実験系により、二光子吸収による二乗特性を明瞭に観測できるような検波系を構築し、評価を行った。

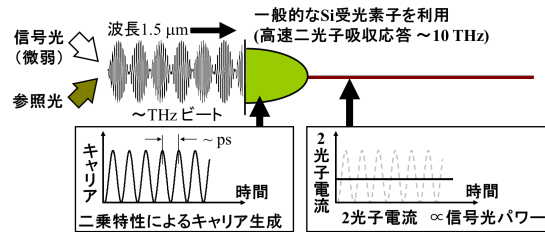


図 1 光非線形ヘテロダイン検波

(2) 分光計測への応用検討

サンプルへの入射光波長を広帯域にわたり掃引するとともに、光非線形ヘテロダイン検波出力を逐次記録する自動制御系の構築に取り組み、分光計測の基礎検討を進めた。既知の分光特性を有するサンプルとして、光通信システムに用いられる光ファイバ回折格子(FBG: Fiber Bragg Grating)の反射、透過特性を本提案手法により測定し、原理確認を行った。

(3) 距離計測への応用検討

周波数が数 100GHz 異なるプローブ光と局発光を用いてヘテロダイン検波を行う本手法が、分光計測のみならず、長距離光ファイバ中の反射点計測を含む広ダイナミックレンジなレーザ測距へ応用可能なことに思い至り、原理実証を行った。第一の手法は、光源に強度変調をかけると共に、変調周波数を掃引して得られる信号から、距離測定を行うもので、50 km 以上の長距離光ファイバにおける反射点までの距離を測定した。また、この手法とは別に、位相を特定の波形で変調する手法を着想した。この手法では、原理的に、システム構成要素を減らしつつ、高精度で測距が可能であり、そのことを実験により検証した。

4. 研究成果

はじめに、光非線形ヘテロダイン検波系の構築と、基礎特性の評価を行った。サンプルを挿入しない状態で、ロックインアンプによる同期検波を行うと共に、受光器である Si-アパランシェフォトダイオードの受光面に光を直径 10μm まで絞ることで、単位面積あたりの光パワーを大きくし、効率よく二光子吸収電流を検出できるようにした。

図 2 に入射光パワーに対する光電流出力を両対数グラフで示す。光パワーが一定値を超えると、グラフの傾きが 2 となる。これは、二光子吸収応答に特有な二乗特性である。今回作製した系では、入射光パワーが、わずか 0.5 mW から二乗特性が検出できており、効率よく二光子吸収電流の検出が可能なることがわかる。

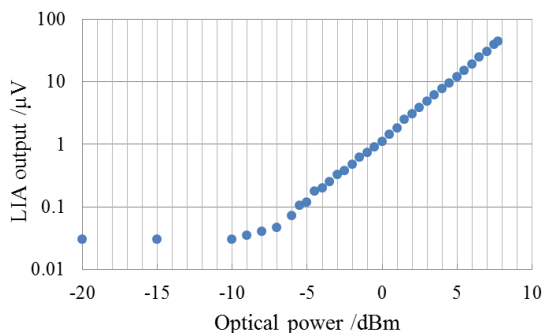


図2 Si-APDの二光子吸収応答特性

構築した計測システムを用いて、FBGの透過スペクトルを観測した。一例として、中心波長が1551nmのFBGのスペクトル観測結果を図3に示す。プローブ光の波長を1548.5から1553nmまで掃引して得られたスペクトルを示す。FBGの透過特性が正しく観測されており、分光計測応用の有効性が確認できた。

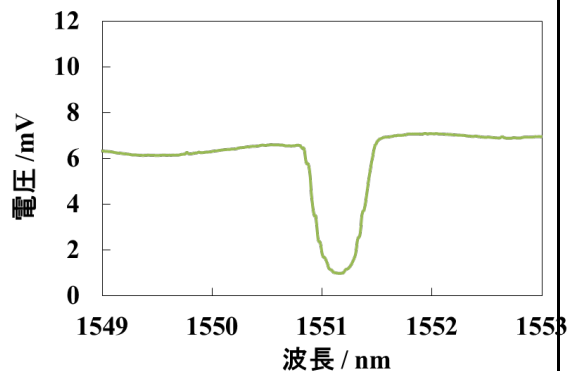


図3 FBG透過特性の測定結果

続いて、距離計測への応用として、図4の実験系を構築し、50 km以上の長距離ファイバからの反射点を計測した。図5に測定結果を示す。光ファイバ端(50 km)に相当する位置に大きなピークスペクトルがあり、端面反射が正確に計測できていることが分かる。更に、測定パラメータの調整により、光ファイバを機械的に不完全接続した20 mや1 km先からの信号も正確に検出できた(図6)。

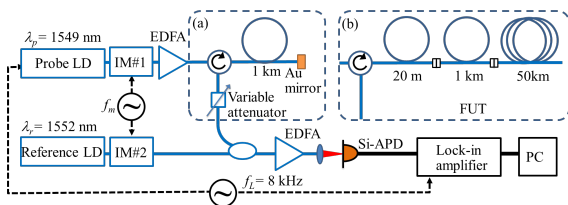


図4 光ファイバ反射点計測への応用

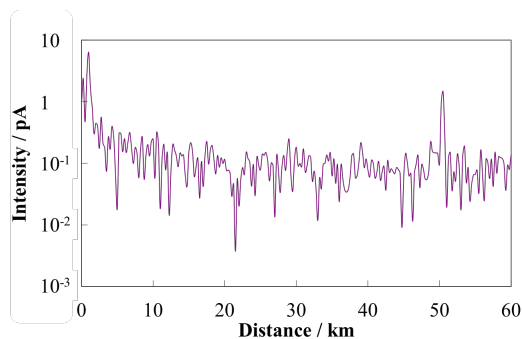
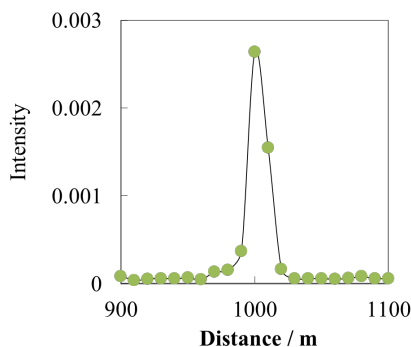
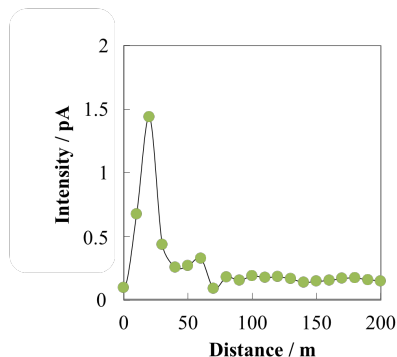


図5 ファイバ端(50 km)の反射点検出(I)



(a) 1 km 反射点からの信号



(b) 20 m 反射点からの信号

図6 光ファイバ反射点の検出(II)

このように、提案手法において、20 mの短距離から50 km以上までの長距離までの距離測定が実証された。尚、本成果は、英国物理学会(IOP)の学術雑誌 Measurement Science and Technology の精選論文(IOP select)となった。ところで、図4の系では、波長の異なる光源を2台使用している。これは、キャリア光干渉の影響を有効に避けるためである。本研究においては、図4の系とは別に、新たに、ノコギリ波状の波形による位相変調を参照光に加える系の検討を行った(図7)。

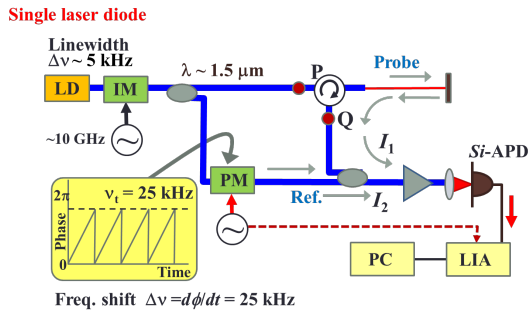


図7 単一光源とノコギリ波型位相変調を用いた距離計測

ノコギリ波の位相変調により、光の周波数がシフトするため、キャリア光干渉を回避できる。同時に、もとの光と周波数シフトした光とのビート信号(図8)をロックイン検出にも使用している。この手法により、2.7 m および 0.7 m の距離差の高精度測定に成功した(図9)。

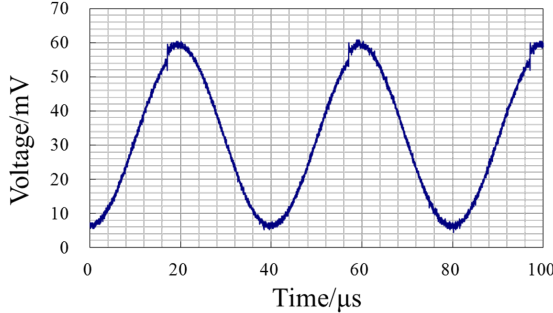
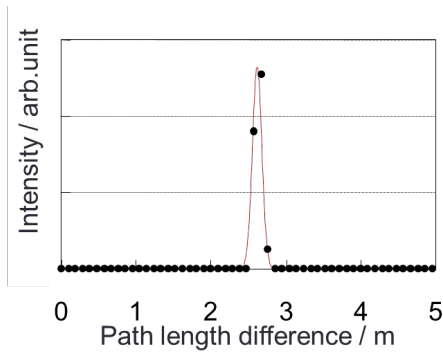
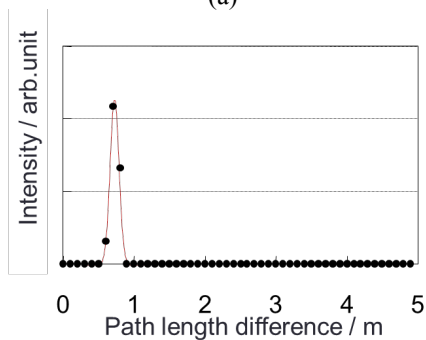


図9 ビート信号



(a)



(b)

図10 距離計測結果

更に、本システムでは周囲温度の変化による

光ファイバ長のわずかな変化も正確に測定できた。

以上の研究により、光非線形ヘテロダイン検波と、高精度距離計測を含む分光計測応用への有効性が検証された。数 100 GHz の光信号の強度相関を扱える本手法は、今後とも様々な高精度計測への応用が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Y. Tanaka, Y. Kudo, T. Hirasakura, and T. Kurokawa, "Wide range distance measurement over 50 km based on high-sensitive detection of two-photon absorption photocurrent from Si-APD," Measurement Science and Technology, Vol.26, 025205 (7pp), 2015. (doi: 10.1088/0957-0233/26/2/025205) (査読あり)

〔学会発表〕(計6件)

Y. Tanaka, Y. Yamada, and T. Kurokawa, "Distance Measurement Using Second Harmonic Signal Component of Two-Photon Absorption Photocurrent from Si-APD," CLEO 2015, San Jose, USA, SM2O.7, May 11, 2015.

Y. Tanaka, S. Tominaka, and T. Kurokawa, "Distance Measurement Using Serrodyne Modulation and Two-Photon Absorption Process in Si-APD," CLEO 2014, San Jose, USA, SM4E.7, June 9, 2014.

富中、田中、黒川、「セロダイン変調と Si-APD の二光子吸収応答を用いた距離計測」第 61 回応用物理学会春季学術講演会、17p-E4-2、青山学院大学相模原キャンパス、2014 年 3 月 17 日。

工藤、平櫻、田中、黒川、「Si-APD 二光子吸収応答を利用した広範囲距離測定」第 61 回応用物理学会春季学術講演会、17p-E4-3、青山学院大学相模原キャンパス、2014 年 3 月 17 日。

工藤、鈴木、田中、黒川、「Si-APD の二光子電流の高感度検出とその応用」、光波センシング技術研究会 LST52-19、東京理科大学神楽坂キャンパス 森戸記念館 pp.133-140、2013 年 12 月 4 日。

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, TuF4-6, July 2, 2013.

〔その他〕

ホームページ情報

http://www.rd.tuat.ac.jp/activities/fac_tors/search/20140401_55.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