

デュアルフォトキャリアテラヘルツコムを用いた テラヘルツ波のリアルタイム絶対周波数計測

安井 武史

近年、大容量無線通信をはじめとした各種応用のための連続発振テラヘルツ波（CW-THz 波）光源デバイスの研究開発が進み、その特性評価や周波数校正といった観点から、CW-THz 波のリアルタイム絶対周波数計測の必要性が高まっている。本稿では、周波数間隔のわずかに異なるデュアルフォトキャリア THz コ

ムを、目盛り間隔がわずかに異なる THz 周波数の物差しとして利用することにより、CW-THz 波の絶対周波数をリアルタイムで計測する手法を紹介する。

Keywords: THz comb, photocarrier, THz radiation, photoconductive antenna, photoconductive mixing, femtosecond laser

1. まえがき

近年のデータ通信量の急激な増大とともに、無線通信をさらに高速・大容量化するためのキャリア波としてテラヘルツ（THz）波（周波数 0.1~10 THz、波長 30~3000 μm ）が注目されている^{1,2)}。THz 無線通信のキーデバイスである連続発振 THz（CW-THz 光源（THz 量子カスケードレーザー³⁾、単一走行キャリアフォトダイオード⁴⁾、共鳴トンネルダイオード⁵⁾など）に関する最近の技術進歩が、THz 無線通信に関する研究を後押ししている。無線通信において、必要十分な帯域幅を確保しながら、ほかの無線応用（天文観測、アマチュア無線、レーダなど）との混信を避けるためには、各種応用が利用する周波数帯を厳密に割り当てる必要がある。0.275 THz 以下の無線周波数帯では各種応用ごとに周波数割り当てがきめ細かく決められているが、0.275 THz 以上の周波数帯についてははまだ周波数割り当てが行われていない⁶⁾。最近、THz 無線通信や THz センシングをはじめとした各種 THz 応用が具体化し始め、THz 帯の周波数割り当てに向けた動きが始まりつつある。このような周波数割り当ての実施にあたってキーとなるのは、利用する CW-THz 光源の絶対周波数を正確に計測する技術である。従来、研究室レベルでは、電氣的ヘテロダイン法⁷⁾や光学干渉法⁸⁾が絶対周波数計測に利用されてきたが、ミキサや検出器の熱ノイズを抑制するために、極低温環境で利用する必要があった。その結果、一般的な利用が大きく制限されてきた。

我々は、室温環境で CW-THz 波の絶対周波数計測を可能

にする手段として、THz 周波数コム（THz コム）を基準としたコヒーレント検出（光伝導ミキシング）を提案している^{9~11)}。THz コムは、多数の CW-THz 波が櫛の歯状に等間隔で立ち並んだ超離散マルチスペクトル構造を有しており、コム間隔（レーザー繰り返し周波数） f_{rep} をレーザー制御によって周波数標準に位相同期することにより、極めて正確な THz 周波数の物差しとして利用できる^{12,13)}。フェムト秒レーザー照射により、THz 検出用光伝導アンテナ（Photo Conductive Antenna: PCA）内部に光励起キャリア（フォトキャリア）の THz コム（PC-THz コム）を生成し、THz 帯をフルカバーする多周波の局部発振器（周波数= $f_{\text{rep}}, 2f_{\text{rep}}, \dots, mf_{\text{rep}}, \dots$ ）として、被測定 CW-THz 波（周波数= f_{THz} ）との光伝導ミキシングで生成したビート信号（周波数= f_{beat} ）を計測することにより、CW-THz 波の絶対周波数を高精度に決定できる（ $f_{\text{THz}} = mf_{\text{rep}} \pm f_{\text{beat}}$ ）。この絶対周波数決定にあたって、CW-THz 波に最隣接した PC-THz コムモード次数 m と f_{beat} の符号を決定する必要があるが、そのためには 2 つの異なる f_{rep} に対応した f_{beat} を計測する必要がある。これまでは、 f_{rep} が安定化された単独の PC-THz コムを用いていたため、 f_{rep} 変化前後の f_{beat} を計測するという時間的にシリアルな 2 ステップ計測を行う必要があった^{9,10)}。その結果、時々刻々と揺らいでいる CW-THz 波の絶対周波数を、リアルタイムで決定することは困難であった。

本稿では、 f_{rep} がわずかに異なる 2 つの PC-THz コム（デュアル PC-THz コム）を、目盛り間隔がわずかに異なる THz 周

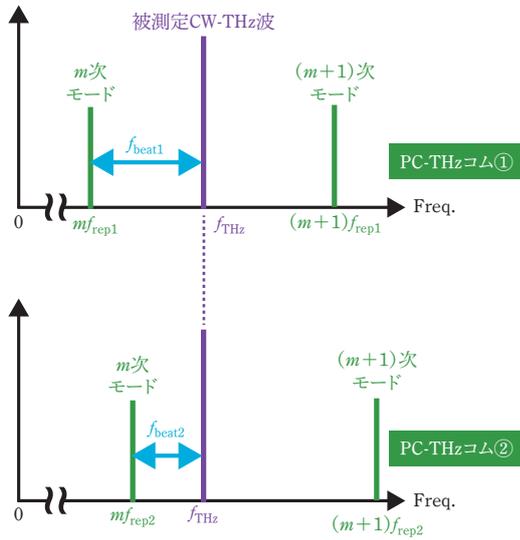


図1 測定原理.

波数の物差しとして利用することにより、CW-THz 波の絶対周波数をリアルタイムで計測する手法を紹介する¹¹⁾。PC-THz コムの常時等間隔性を利用すると、 f_{rep} 安定化は必ずしも必須でなくなり、 f_{rep} 制御を行っていないデュアル PC-THz コムでも、高精度周波数計測がリアルタイムで可能であることを示す。

2. 測定原理

デュアル PC-THz コムを用いた絶対周波数計測の原理を図1に示す。繰り返し周波数がわずかに異なる2台のフェムト秒レーザー (f_{rep1} , f_{rep2}) の出力光を、独立した2つの THz 検出用 PCA (PCA1, PCA2) にそれぞれ入射すると、コム間隔がわずかに異なる PC-THz コム① (周波数間隔 f_{rep1}) および PC-THz コム② (周波数間隔 f_{rep2}) が PCA 内部にそれぞれ誘起される。このような状況下で、被測定 CW-THz 波 (周波数 $=f_{\text{THz}}$) を PCA1 および PCA2 に入射すると、デュアル PC-THz コム (PC-THz コム①および PC-THz コム②) との光伝導

ミキシングにより、PCA1 および PCA2 から RF ビート電流信号が出力される。ここで、CW-THz 波とそれに最隣接した PC-THz コムモード (周波数 $=mf_{\text{rep1}}$, mf_{rep2}) のペアによって生成される最低周波数のビート周波数を f_{beat1} および f_{beat2} とすると、 f_{THz} は以下の式で表すことができる。

$$f_{\text{THz}} = mf_{\text{rep1}} \pm f_{\text{beat1}} = mf_{\text{rep2}} \pm f_{\text{beat2}} \quad (1)$$

周波数コム (モード同期パルス列) の性質上、PC-THz コムは常に等間隔性を維持しているため、 f_{rep1} と f_{rep2} が非制御のため時々刻々と揺らいでも、 f_{rep1} と f_{rep2} をモニタリングさえしていれば、PC-THz コムは THz 周波数の物差しとして利用できる。すなわち、レーザー安定化制御の有無にかかわらず、式(1)は瞬間瞬間において常に成立する。 f_{rep1} , f_{rep2} , f_{beat1} , f_{beat2} は RF 信号として直接計測が可能なので、 m の次数と f_{beat1} (または f_{beat2}) の符号を決定できれば、 f_{THz} を求めることが可能になる。式(1)から、 m は以下のように求めることができる。

$$m = \frac{|f_{\text{beat2}} - f_{\text{beat1}}|}{|f_{\text{rep2}} - f_{\text{rep1}}|} \quad (2)$$

また、 $(f_{\text{beat2}} - f_{\text{beat1}})/(f_{\text{rep2}} - f_{\text{rep1}})$ と f_{beat1} (または f_{beat2}) は、逆符号の関係にある。最終的に、 f_{THz} は、以下の式で求めることができる。

$$f_{\text{THz}} = mf_{\text{rep1}} + f_{\text{beat1}} = \frac{|f_{\text{beat2}} - f_{\text{beat1}}|}{|f_{\text{rep2}} - f_{\text{rep1}}|} f_{\text{rep1}} + f_{\text{beat1}}$$

$$\left(\frac{f_{\text{beat2}} - f_{\text{beat1}}}{f_{\text{rep2}} - f_{\text{rep1}}} < 0 \right)$$

$$f_{\text{THz}} = mf_{\text{rep1}} - f_{\text{beat1}} = \frac{|f_{\text{beat2}} - f_{\text{beat1}}|}{|f_{\text{rep2}} - f_{\text{rep1}}|} f_{\text{rep1}} - f_{\text{beat1}}$$

$$\left(\frac{f_{\text{beat2}} - f_{\text{beat1}}}{f_{\text{rep2}} - f_{\text{rep1}}} > 0 \right) \quad (3)$$

3. 実験装置

図2は実験装置を示している。デュアル PC-THz コムを生成するため、繰り返し周波数がわずかに異なるデュアルモード

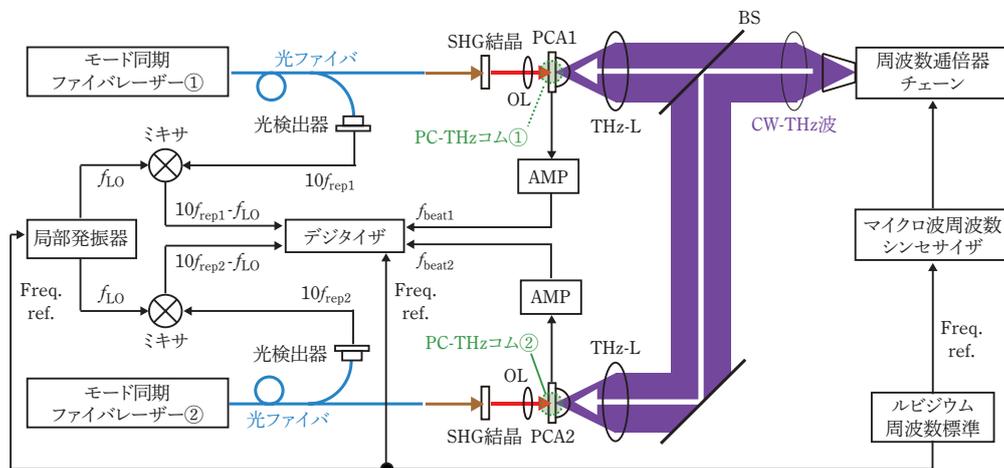


図2 実験装置. BS: ビームスプリッタ, OL: 対物レンズ, THz-L: THzレンズ, AMP: 電流/電圧変換アンプ.

同期ファイバレーザー（中心波長 1550 nm，パルス幅 50 fs， $f_{\text{rep1}} \approx 100,000,007$ Hz， $f_{\text{rep2}} \approx 100,000,217$ Hz）を用いる。 f_{rep1} および f_{rep2} は周波数安定化制御されておらず，共振器外乱（温度変化，振動など）により，時々刻々と揺らぐ。 f_{rep1} の周波数安定性は，ゲート時間（平均化時間）1 ms において 4.0×10^{-8} ，ゲート時間 10 ms において 1.8×10^{-9} ，ゲート時間 100 ms において 2.7×10^{-10} であった。デュアルファイバレーザーの出力光を，SHG（第 2 高調波発生）結晶で波長変換し，ボウタイ型低温成長ガリウムヒ素 PCA（PCA1，PCA2）に入射することにより， f_{rep1} および f_{rep2} のコム間隔を有するデュアル PC-THz コム（PC-THz コム①，PC-THz コム②）を PCA1 および PCA2 の内部にそれぞれ生成する。本実験では，これまでに報告されている 0.12 THz 帯無線通信¹⁴）に近い周波数の CW-THz テストソースとして，ルビジウム周波数標準に位相同期した周波数通倍器（周波数可変範囲 = 0.075 ~ 0.11 THz，線幅 < 0.6 Hz，平均パワー = 2.5 mW）を用いた。CW-THz 波を PCA1 および PCA2 に入射することにより，CW-THz 波と PC-THz コム①および PC-THz コム②のビート信号（周波数 = f_{beat1} および f_{beat2} ）が，PCA 電流信号として出力される。この電流信号の時間波形を，電流／電圧変換アンプ（周波数帯域 = 40 MHz，トランスインピーダンスゲイン = 100 kV/A）で増幅後，高速デジタイザ（分解能 14 ビット，サンプリング周波数 100 MHz）で取り込んだ。また，両レーザー光を高速光検出器で検出した後，電氣的ヘテロダイン処理により， f_{rep1} および f_{rep2} の 10 次高調波と局部発振器（周波数 = $f_{\text{LO}} = 980$ MHz）のビート信号波形（周波数 = $10f_{\text{rep1}} - f_{\text{LO}}$ および $10f_{\text{rep2}} - f_{\text{LO}} \approx 20$ MHz）をデジタイザで取り込んだ。デジタイザで取り込んだ時間波形から瞬時周波数算出アルゴリズム¹⁵）によって算出した f_{rep1} ， f_{rep2} ， f_{beat1} ， f_{beat2} の瞬時周波数を，式(3)に代入することにより， f_{THz} をリアルタイムで決定した。

4. 実験結果

まず，出力周波数を 100,001,004,000 Hz に設定した CW-THz テストソースに対して， f_{rep1} ， f_{rep2} ， f_{beat1} ， f_{beat2} を計測した。図 3(a) ~ (d) は，データ取り込み時間 5 ms における， f_{rep1} ， f_{rep2} ， f_{beat1} ， f_{beat2} の時間変化を表している。ここでは，サンプリングレート 100 MHz で取り込まれた時間波形に対して，瞬時周波数算出アルゴリズムを適用した後，連続した 10 点の瞬時周波数の平均値をプロットしている（実効計測レート 10 MHz）。これらの値を式(3)に導入することにより算出した f_{THz} を，図 3(e) に示す。データ取り込み時間 5 ms における f_{THz} は，100,001,003,974 ± 2840 Hz（平均値 ± 標準偏差）であった。 f_{THz} は，ルビジウム周波数標準を外部リファレンスとして用いることにより，100,001,004,000 ± 5 Hz の範囲内で安定化されている。したがって，図 3(e) の周波数揺らぎは，瞬時周波数算出アルゴリズムに起因する計測エラーである。設定平均値と実測平均値の差に対する設定平均値の比を測

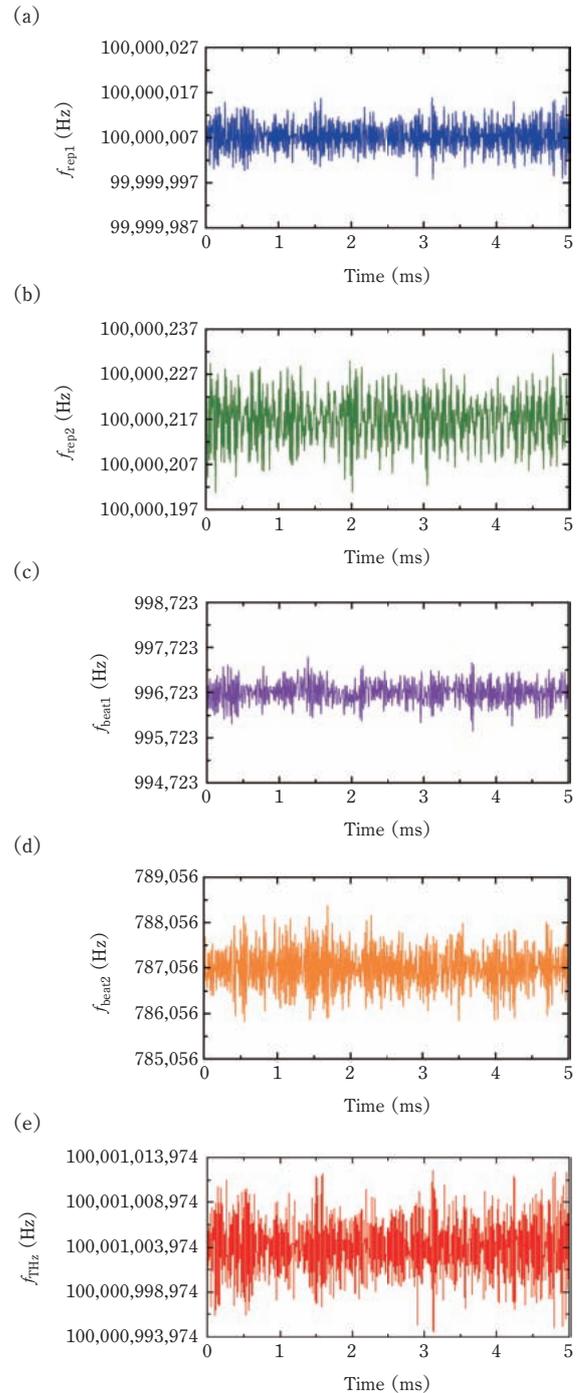


図 3 (a) f_{rep1} ，(b) f_{rep2} ，(c) f_{beat1} ，(d) f_{beat2} ，(e) f_{THz} の時間変化。データ取り込み時間 5 ms，計測レート 10 MHz。

定精度と定義すると， 2.6×10^{-10} となる。瞬時周波数算出アルゴリズムの計測エラーは，データ積算点数を増やすと軽減され，実効計測レート 100 Hz（データ平均点数 1,000,000）において周波数測定精度 4.0×10^{-11} が得られた。この周波数精度は， f_{rep1} および f_{rep2} の周波数安定性を大きく上回っている。また， f_{rep1} および f_{rep2} をルビジウム周波数標準に位相同期するよう周波数安定化制御を行った場合も同レベルの周波数測定精度 (8.2×10^{-12}) が得られた¹¹）。これらのことから，本手法は， f_{rep1} および f_{rep2} の周波数安定性には依存せず，周波数安定化制御も不要であるといえる。

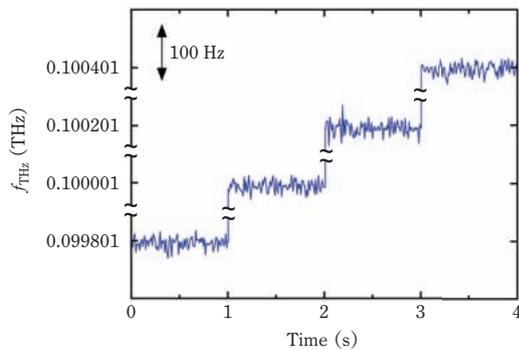


図4 階段状に周波数チューニングされたCW-THz波の実時間モニタリング。データ取り込み時間4s、計測レート100Hz。

次に、CW-THzテストソースの出力周波数を、99,801,000,000~100,401,000,000 Hzまで、200 MHzステップで階段状に4回変化させた場合の f_{THz} を計測した。実効計測レート100 Hzの場合の測定結果を図4に示す。この場合、CW-THz波は、ステップチューニングごとに、2本のPC-THzコムモードを横切ることになるが、エラーを起こすことなく、正確に周波数変化をモニタリングできていることがわかる。このように、コム間隔を横切るような不連続周波数変化に対する適用性は、フリーランニング状態あるいはモードホップを示す実用的なCW-THz光源の特性評価に有用であると考えられる。

5. むすび

周波数間隔の異なるデュアルPC-THzコムを、目盛り間隔がわずかに異なるTHz周波数の物差しとして利用することにより、CW-THz波のリアルタイム絶対周波数計測を実現した。PC-THzコムの常時等間隔性に着目して、 f_{rep1} , f_{rep2} , f_{beat1} , f_{beat2} を高速・高精度にパラレル計測すると、 f_{rep} 安定化制御を行わずとも、測定レート100 Hzで 10^{-11} の周波数測定精度が可能であることを示した。さらに、コムモードを横切るような大きな周波数変化に対しても対応可能であることから、各種CW-THz光源デバイスの研究開発の特性評価や周波数校正での利用が期待される。

謝辞

本研究は、(国研)科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業(ERATO)「美濃島知的光シンセサイザプロジェクト」および産学共創基礎基盤研究「テラヘルツ波新時代を切り拓く革新的基盤技術の創出」より、支援を受けた。

文献

- 1) I.F. Akyildiz, J.M. Jornet, and C. Han: Phys. Commun. **12**, 16 (2014).
- 2) A.J. Seeds, H. Shams, M.J. Fice, and C.C. Renaud: J. Lightwave. Technol. **33**, 579 (2015).
- 3) B.S. Williams: Nat. Photonics **1**, 517 (2007).
- 4) T. Nagatsuma, H. Ito, and T. Ishibashi: Laser Photonics Rev. **3**, 123 (2009).
- 5) M. Asada, S. Suzuki, and N. Kishimoto: Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 4375 (2008).

用語解説

THz検出用光伝導アンテナ(PCA)

光伝導膜上に平面アンテナ形状をもつ金属電極をつけた構造となっており、アンテナの両側からTHz波とプローブ光をそれぞれ入射する。プローブ光がアンテナ間ギャップに光励起キャリアを生成するのに対して、THz波はアンテナ間にTHz電場振幅に比例した電位差を発生させる。したがって、プローブ光によって生成された光励起キャリアが存在している間にTHz波が入射されると、プローブ光のパルス幅によってサンプリングされた瞬時電流が出力され、これがTHz電場強度のサンプリング値に対応している。

フォトキャリアTHzコム(PC-THzコム)

フェムト秒レーザー光(光コム)を光伝導アンテナ(PCA)に入射すると、それに同期して光励起キャリアの生成・消滅による光スイッチングが繰り返されるが、レーザー光のキャリア(搬送波)成分には追従できず、エンベロープ(包絡波)成分のみを反映したモード同期パルス列となる。この光励起キャリアのモード同期パルス列が、周波数領域において、THzコムのスペクトル構造を示す。通常の光コムは自由空間を伝播する電磁波コムであるのに対し、PC-THzコムはPCA内部に存在する周波数コムであり、PCAを周波数標準コムが内蔵されたTHz検出器として利用できる。

SHG(第2高調波発生)結晶

光を媒質に入射すると、光電場により、電子の偏りである電子分極が誘起され、その分極波の周波数は入射光の光周波数に等しくなる。しかし、ピーク強度の高い超短パルス光を入射した場合には、分極波がひずみ、高調波成分が含まれることになる。特に、非中心対称性構造を有している非線形光学結晶では、分極波が非対称にひずむため、偶数次の高調波が現れる。SHG結晶では、2次の分極高調波により、入射レーザー光の2倍の光周波数を有するSHG光が発生する。

- 6) <http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/use/index.htm>
- 7) S. Kohjiro, K. Kikuchi, M. Maezawa, T. Furuta, A. Wakatsuki, H. Ito, N. Shimizu, T. Nagatsuma, and Y. Kado: Appl. Phys. Lett. **93**, 093508 (2008).
- 8) 吉永弘: ミリ波と赤外線(オーム社, 1962).
- 9) S. Yokoyama, R. Nakamura, M. Nose, T. Araki, and T. Yasui: Opt. Express **16**, 13052 (2008).
- 10) T. Yasui, R. Nakamura, K. Kawamoto, A. Ihara, Y. Fujimoto, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki: Opt. Express **17**, 17034 (2009).
- 11) T. Yasui, K. Hayashi, R. Ichikawa, H. Cahyadi, Y.-D. Hsieh, Y. Mizutani, H. Yamamoto, T. Iwata, H. Inaba, and K. Minoshima: Opt. Express **23**, 11367 (2015).
- 12) T. Yasui, Y. Kabetani, E. Saneyoshi, S. Yokoyama, and T. Araki: Appl. Phys. Lett. **88**, 241104 (2006).
- 13) T. Yasui, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki: IEEE J. Sel. Top. Quant. **17**, 191 (2011).
- 14) 石橋忠夫, 伊藤弘: 応用物理 **70**, 1304 (2001).
- 15) H. Fuser, R. Judaschke, and M. Bieler: Appl. Phys. Lett. **99**, 121111 (2011).

(2015年8月18日 受理)

Profile



安井 武史(やすい たけし)

1997年徳島大学大学院工学研究科生産開発工学専攻博士後期課程修了。同年通商産業省工業技術院計量研究所博士研究員。99年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。10年徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授。現在に至る。THz計測、非線形光学顕微鏡、光コムなどの研究に従事。博士(工学)、博士(医学)。09年応用物理学会光学論文賞受賞。