

広帯域短パルスレーザーを用いたテラヘルツ電場検出技術の開発と応用 (145003103)

Detection of Terahertz Electric Field Using Broadband and Ultrashort Laser Pulses

研究代表者

片山郁文 横浜国立大学

Ikufumi Katayama Yokohama National University

研究分担者

芦田昌明[†] 諸橋功^{††} 入交芳久^{††} 関根徳彦^{††} 寶迫巖^{††}

Masaaki Ashida[†] Isao Morohashi^{††} Yoshihisa Irimajiri^{††} Norihiko Sekine^{††} Iwao Hosako^{††}

[†]大阪大学 ^{††}情報通信研究機構

[†]Osaka University ^{††}National Institute of Information and Communications Technology

研究期間 平成 26 年度～平成 28 年度

概要

広帯域のスペクトルを有する短パルスレーザーを用いると、極めて高速なテラヘルツ領域の電磁場を検出することが可能である。しかしながら、パルスレーザー技術の情報通信への応用はこれまで、電場波形や周波数の検出手法が不足していたため立ち遅れていた。本研究では、これを解決するために電場波形をリアルタイムで検出できるテラヘルツオシロスコープ、及び周波数を高精度・高感度に検出できる周波数標準技術、レーザーベースで開発することを目指した。その結果、チャープパルス、及び時間領域伸長法を用いることにより、シングルショットかつリアルタイムにテラヘルツ領域の波形を計測する技術を開発することに成功した。また、ファイバーレーザーをパルス化することによってテラヘルツ領域の連続発振光源の周波数を計測し、周波数固定に応用することが可能であることを見出した。これらの知見は今後レーザーベースの電場検出手法が情報通信分野でも非常に重要であることを示している。

1. まえがき

テラヘルツ領域の電磁波は次世代の大容量ワイヤレス通信を担う帯域として非常に注目されている。特に数百ギガヘルツのサブテラヘルツ領域では、空気の吸収も少なく遠距離を伝送することが可能であり、これまで以上に大きい容量でのデータ通信が可能になるものと期待される。また、より高周波のテラヘルツ領域では、水蒸気の吸収などの影響を受けて近距離で減衰するために、近距離・大容量のローカルな無線通信に適しているものと考えられる。近年データ通信量が大幅に増加していることを考えると、これらの高周波数帯を開拓することは急務である。しかしながら、このような高周波領域ではオシロスコープやスペクトラムアナライザー、周波数カウンタなど電場波形もしくは周波数スペクトル、絶対周波数などを検出するデバイスが不足しているため、これらの周波数を利用するための技術は未成熟であるといえる。

これを解決するために、本研究では、超短パルスレーザーを用いて、テラヘルツ領域で動作するオシロスコープの

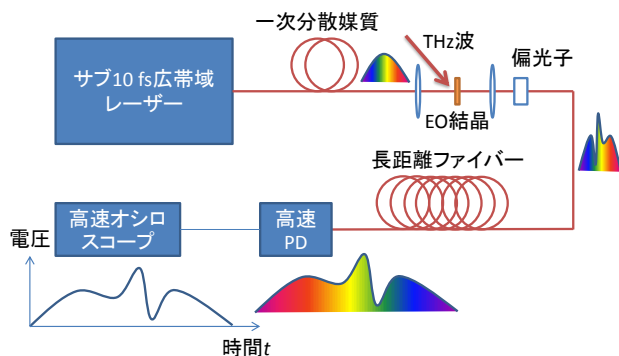


図 1: テラヘルツオシロスコープの原理図。チャープパルスで検出することで時間情報を波長に転写し、長距離ファイバーでナノ秒領域へと伸長する。

実証・開発、及び、テラヘルツ領域の様々な光源の絶対周波数を感度良く測定する手法の開発を行った。その結果、チャープパルスを用いたシングルショット電場波形検出手法（テラヘルツオシロスコープ）が数 THz の波形検出に利用できることが実証し、さらにチャープファイバースラッググレーティングを利用することで、装置を小型化、高性能化できることが分かった。また、パルスレーザーを用いた電場検出手法を利用することで、連続波光源である量子カスケードレーザーの絶対周波数測定を実証することに成功した。これらの結果は、超短パルスレーザーを用いたテラヘルツオシロスコープや、絶対周波数測定が超高速デバイス開発や通信技術開発に適用できることを示している。

2. 研究開発内容及び成果

テラヘルツデバイスの開発に必要なオシロスコープは、リアルタイム（一回の測定で波形が得られる）かつ高速に波形取得が可能でエラー検出などの機能も実現する必要がある。一方でパルスレーザーは、そのまま用いるとパルスが照射された時間の情報しか得ることができない。これを解決するために、今回開発したテラヘルツオシロスコープ

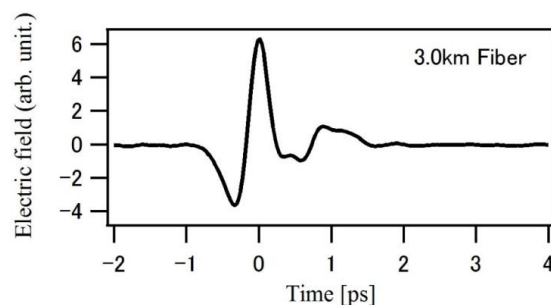


図 2: 3km ファイバーを用いたテラヘルツオシロスコープによって測定した電場波形。

プでは、チャープパルスを利用した。超短パルスレーザーのパルス幅を波長分散させることで意図的に伸長させ、電気光学結晶において、各波長成分とテラヘルツ波を相互作用させることで、時間情報を波長にマッピングしたわけである。さらに、測定を高速化するためにプローブを長距離ファイバーに透過させることで、群速度分散を利用して各波長成分を時間方向で大きく引き伸ばし、通常のアシロスコブでも検出可能なマイクロ波領域にテラヘルツ領域の情報を落とした。これによって、単一のフォトダイオードと通常のアシロスコブでもテラヘルツ波の電場波形の検出が可能となるため、高繰り返しにテラヘルツ電場波形を検出することが可能となる。

図2に一例としてこのような系を用いて、テラヘルツ発生によく用いられる800nmの波長帯で行った実験結果を示した。3.0km長距離ファイバーを分散媒質として用い、伸長したパルスを1GHzアシロスコブと高速フォトダイオードを用いて検出した。図2に示したように、通常の測定方法で得られるテラヘルツ波形と類似した波形が得られていることが分かる。さらに、分散媒質としてチャープファイバークラックグレーティングを利用することで、長距離ファイバーによる減衰と、遅延の影響も避けることができることが分かった。また、レーザーの繰り返し周波数である1kHzでテラヘルツ領域の波形を検出することも分かった。これらのことから、テラヘルツ電場波形を単一のフォトダイオードとアシロスコブで検出できることが実証できたとと言える。今後は、フォトダイオードを二個利用するバランス検出法や、ファイバーを用いた検出素子と組み合わせることで、より高感度、高分解能なリアルタイムテラヘルツ電場波形測定装置が可能になる。

次に、同様に超短パルスレーザーを用いた電場検出技術が周波数測定にも応用可能であることを示した実験結果を示す。パルスレーザーを用いた電場検出実験では、その繰り返し周波数で電場強度をサンプリングすることになり、繰り返し周波数の整数倍のコム信号とテラヘルツ光源とのビートを観測することができる。そこで、本研究では通信帯域での電場検出が重要であるとの観点から、通信帯域の連続波光源を変調することによって発生する周波数コムを用いた電場検出を試みた。用いた波長は1.5μm帯である。また、変調コムは繰り返し周波数が広い範囲で可変であり、10GHz以上の高い周波数にも設定可能であることから、より速い周波数揺らぎにも対応できる可能性がある。得られた結果を図3に示したが、0.6THzの電磁波の電場が検出できている。今後は通信帯域で感度の良い測定配置を確立する必要があるが、この結果はレーザー技術の周波数測定への応用に向けた重要な一歩である。

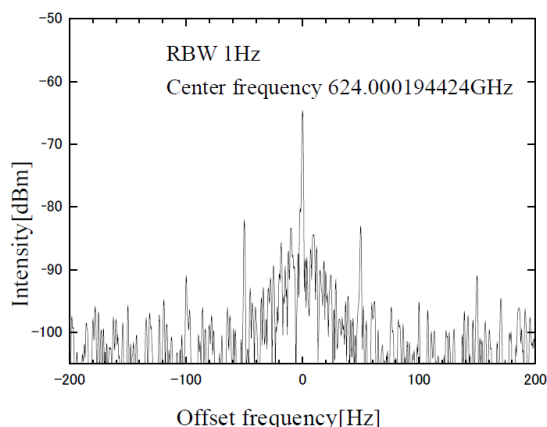


図3: 1.5μm帯のファイバーを用いたテラヘルツ周波数測定結果。非常に高分解能の検出が可能である。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

今回開発したテラヘルツアシロスコブ及び周波数計測技術は、広範な応用が見込まれるものの、必要物品が高価であるという欠点を有する。これを解決するため、今後はパルスレーザーを通信帯域のものに変更し、通信帯域のデバイスを援用していくことが重要である。また、ファイバーや導波路を活用することで、さらに電場検出感度を向上させ、装置のコンパクト化、高機能化を実現する必要がある。特にファイバーに検出器を直結した場合には、検出器の位置を簡便に変化させたり、デバイスに接続したりすることまで可能である。これが実現できれば、イメージングの高速化やテラヘルツデバイスの動作確認等の応用が広がるものと期待できる。また、ファイバーレーザーを用いれば、測定の高繰り返し化も可能である。例えば最近では、ファイバーレーザーの高出力化が進み、1.0 mのレーザーで、繰り返し周波数数 MHz、出力数十 W、パルス幅数 100fs という高出力レーザーが実現されている。このようなレーザーを用いれば、シングルショットの電場波形測定を高繰り返し化することが可能であり、マイクロ秒の間隔でテラヘルツ電場を検出できる可能性がある。これを利用すれば、これまでに難しかった不可逆現象のモニタリング、エラー検出、シングルイベント測定や、時々刻々変化する現象のテラヘルツ波による観測が可能となる。

4. むすび

以上述べたように、超短パルスレーザーとファイバーをはじめとする光通信分野の技術とを融合することで、テラヘルツアシロスコブや、周波数計測の応用が拓けることを明らかにした。今回開発した手法は広範な応用を有しており、今後もこの方向の研究を推進し、テラヘルツ技術が応用展開される新たな道筋をつけたいと考えている。

【誌上発表リスト】

- [1] M. Kobayashi, Y. Minami, C. L. Johnson, P. D. Salmans, N. R. Ellsworth, J. Takeda, J. A. Johnson, and I. Katayama, “High-Acquisition-Rate Single-Shot Pump-Probe Measurements Using Time-Stretching Method”, Sci. Rep. Vol.6 37614 pp. 1-6 (2016年11月23日)
- [2] 桐ヶ谷 菜々、諸橋 功、金子 優太、片山 郁文、入交 芳久、坂本 高秀、関根 徳彦、笠松 章史、寶迫 徹、 “MZM ベース超平坦光コム発生器を用いた 600GHz 帯高精度周波数計測”、電子情報通信学会論文誌 C、Vol. J99-C No.8 pp. 411-412 (2016年8月1日)
- [3] K. Yoshioka, I. Katayama, Y. Minami, M. Kitajima, S. Yoshida, H. Shigekawa, and J. Takeda, “Real-Space Coherent Manipulation of Electrons in a Single Tunnel Junction by Single-Cycle Terahertz Electric Fields”, Nature Photonics Vol.10 pp.762-765 (2016年11月7日)

【申請特許リスト】

- [1] 片山 郁文、南康夫、武田 淳、J. A. Johnson、テラヘルツ電磁波電場検出技術、日本、2015年1月30日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.laser-nanoscience.ynu.ac.jp/ja/>
<http://www.ultrafast.ynu.ac.jp/>