

テラヘルツ・サブピコ秒の波形を ゆがみなく計測

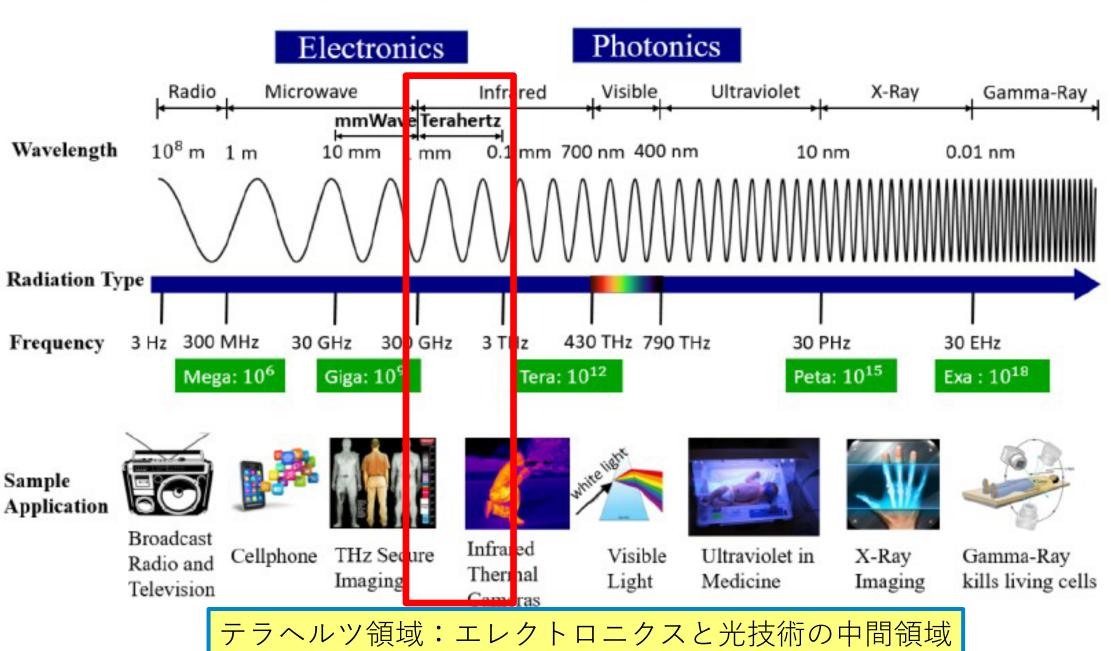
横浜国立大学 大学院工学研究院 知的構造の創生部門 教授 片山 郁文

2023年6月6日

Outline

- 背景
 - テラヘルツ波とは
 - テラヘルツ波無線通信と光電融合
 - テラヘルツ波形計測の必要性と波及効果
- 技術紹介
 - テラヘルツ検出技術
 - シングルショット分光法
 - リアルタイム波形検出技術
- テラヘルツオシロスコープに向けて
 - ・想定される用途
 - 企業への期待
 - 連絡先など

THz(10¹² s⁻¹)-ps(10⁻¹² s)領域



大容量無線通信・分光分析・イメージング

3

新技術説明会

研究動向(JST-CRDS)

コンピュータ

ネットワーク

無線通信網

次世代

2021年戦略プロポーザルにお いて、無線・光融合基盤技術の 重要性が指摘されている。

戦略プロポーザル

無線・光融合基盤技術の 研究開発

~次世代通信技術の高度化に向けて~

技術の融合:

光電変換 高効率送受信回路

(B5G/6G, 7G, ···)

応用技術

レーダー、 センシング、

次世代

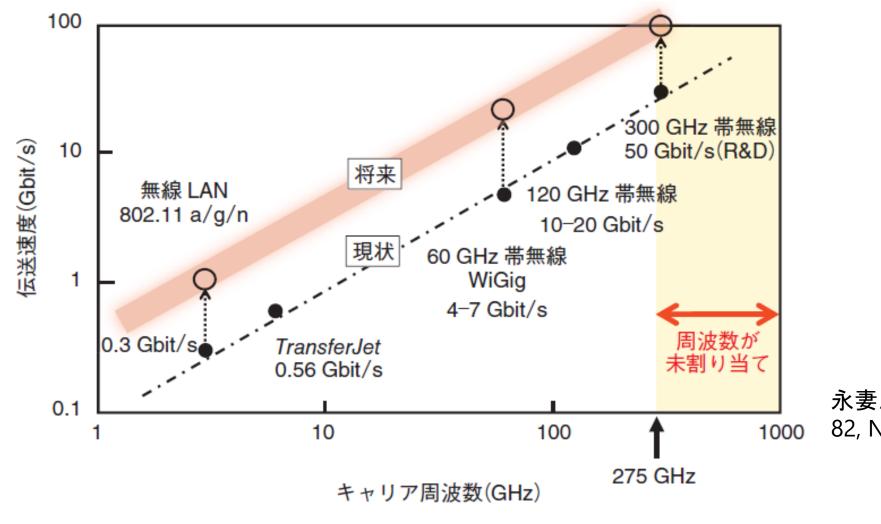
基幹通信網

その他

テラヘルツ(THz)ギャップ

エレットロニゥス技術

キャリア周波数と通信帯域



永妻忠夫、精密工学会誌 82, No.3, 221 (2016).

周波数帯域が上がるごとに変調帯域を広くとることができ伝送速度が上がる



変調帯域を十分にカバーする波形計測装置が必要 = ピコ秒・テラヘルツ領域の波形計測

新技術説明会 テラヘルソ波形検出の必要性

テラヘルツ 発振デバイス

光通信・THz通信の変調 速度評価

波形計測 分光モニタリング

超高速距離検出 •物質同定•電波検出

テラヘルツ 高速イメージング

薬品・プラスチック・コンク リート等の超高速イメージ ング

- どのくらいの速度で振幅変調や位 相変調を行うことができるのか?
- 振幅や位相のゆらぎは何に起因し ているのか?
- 距離検出や、TD-OCTなどにはテ ラヘルツ波形計測が必要。
- 物質・プロセスの同定のためには 波形・スペクトル測定が必要。
- イメージングには、高速、高繰り 返しな波形計測が必要。
- 波形・スペクトルをロバストなデ バイスで計測したい。



従来技術とその問題点

既に実用化されているテラヘルツデバイスや分光装 置には下記のものがある

UTC-PD、QCL、RTD等・・・主に強度検出で単色なので、感度が高くヘテロダイン検出等が用いられるが電場波形検出は難しい。

<u>差周波発生システム</u>・・・高感度で波長可変であるが、強度検出で周波数掃引が必要。

THz-TDSシステム・・・電場波形を計測可能だが、時間掃引が必要でリアルタイム計測に適さない。

リアルタイム超高速テラヘルツ波形計測のできる技術は未確立

新技術説明会 テラヘルツ波形検出の必要性

十分な時間分解能を持ちうる光技術の側からアプローチ

- ・瞬間瞬間のテラヘルツ波形をリアルタイム測定できる新しい測定手法 を開発:シングルショットテラヘルツ計測技術
- ・通信波長帯レーザーを利用することによる、ロバストかつ高感度な 測定系の実現:光ファイバー技術との融合

超短パルス・テラヘルツ技術



光ファイバー技術



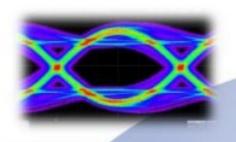
超広帯域・リアルタイム テラヘルツオシロスコープ



テラヘルツデバイスの電場波形を高感度かつ正確に検出 できる技術を実現。ファイバーと組み合わせてロバ ストな装置を開発することも可能

新技術説明会

波及効果



通信・エレクトロニクス

6Gデバイス評価 一位相雑音評価 ーエラー評価

光コンピューティング 一計算モニタリング 超高速デバイス評価



基礎科学

生体ゆらぎ

- ータンパク質のfolding
- ーイオンチャネル
- 一吸湿·水和 劣化挙動(光など) ゆらぎ計測・カオス

リアルタイムテラヘルツ オシロスコープ

- 電場波形検出可能
- 高速測定可能

計測

気体分光 LiDAR 光音響分光 テラヘルツ分光

医療・バイオ

ポンプ・プローブ フローサイトメトリー ーより多くの情報

化学•産業

産業破壊検査・LIBS・LTEM

充放電・オペランド

レーザー加工最適化

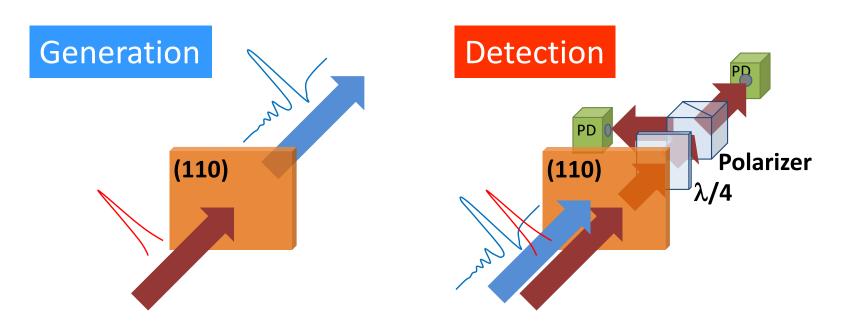


POCT·薬物·薬剤 抗原抗体反応 阪大斗内研

テラヘルツ領域の電磁波は見えていないだけで身の回りにあふれている。



パルスレーザーとテラヘルツ波



電気光学効果を利用したパルスレーザーによるテラヘルツ波の発生と検出

発生:パルスレーザーを照射するとパルス時間幅に対応

するテラヘルツ波が発生

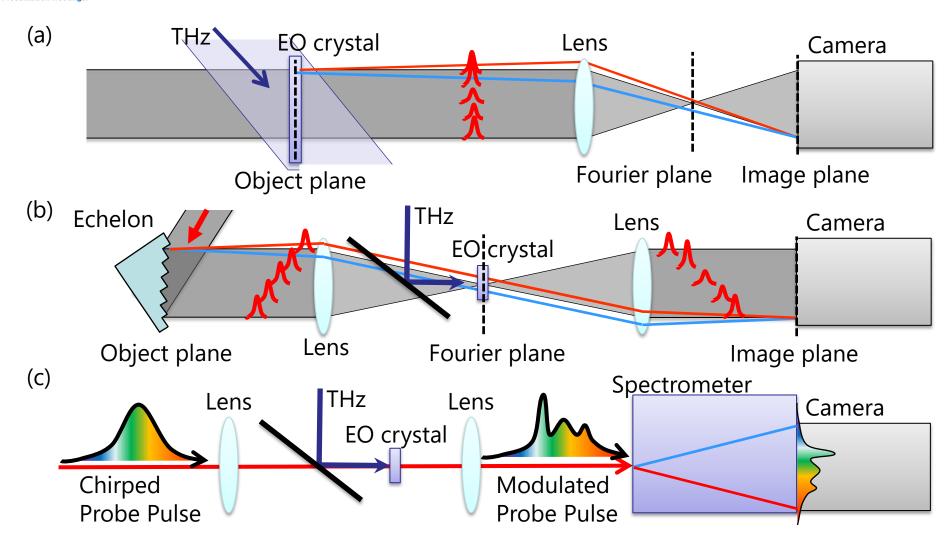
検出:テラヘルツ電場で誘起される屈折率変化をパルス

レーザーの偏光回転で検出

パルス幅1ps以下の超短パルスレーザーを利用して、 広帯域のテラヘルツ波を発生・検出できる

ただし、電場検出はレーザーパルスの当たったタイミングのみ可能

新技術説明会 シングルショット波形検出

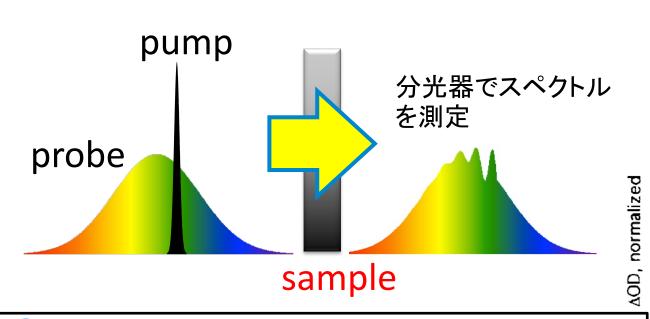


- (a) 非同軸斜め入射: M. Bonn et al., Opt. Lett. 25, 426 (2000).
- (b) 階段状光学素子: Y. Minami et al., Appl. Phys. Lett. 103, 051103 (2007).
- (c) チャープパルス法: Z. Jiang et al., Opt. Lett. 23, 1114 (1998).

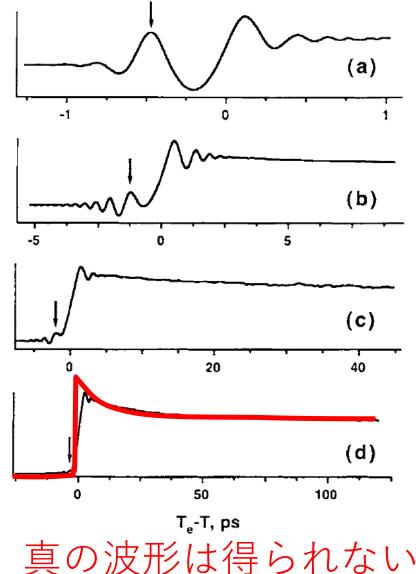
(a),(b)の手法は結像系が必要で調整が困難

チャープパルス検出法

I. A. Shkrob, et al., *J. Appl. Phys.* 96, 25–33 (2004).



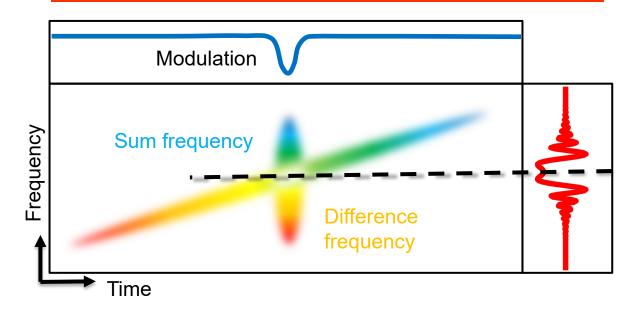
- ◎ シングルショット計測により高速化可能
- プローブパルスのチャープ量で 時間幅可変
- ② 回折限界まで集光可能 (アンテナなどで高感度化可能)
- ☺ 時間分解能が窓幅(チャープ量)に依存
- ② スペクトル波形に歪みが生じてしまう





波形ゆがみの原因

従来法:チャープパルスに直接書き込み



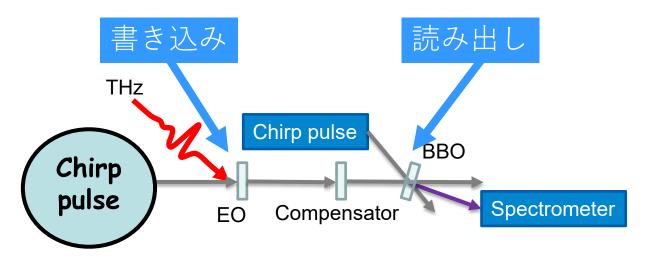
従来法:

和周波成分と差周波成分の2つがチャープパルスと干渉するため波形がゆがむ

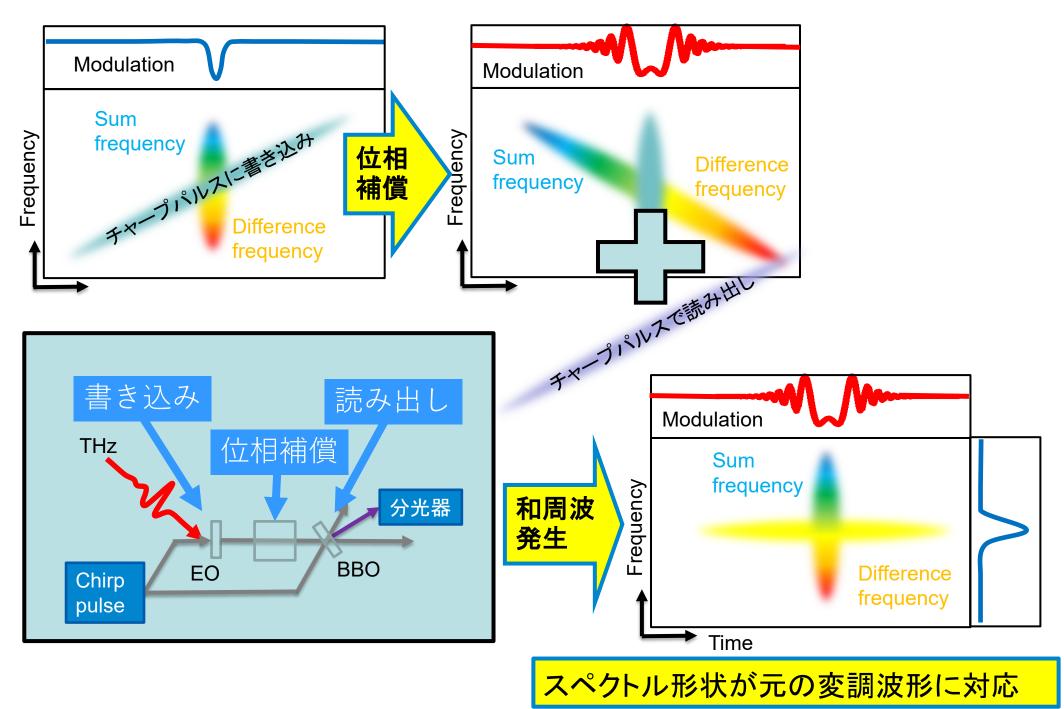
提案法:

書き込みと読み出しを 分離することで、波形 補正やアンプなどの操 作ができる

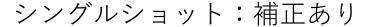
チャープパルスを用いた波形検出技術

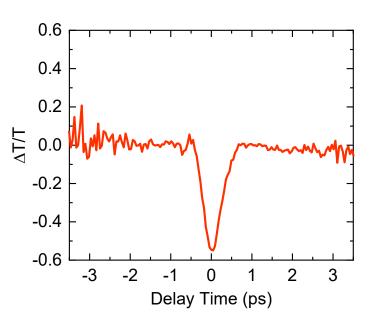


改良歪み補正技術

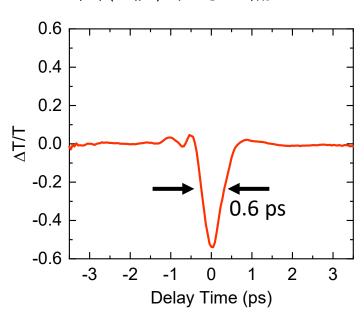


実験結果:LiNbOgにおける超高速変調

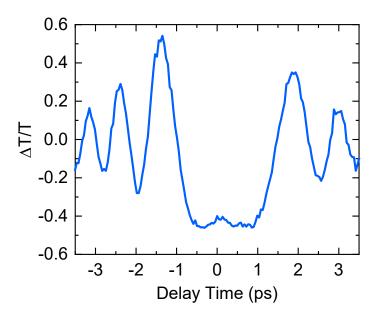




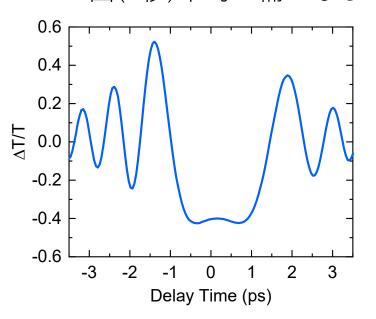
500回(1秒)平均:補正あり



シングルショット:補正なし



500回(1秒)平均:補正なし



実験条件

Sample: LiNbO₃, 室温

Pump: 790 nm

Probe: 790 nm chirp

 $GDD=0.2 ps^2$

$$\Delta T/T = \frac{SH_{w/pump}}{SH_{w/o\ pump}} - 1$$

w/o pump 1st

w/ pump 1st

w/o pump 2nd

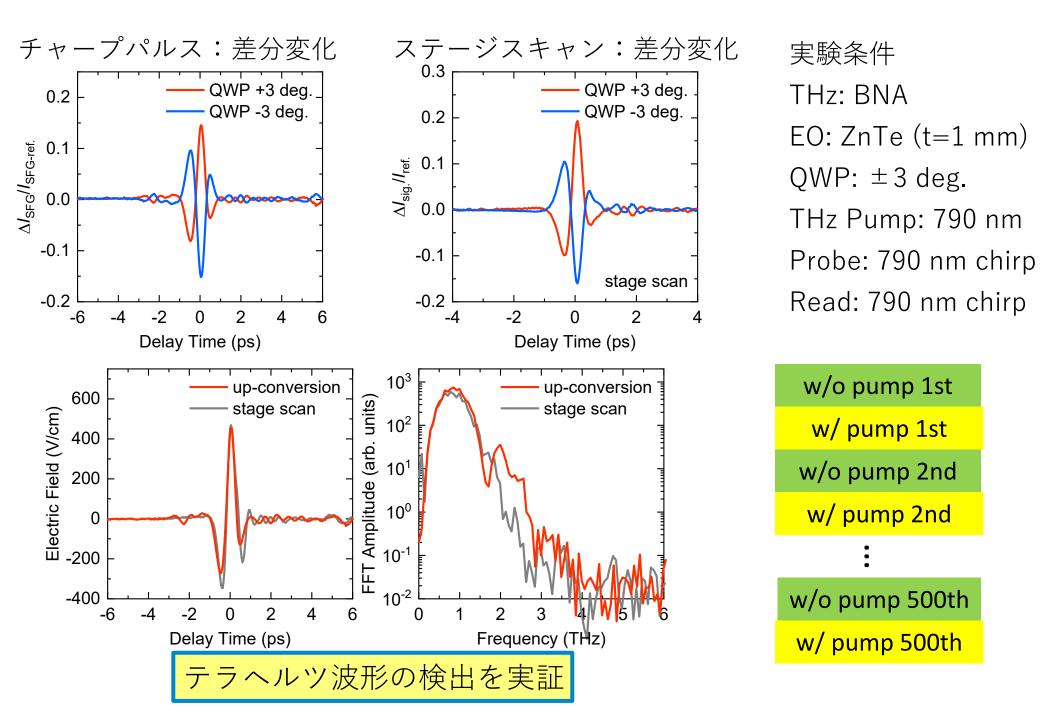
w/ pump 2nd

w/o pump 500th

w/ pump 500th

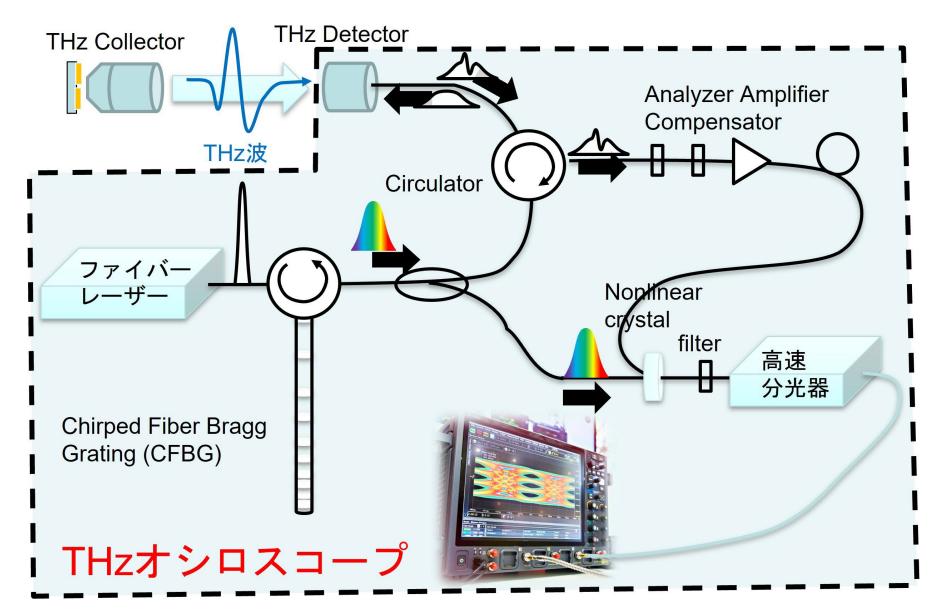


実験結果:THz波検出(1秒積算)





テラヘルツ波形計測を手軽に



ファイバーベースでロバストな系を構築中



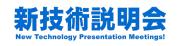
新技術の特徴・従来技術との比較

- チャープパルスを用いたシングルショット テラヘルツ波形検出に成功した
 - →ファイバーを用いたロバストなデバイス
- 従来技術の問題点であった、波形ゆがみを 解消することに成功した。
- 本技術の適用により、従来は不可能であったリアルタイム波形検出が、超高速変調の 高速なモニタリングやイメージング、エラー検出等が可能になる。



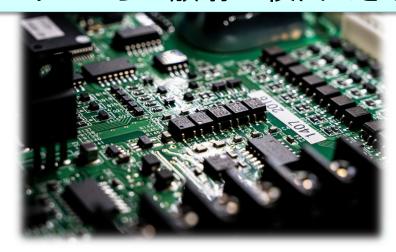
想定される用途

- 本技術の特徴を生かすためには、ファイバーベースのロバストで高感度な光学系とすることが重要である。
- 身の回りの様々なテラヘルツ波を可視化できる
 る可能性がある。(放電・加工・破壊等)
- これまでに、1 V/cm程度の感度があればレー ザー加工時のテラヘルツ放射検出や、テラヘ ルツデバイスの電場検出などが可能であるこ とが分かっている。



将来展望

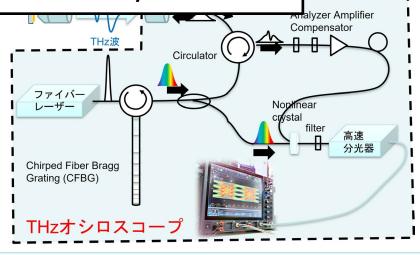
テラヘルツプローブをかざせば電子 デバイスからの放射が検出できる



光通信の超高速変調の性質をピコ 秒時間分解で調べらる



目標感度:1 V/cm程度



揺らぎの大きい系でのテラヘルツ分 光が可能



本技術によって、光通信の超高速信号やテラヘルツ波形を 気軽に計測できるようにする



企業への期待

- ファイバーとの組み合わせによるロバストな 計測技術の実現と高感度化は未達であるが、 パルスファイバーレーザー技術の進展により、 克服できるようになっていると考えている。
- 光計測技術を持つ企業との共同研究を希望。
- また、テラヘルツ分光技術を開発中の企業、 テラヘルツイメージング・テラヘルツ通信分 野への展開を考えている企業には、本技術や 関連技術の導入が有効と思われる。



本技術に関する知的財産権

• 発明の名称

: テラヘルツ波形検出装置、

テラヘルツ波形の検出方法

• 出願番号

: 特願2021-206014

• 出願人

:横浜国立大学、

神奈川県立産業技術総合

研究所(KISTEC)

• 発明者

: 片山郁文、武田淳、玉置亮



産学連携の経歴

- 2013年-2016年 総務省SCOPE委託研究実施
- 2021年-2023年 KISTEC戦略シーズ育成事業
- 2021年-2022年 NEDO若サポ
- その他、共同研究1社、NDA1社等



お問い合わせ先

横浜国立大学 研究推進機構 産学官連携推進部門 産学官連携支援室

T E L : 045 - 339 - 4450

FAX: 045-339-3057

e-mail: sangaku-cd@ynu.ac.jp