

光強度の超高速変化を可視化

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

2024年6月11日

Outline

- 背景
 - データ通信量と超高速デバイスの必要性 3
 - 光電融合とデバイス評価技術 4
 - リアルタイム波形計測の必要性 6
- 技術紹介
 - リアルタイム波形計測技術の原理 7
 - リアルタイム波形計測技術の実証 13
 - 研究結果と今後の展望 17
- 波形検出技術の応用に向けて
 - 想定される用途 18
 - 企業への期待 20
 - 連絡先など 22

大容量通信とデバイス

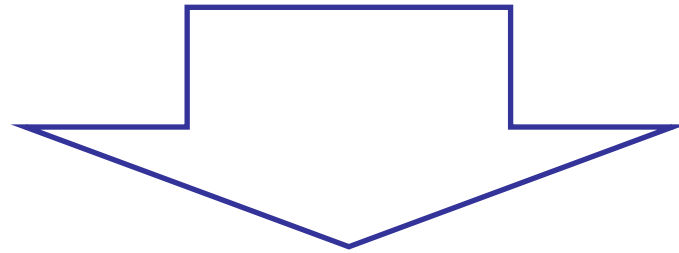
NTT：IOWN構想、光電融合、無線・光大容量通信

デバイス内外の情報のやり取りを光で行おうという試みも進んでいる（コンピューティング・データセンター）

情報化社会とデバイス速度

情報通信技術やAI技術の浸透により大容量データ処理・通信技術が必要になってきている。

CPUをはじめとした情報処理デバイスの速度は物理的な限界が近づいており、頭打ちとなっている



情報通信・データ処理速度の向上が可能な光技術の活用が必要になってきている。

研究動向 (JST-CRDS)

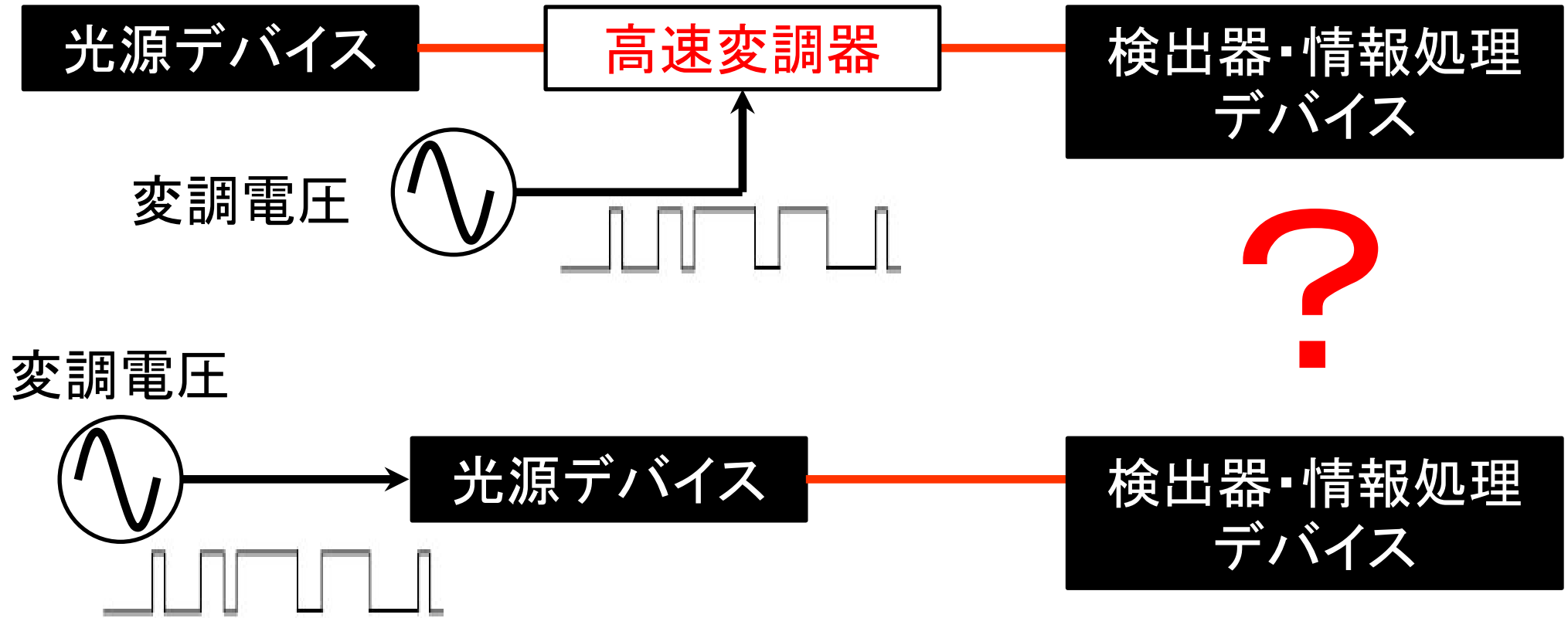
2021年のJST-CRDS戦略プロポーザルにおいて、無線・光融合基盤技術の重要性が指摘されている。

デバイスの速度限界であるテラヘルツ領域において、光技術とエレクトロニクスを融合した新しい技術の確立が望まれている。

コンピューティングやセンシング、大容量通信、イメージングなどを担う周波数領域としてテラヘルツ領域は注目されている。

しかしながら、テラヘルツ領域・ピコ秒領域のダイナミクスを可視化するデバイスは確立されていない

波形検出の必要性



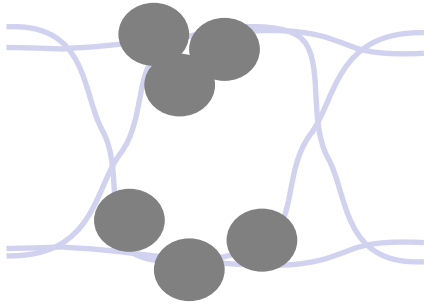
光が情報通信や情報処理を担うためには、変調結果がどのような波形であり、それが検出器にどう伝わるかを明らかにする必要がある。

情報処理の信頼性を向上させるためには、情報処理速度をはるかに上回る帯域の波形検出技術が必須。

従来の通信速度評価手法

BER (ビットエラーレート測定)

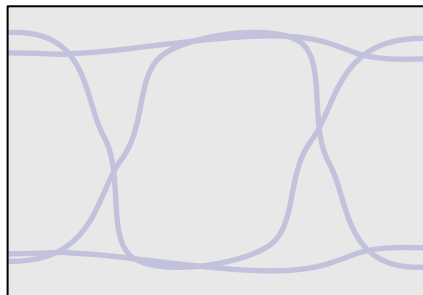
ランダムなビット列を送り、受信側で得られたデータを解析し、正しく受信できた割合を評価する手法



エラーレートの評価に極めて有用
エラーの原因はわからない

アイパターン測定

ランダムなビット列を送り、受信側で得られた多数の波形をサンプリング取得し、その分布を解析する手法

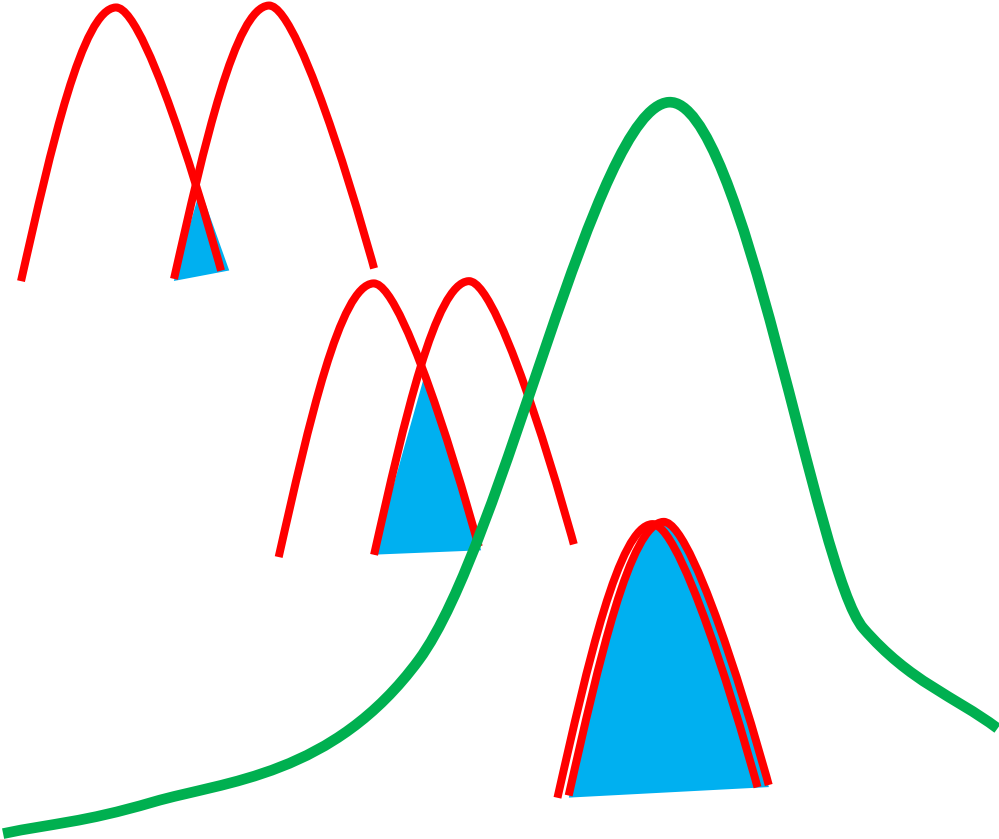


波形やその分布がわかり、
エラーの原因の解析なども可能
帯域はエレクトロニクスで制限

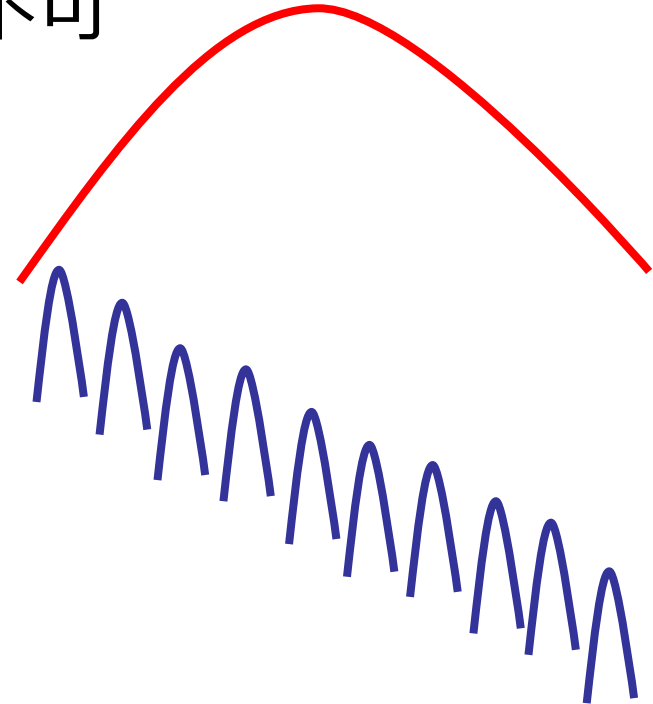
光パルスを用いた波形観測

光パルスを用いることによって、ピコ秒・フェムト秒の波形計測が可能

自己相関法・・・フェムト秒の時間分解が可能。正確な形状はわからない。

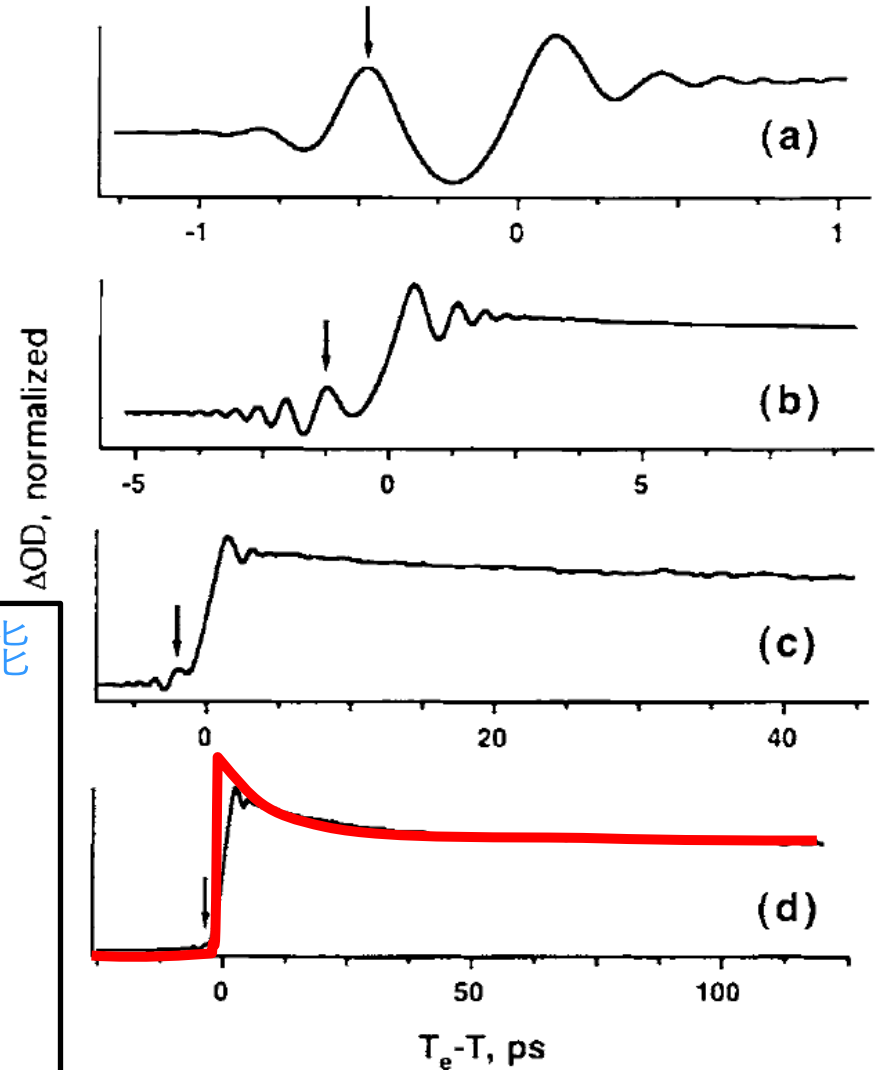
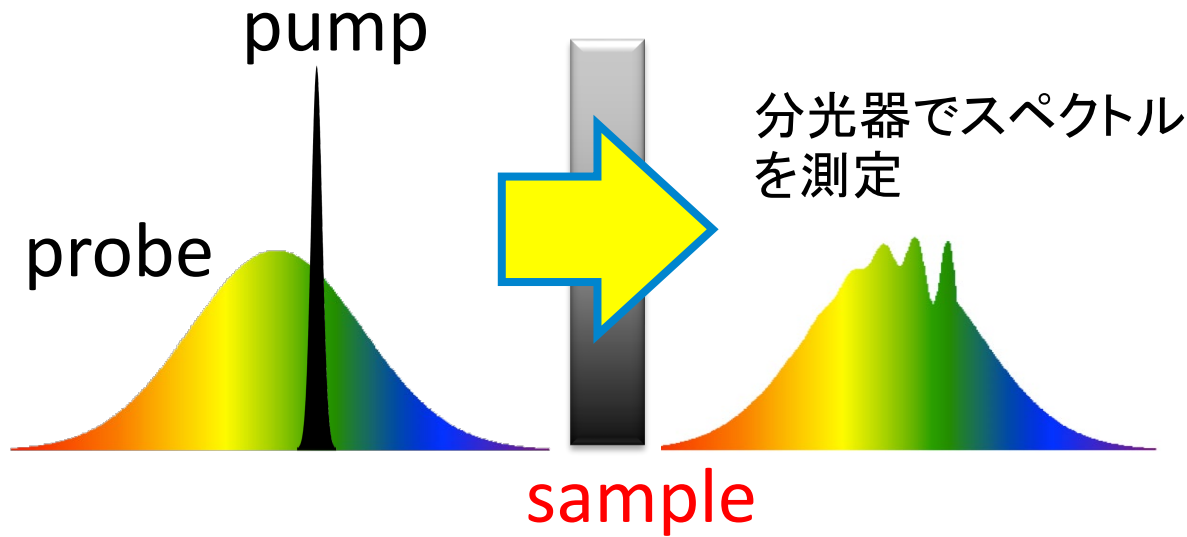


相互相関法・・・別のパルスレーザーを使用し計測。周波数同期が必要でリアルタイムが不可



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
- 😊 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
- 😞 スペクトル波形に歪みが生じてしまう

真の波形は得られない

従来技術とその問題点

超高速光変調を可視化するデバイスや分光装置には下記のものがある

PDと超高速オシロスコープ・・・BERやアイパターンを計測可能。帯域はサブTHz程度に制限。

自己相関法・・・フェムト秒の時間分解能が可能。正確な形状はわからない。

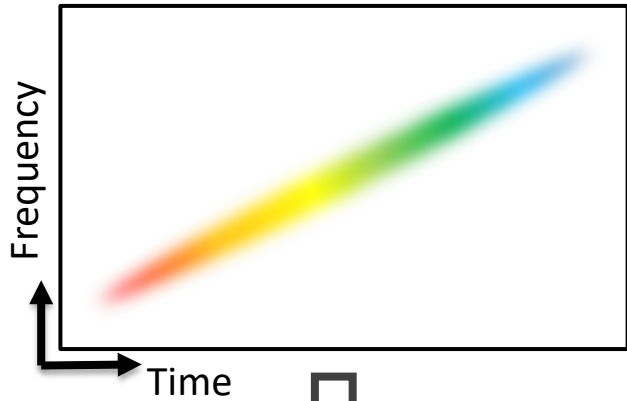
相互相関法・・・別のパルスレーザーを使用し計測。周波数同期が必要でリアルタイムが不可。

チャープパルスシングルショット法・・・リアルタイム波形計測が可能だが、波形がゆがむ。

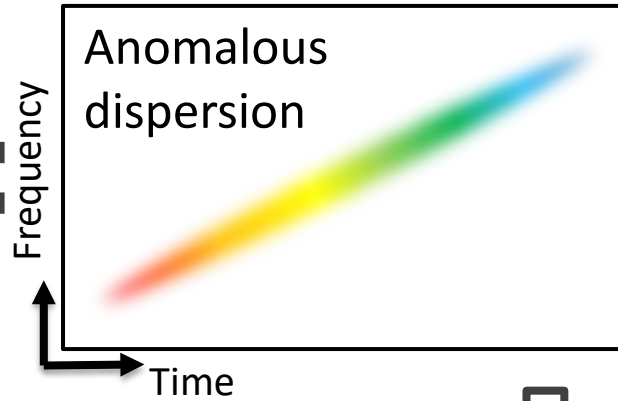
リアルタイム超高速波形計測技術は未確立

テラヘルツ波の波形観測

Probe chirped pulse

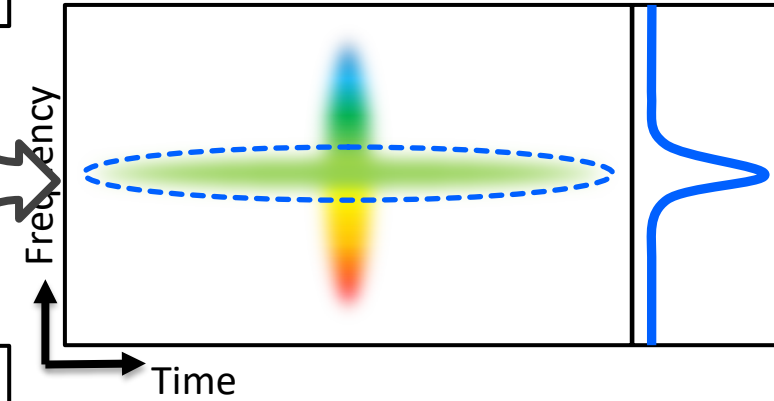


Readout chirped pulse



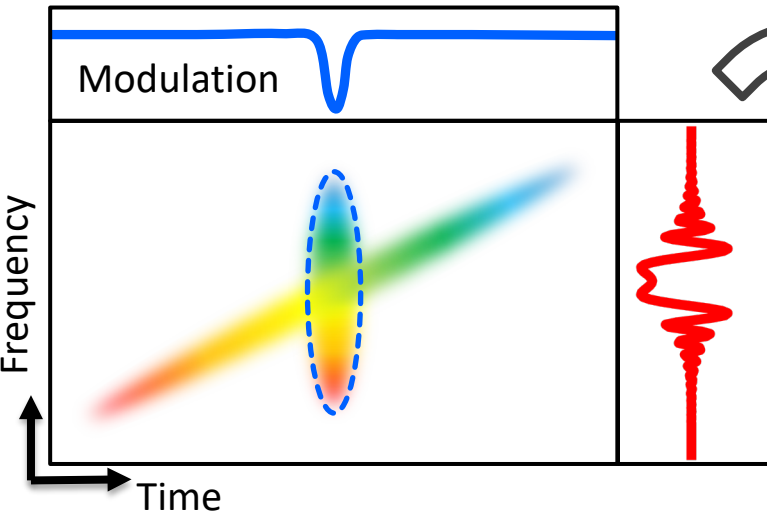
Sum-frequency generation (SFG)

Up-converted modulation

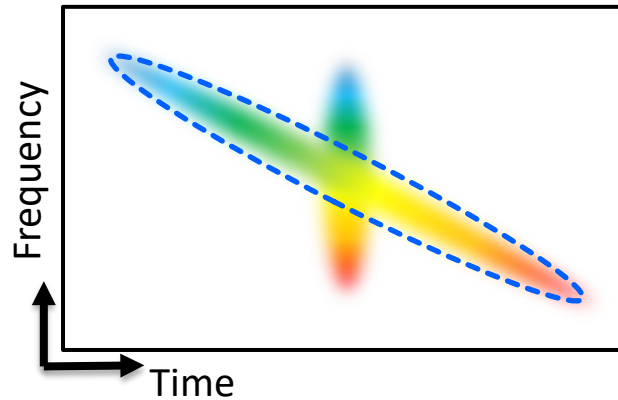


modulation

Modulation



X



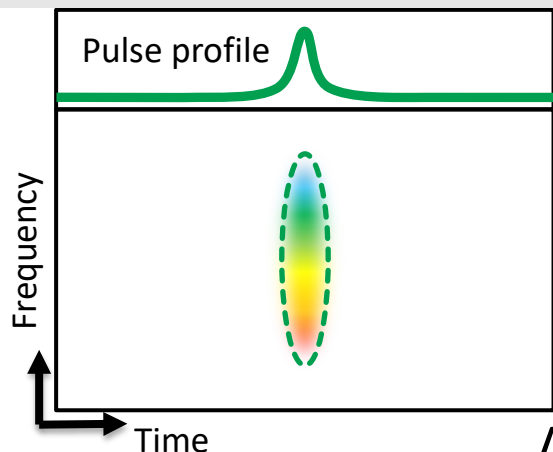
Dispersion compensated
probe pulse with modulation

R. Tamaki *et al.*, Opt. Exp.
31, 40142 (2023).
片山, 新技術説明会 (2023).

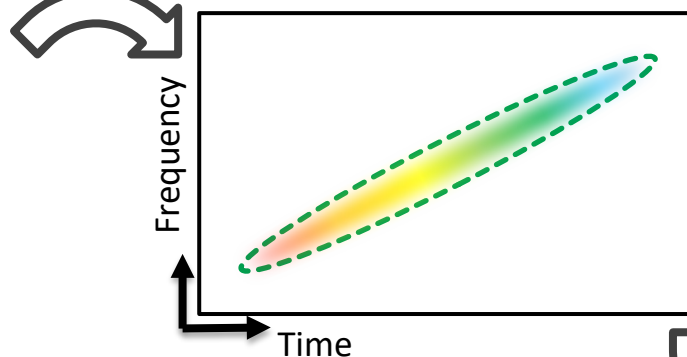
和周波発生を用いることで、時間→周波数マッピングを歪みなく実現

光パルスの波形観測

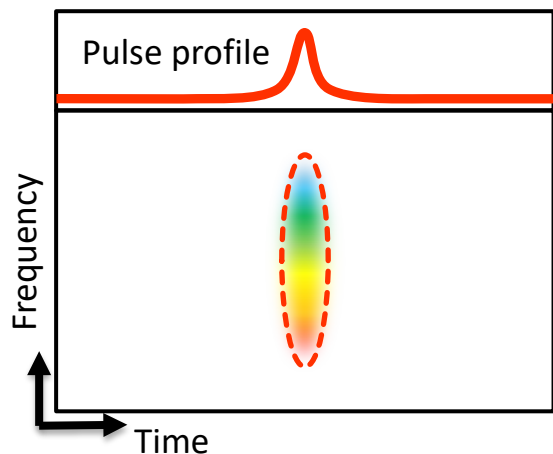
読み出し光 1040 nm



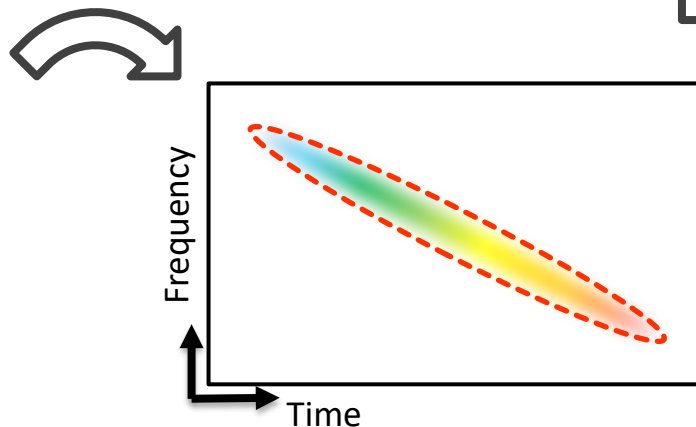
Dispersion



Readout chirped pulse



Anomalous dispersion



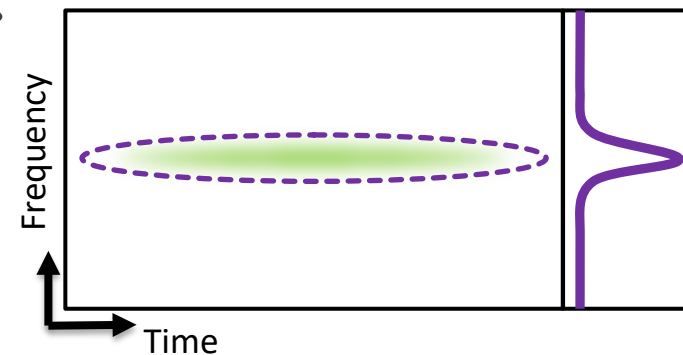
Dispersion compensated negative chirped probe

被測定光 1560 nm

SFG wavelength
1040 nm & 1560 nm
= 1.19 eV (ω_1) + 0.79 eV (ω_2)
= 1.98 eV ($\omega_1 + \omega_2$) = 624 nm

不要な光を除去可能
2.38 eV ($2\omega_1$)
1.78 eV (ω_2)

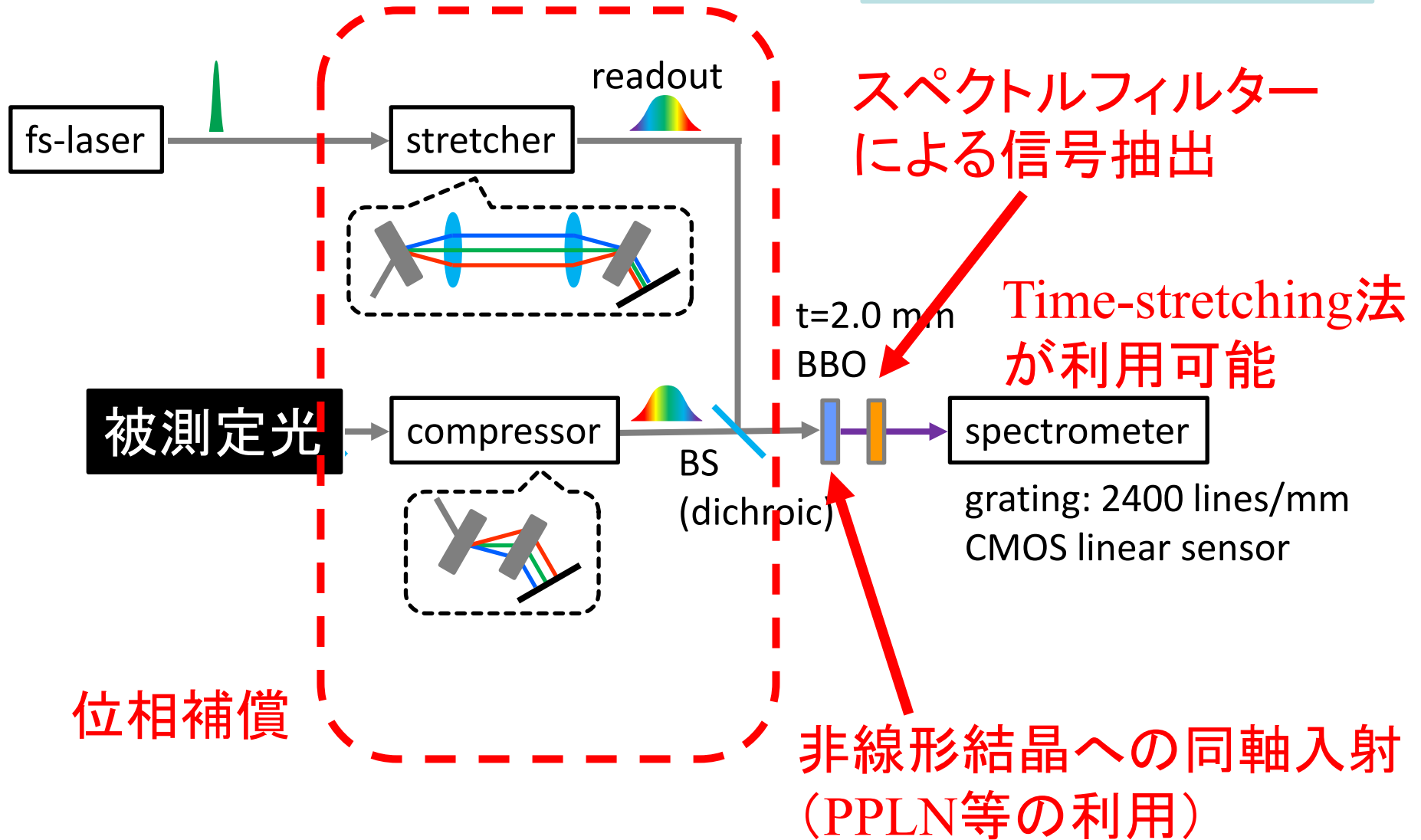
Sum-frequency generation (SFG)



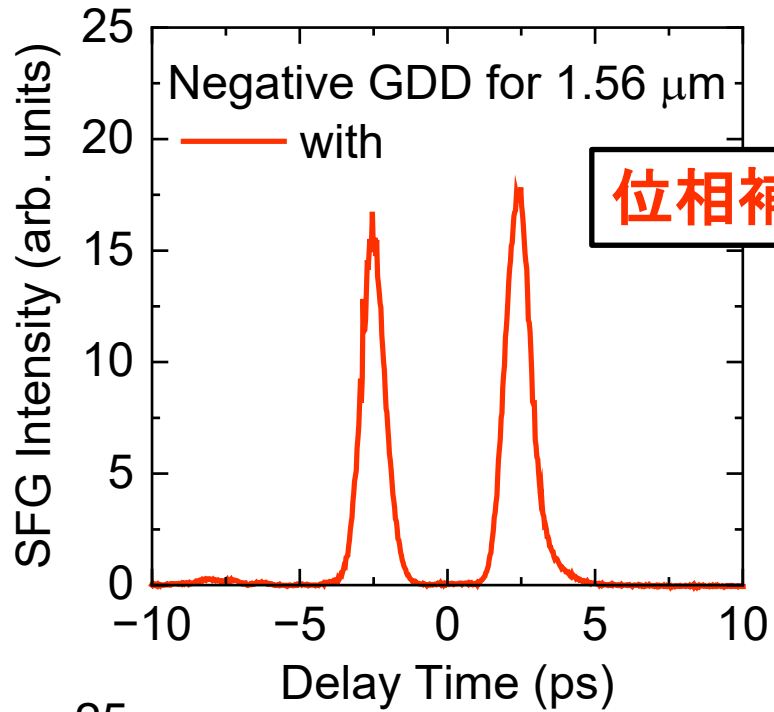
信号光 624 nm
(1.98 eV)

光の強度プロファイルについて、時間→周波数マッピングを歪みなく実現
波長を変えることによって不要な光を波長フィルターで除去可能

Yb-fiber
1040 nm
394 fs
100 kHz



本手法は光の強度プロファイルの計測技術を実装するにあたって重要な特長を多数有している。



位相補正有

時間差($\Delta t=5$ ps)を付けたパルス対の計測結果

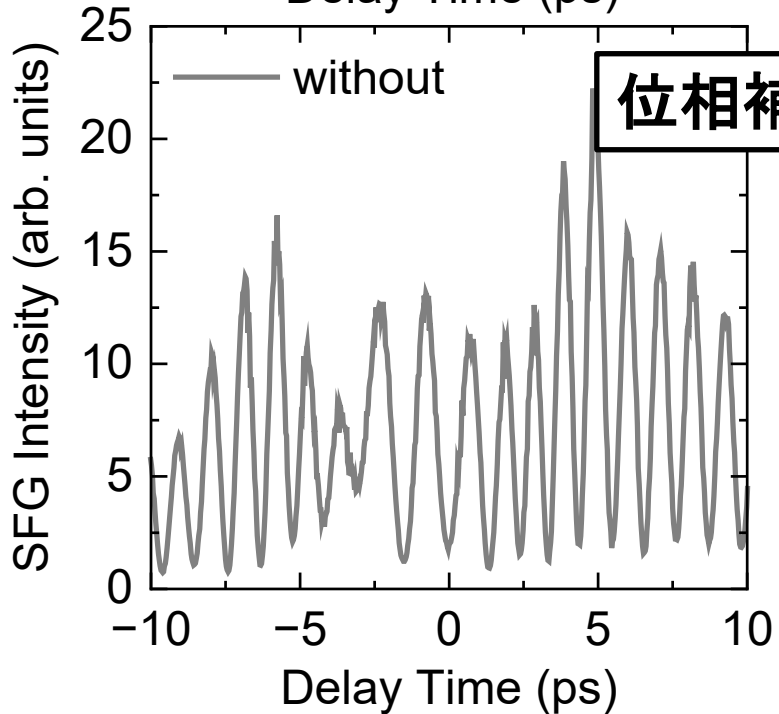
レーザー同期をしなくても計測可能！

SFG and SHG of 1.04 μm



検出確率 1/1000

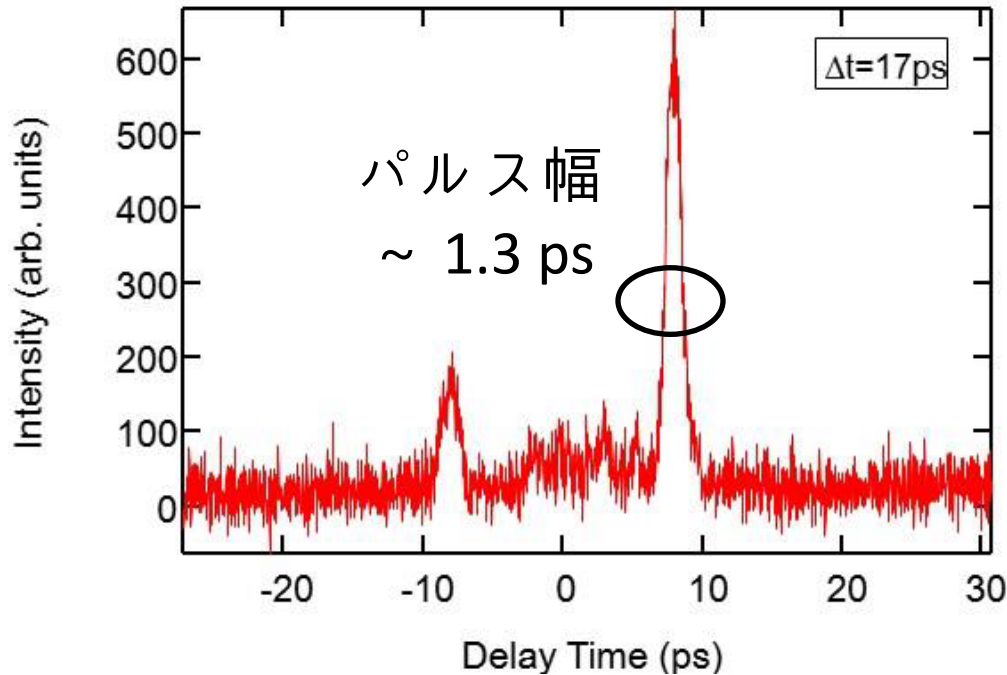
= 20 ps (time window) / 20 ns (pulse interval).



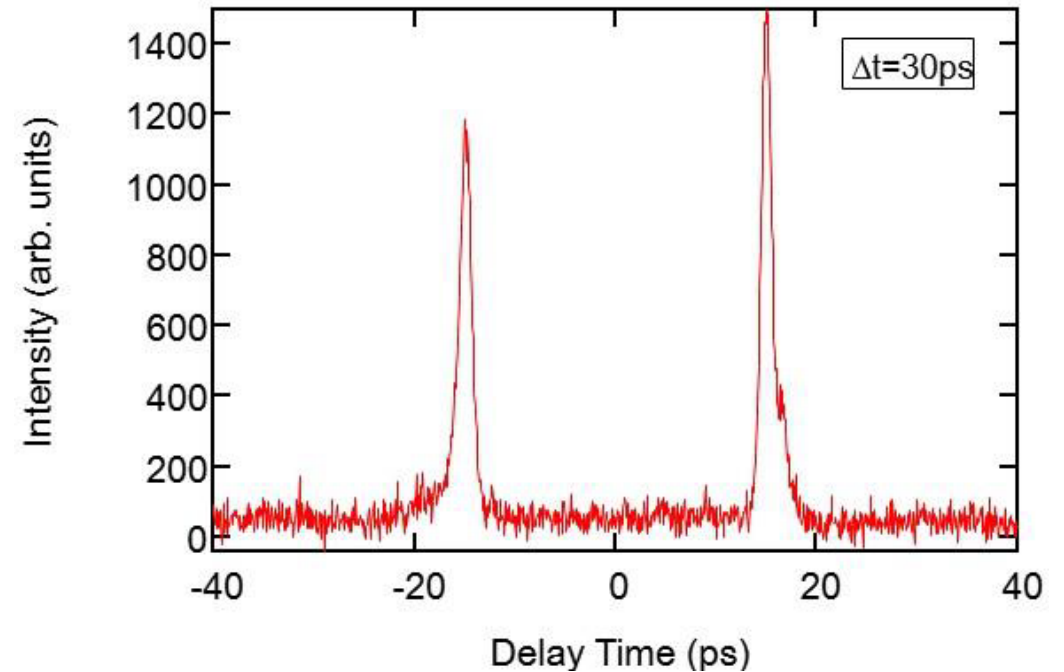
位相補正無

提案手法により、超高速のパルスプロファイル
をリアルタイム計測可能であることを実証

チャープパルスのパルス幅を変更することによって、窓幅を変えることが可能。

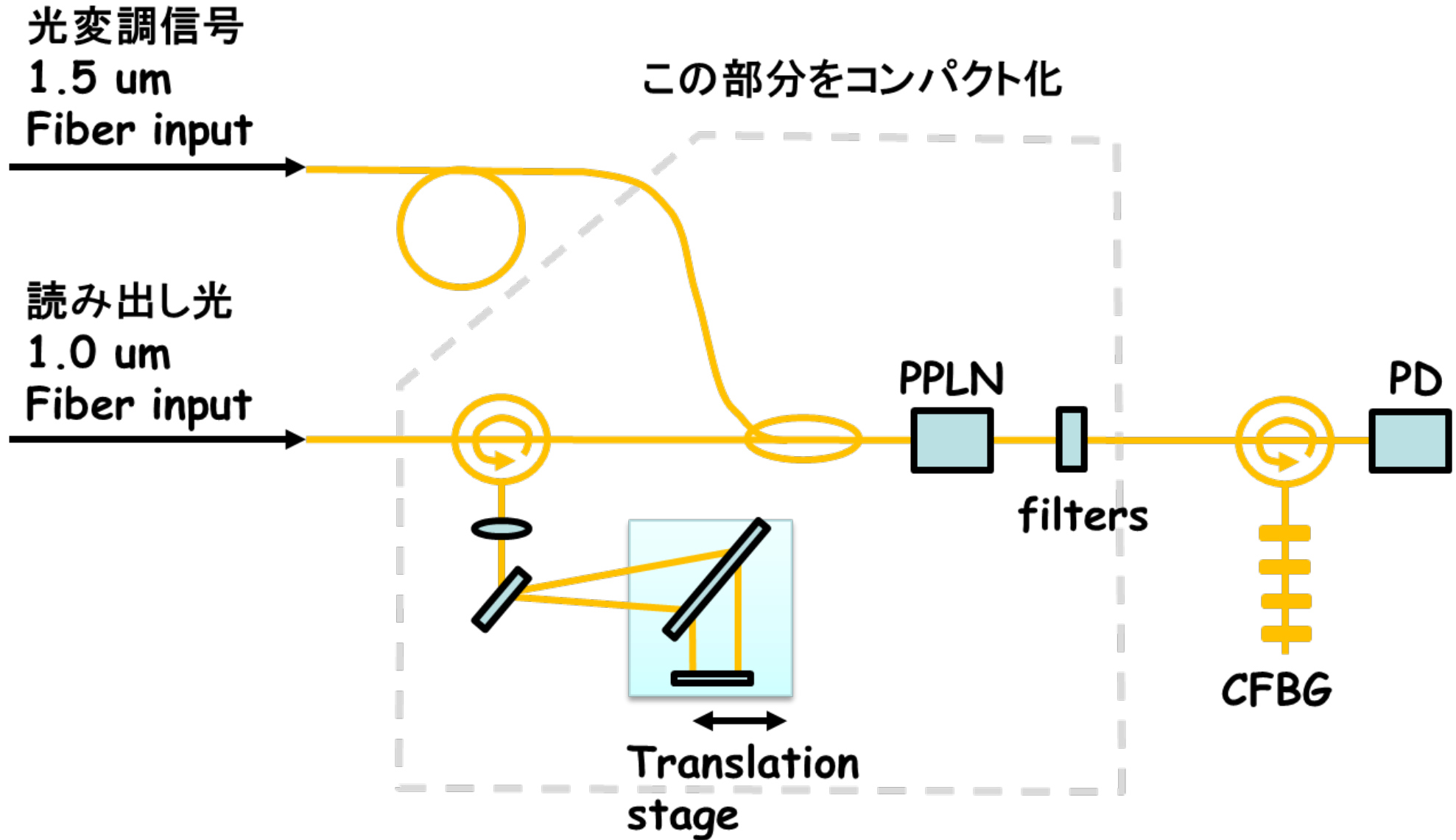


readout pulse (FWMH)
GDD = +0.7 ps²



readout pulse (FWMH)
GDD = +1.77 ps²

提案手法により、超高速のパルスプロファイルを1 ps程度の高い時間分解能と数十psの時間窓幅で計測できる。



提案手法により、超高速のパルスプロファイルをリアルタイム計測可能なデバイスを簡便な形で実証することができる。

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**シングルショット超高速光波形検出に成功**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**リアルタイム化**した。
- 本技術の適用により、従来の帯域を大幅に超えるリアルタイム波形検出を実証でき、**超広帯域光通信**や**超高速光コンピューティング**の評価、**光計測**への応用が可能になる。

実用化に向けた課題

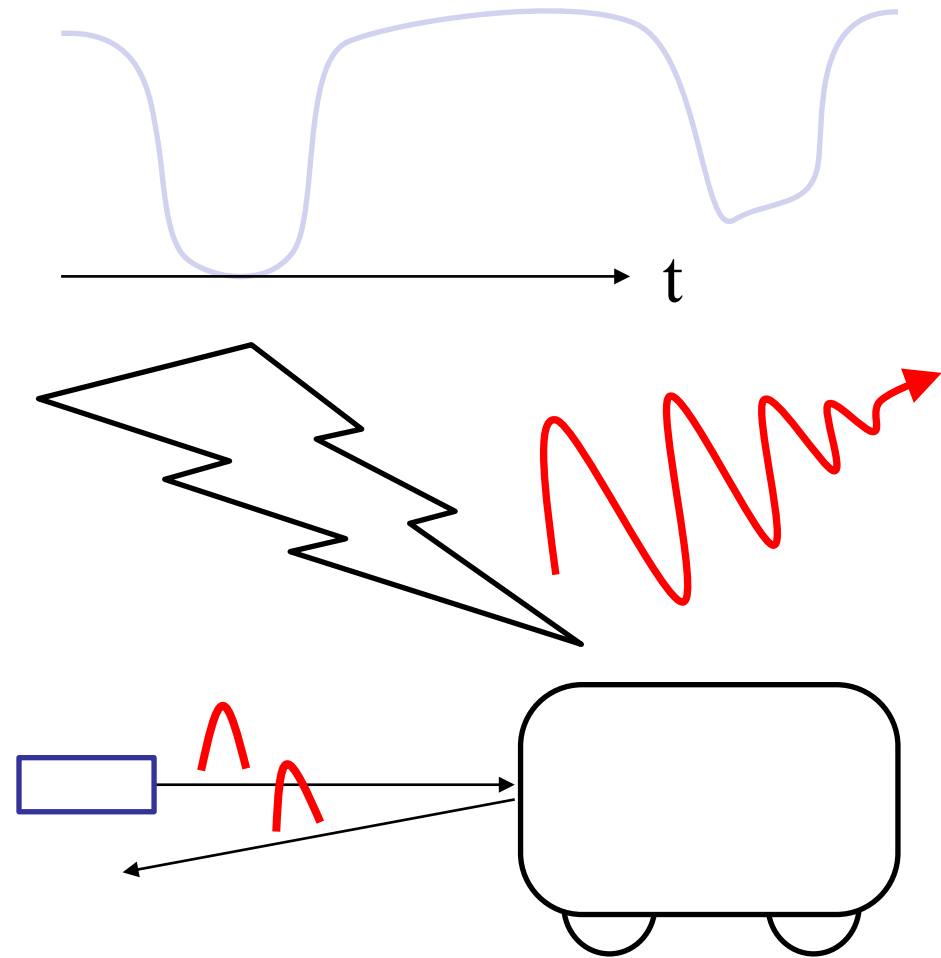
- ファイバーベースの測定系としてモジュール化や実装をすることができていない。
- 高感度な計測を行うための増幅技術や信号増強技術が未開拓
- 応用可能性はあるが、計測系の性能とコストに見合ったキラーアプリケーションが見つからない

将来展望

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

放電や破壊など、激甚現象からの光パルスの時間波形を計測可能

ピコ秒＝サブミリメートルの分解能のライダー技術



光通信の超高速信号をリアルタイムかつ簡単に計測できるようにすることで、光情報処理・情報通信分野に革新をもたらしたい。

想定される用途

- ファイバーベースのロバストで高感度な光学系を組むことで、超広帯域光通信における超高速波形評価装置を構築できる。
- 光を用いた超高速のコンピューティングにおいて、計算過程を可視化できる。
- ライダーをはじめとした距離計測や、様々な状況で発生する光の時間波形計測において高い時間分解能を実現できる。

企業への期待

- パルスファイバーレーザーとの組み合わせによるロバストな計測技術を実現し、デバイス化に共に取り組んでいただける企業の方との共同研究を希望。
- 光通信技術、半導体デバイス・光デバイス評価技術等、波形計測の応用につながる研究を行いたい。
- 超広帯域光通信や、超高速光コンピューティングの実現に貢献したい。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 波形検出システム、
波形検出方法
- 出願番号 : 特願2024-051777
- 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、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-2022年 KISTEC戦略シーズ育成事業
 - 2021年-2022年 NEDO若サポ
 - 2023年-2024年 KISTEC戦略シーズ育成事業
- 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

F A X : 045 - 339 - 3057

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