

2021年9月22日(水)

周波数シフトテラヘルツ波の発生と応用

千葉工業大学
 水津 光司

概要

■ 研究背景・研究目的

- テラヘルツ波の建築業界への応用
- テラヘルツ波による断層検査

■ 理論・原理

- 周波数シフト帰還型レーザー
 - 共振器構造
 - 発振スペクトル
- 距離計測法: OFDR

■ 実験・結果

- 周波数シフトテラヘルツ波発生
- 周波数シフトテラヘルツ波検出
- 距離計測のデモンストレーション

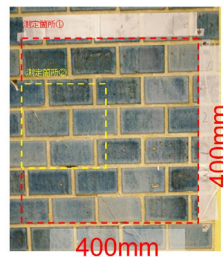
■ 結論・展望

壁面剥離などの診断

安心安全/文化財保護
 非破壊・非接触での内部状態検査



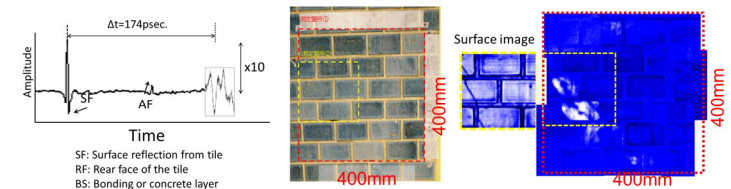
首都高速八重洲線トンネルタイル剥離
 (首都高速道路公団Web)



東日本大震災後の東北大学工学部
 (スペクトルデザイン社)

- ・ 震災等による壁面剥離状況
- ・ 橋梁コンクリート内部欠陥
- ・ コンクリート内部鉄骨状態
- ・ 古墳壁面剥離状況

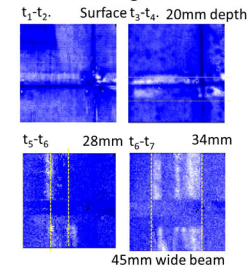
テラヘルツ波による断層像計測例



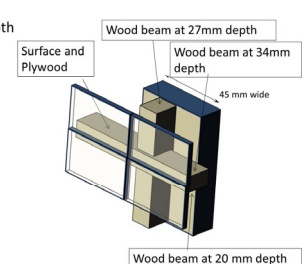
Scene of measurement



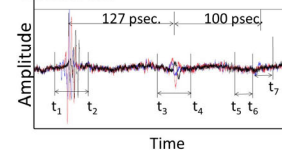
C-scan images of the tiled wall at different time gate



Configuration of wood frame



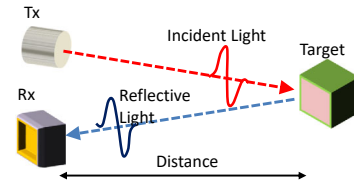
Reflected wave form from the wooden wall



碓智文, 福永香: 検査技術, 18 (2013) P.23.
 永妻忠夫, 福永香: 光技術コンタクト, 54 (2016) P.41.

テラヘルツ波による断層像計測の問題点

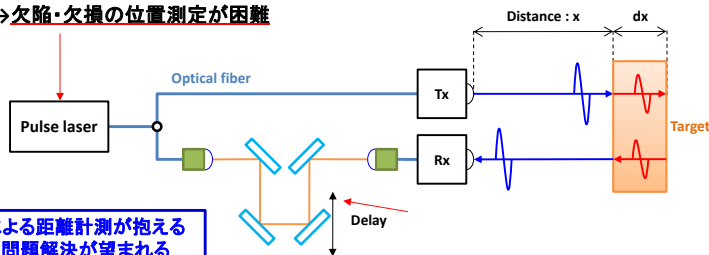
テラヘルツ時間領域分光法
THz-TDS(Terahertz-Time Domain Spectroscopy)
TOF(Time of Flight)測定
送波したTHz波パルスが測定対象で反射して
戻るまでの時間から距離を測定する方法



THz-TDSによるTOF計測の抱える問題点

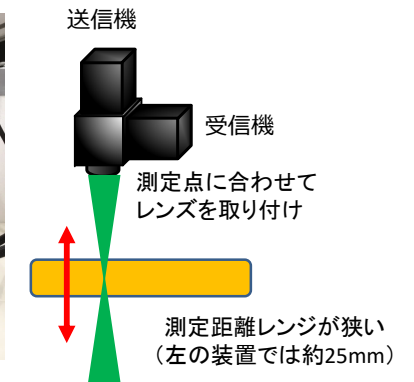
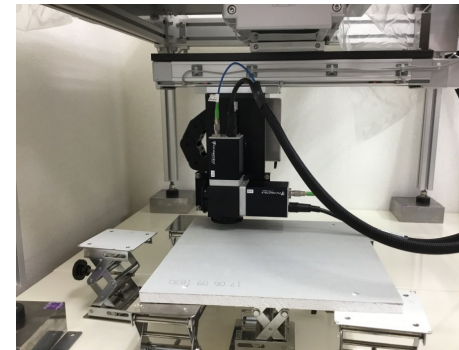
測定対象の材料に応じた周波数選択が不可能
→THz波パルスエネルギーの大部分が計測に関与しない
屈折率分散の強い測定対象ではパルス波形がくずれる
→欠陥・欠損の位置測定が困難

dx/距離分解能
ex)10[cm]/5[μm] = 20000点
→膨大なデータ取得の必要性
→広範囲な測定は困難



THz波による距離計測が抱える
これら問題解決が望まれる

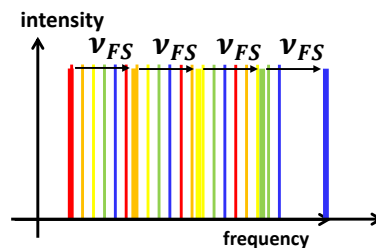
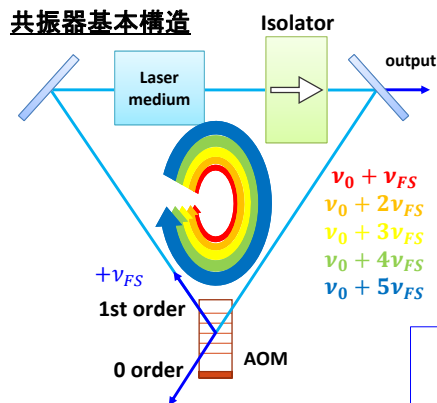
テラヘルツ波による断層像計測の問題点



あらかじめ測定点に合わせて
装置の測定位置を設定する必要

光領域の技術: FSFLレーザー

周波数シフト帰還型レーザー (Frequency Shifted Feedback Laser: FSF Laser)



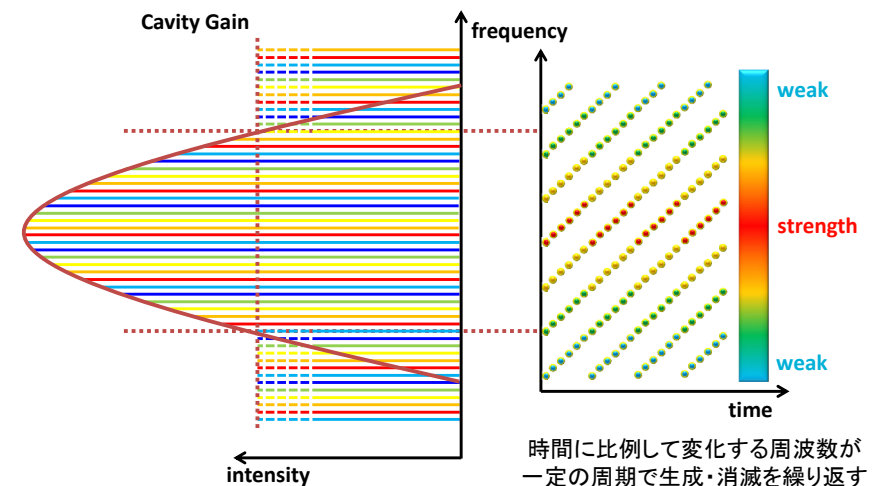
周波数シフト動作原理

周波数 ν_0 の光波が共振器内部を1周
→AOMで周波数が $+\nu_{FS}$ シフト
周波数 $\nu_0 + \nu_{FS}$ の光波が再び共振器内を1周
→AOMで周波数が $+\nu_{FS}$ シフト
 ν_{FS} はAOM駆動周波数 ν_{RF} と等しい

共振器内部を光波が循環するたび
周波数シフトを受けた光波が
利得媒質に帰還する構成

光領域の技術: FSFLレーザー

FSFLレーザーの発振スペクトルと瞬時周波数のイメージ (Moving Comb Model)

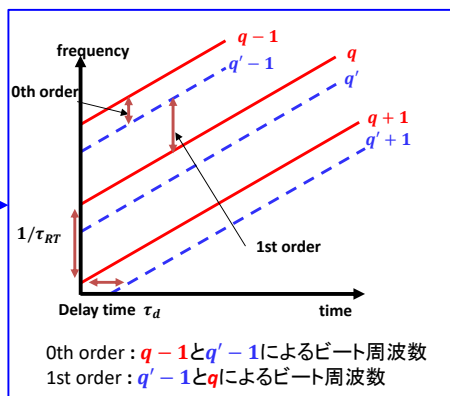
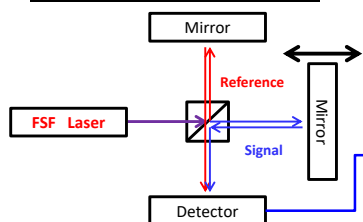


時間に比例して変化する周波数が
一定の周期で生成・消滅を繰り返す
周波数チャープコム構造

光領域の技術: FSFレーザー

光周波数領域リフレクトメトリ(Optical Frequency Domain Reflectometry: OFDR)

光源をFSFレーザーとした場合



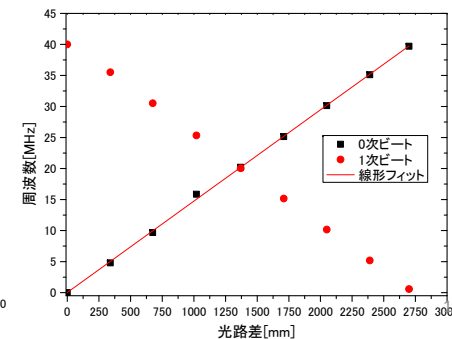
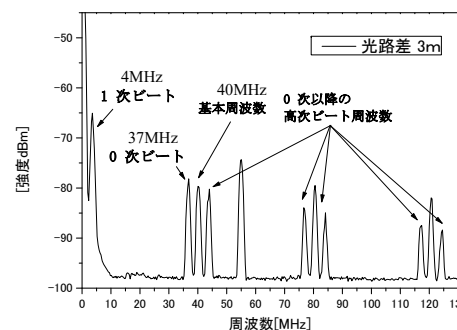
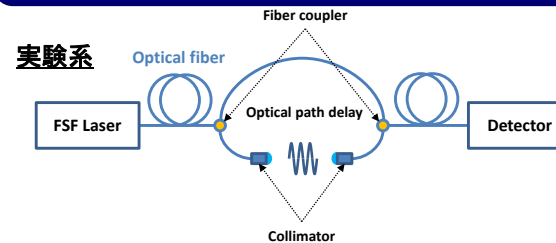
SignalとReferenceとの光路差により
周波数差(=ビート周波数) f_B 発生

$$f_B(t) = \frac{v_{FS}}{\tau_{RT}} \tau_d - \frac{m}{\tau_{RT}} \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

$\frac{1}{\tau_{RT}}$: 縦モード周波数
 v_{FS} : 周波数シフト量
 m : ビート次数

周波数領域はビート周波数の領域にダウンコンバート
→電波帯の習熟した計測器を用いることが可能

光領域の技術: FSFレーザー



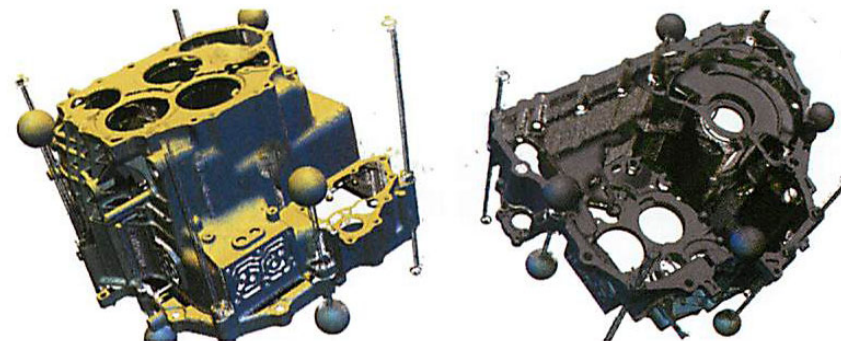
3Dイノベーション社



- FSFレーザーを使用した光距離計測
- 東北大学ベンチャー企業(H22年~)
⇒FSFレーザー開発
⇒距離計測装置

FSFレーザーによる距離計測例

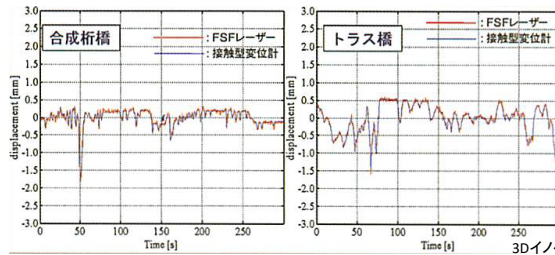
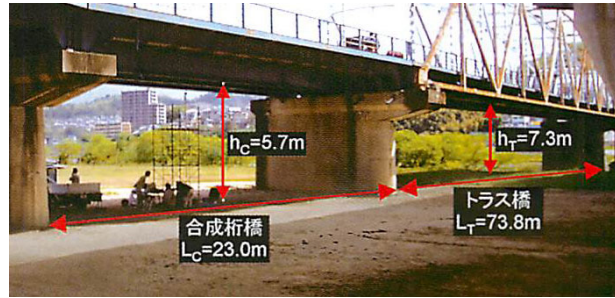
FSFレーザーによる エンジンブロックの距離計測例



広いワークエリアが要求される
大型・複雑な形状も一括計測が可能

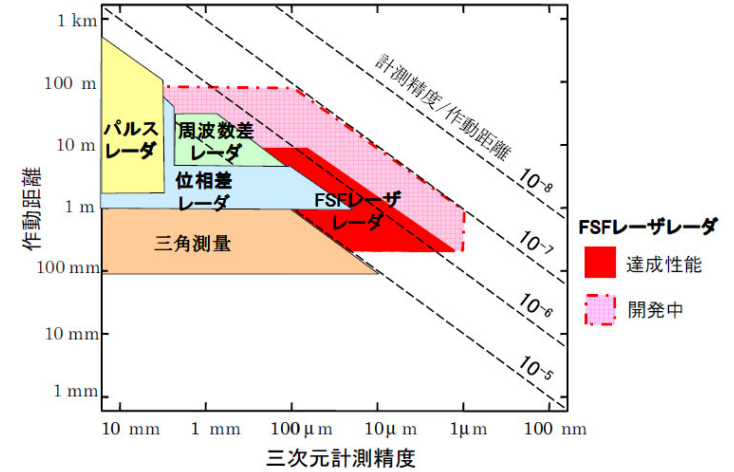
FSレーザーによる距離計測例

橋梁の振動リアルタイム計測



遠隔からでも
高速・高精度で
距離測定
(位置測定)が可能

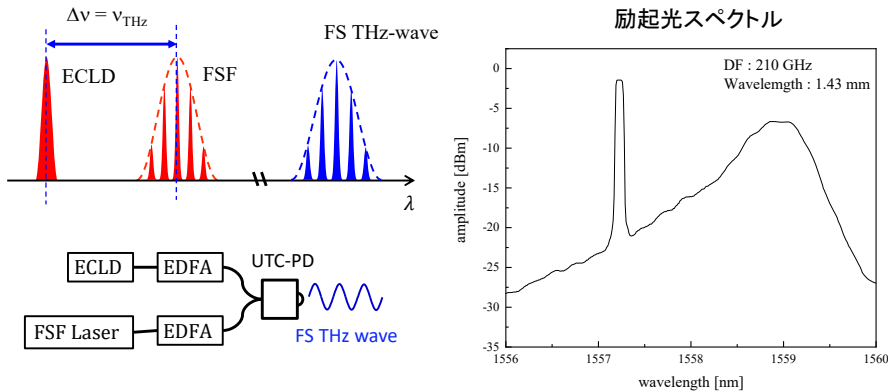
レーザー(光)による距離計測法



株式会社3Dイノベーション

周波数シフトテラヘルツ波の発生

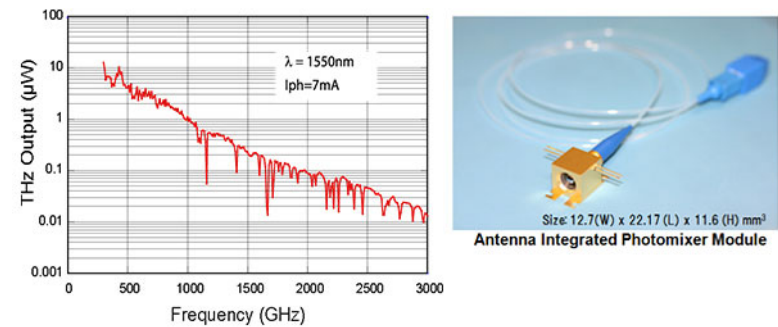
FSレーザー光と単色レーザー光の光混合



UTC-PDによりテラヘルツ波発生

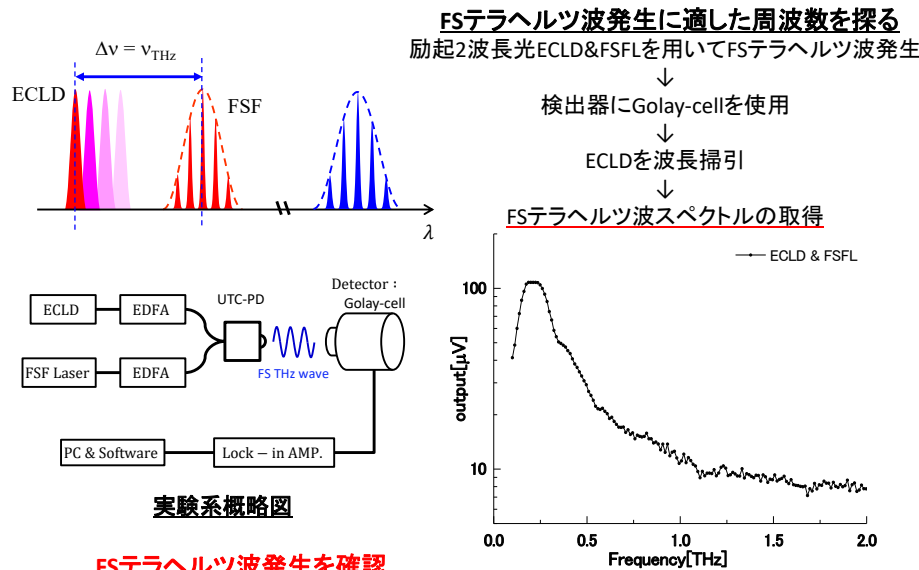
UTD-PD

アンテナ集積UTCフォトミキサ(準光学タイプ)

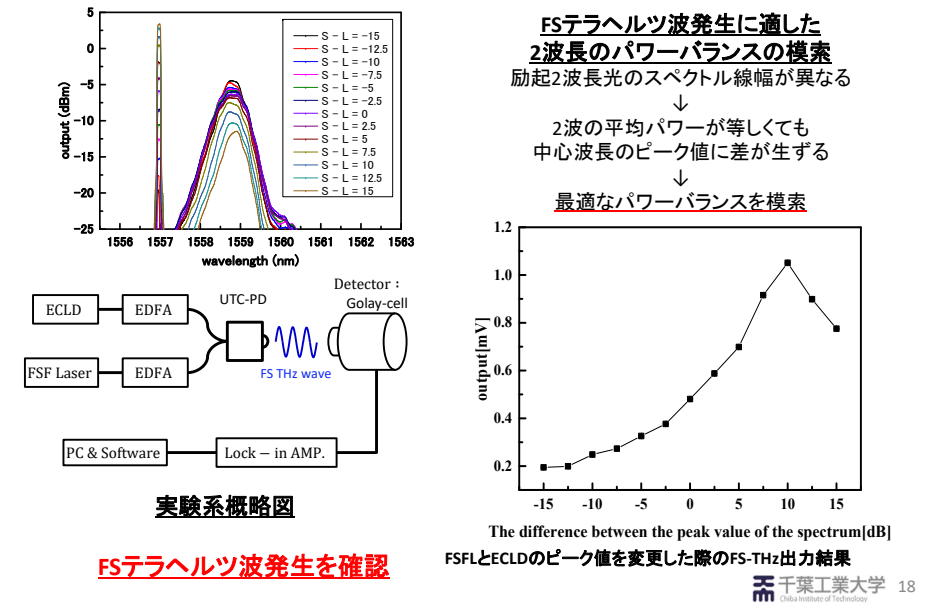


	Min	Typ	Max	Unit
THz出力周波数範囲	200	-	1500	[GHz]
THz出力	-30.0	-24.0	-	[dBm]
駆動光源波長	1540	-	1560	[nm]
バイアス電圧	-2.5	-1.5	-1.0	[V]

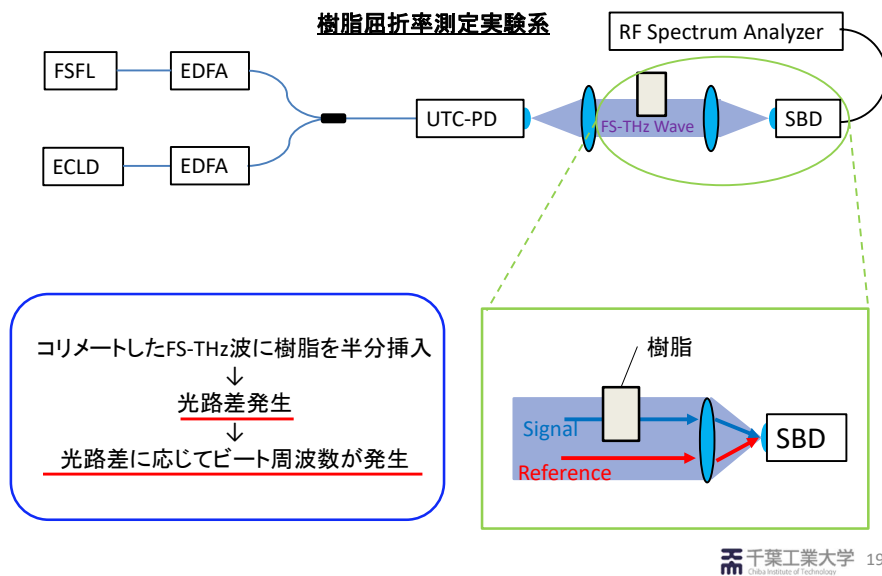
周波数シフトテラヘルツ波の発生



周波数シフトテラヘルツ波の発生

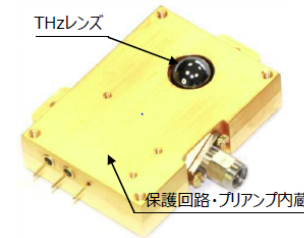


ビート周波数の観測



ビート周波数の観測

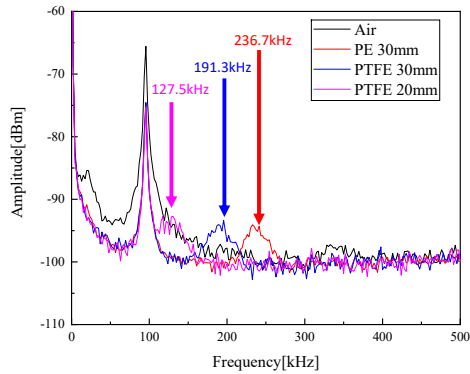
THz帯SBD (Schottky barrier diode)



- 【特長】
- 広帯域
 - 高速応答
 - 常温動作
 - プリアンプ・保護回路内蔵
 - THzレンズ付属
- 【用途】
- 時間領域分光法
 - テラヘルツイメージング
 - テラヘルツパルスモニタリング

アンテナ	ログスバイラルアンテナ, 50-2500 GHz 帯	
プリアンプ型番	Type 1	Type 2
プリアンプ帯域	DC-1MHz	1M - 4 GHz
応答特性	22,000V/W (@70 GHz) 1,100 V/W (@1THz)	260 V/W (@70 GHz), 17 V/W (@1 THz)
最小 NEP	6 pW/Hz ^{1/2} (@70GHz)	38.8 pW/Hz ^{1/2} (@100GHz)
シリコンレンズ	直径 12 mm, コリメートビーム	
プリアンプ駆動電圧	11-15 V, <100 mA	

ビート周波数の観測



λ_1 (ECLD)=1556.28nm
 λ_2 (FSFL)=1558.26nm±0.5nm
 ν_{THz} =244.8GHz±60GHz
 λ_{THz} =1.225mm(0.98mm~1.62mm)

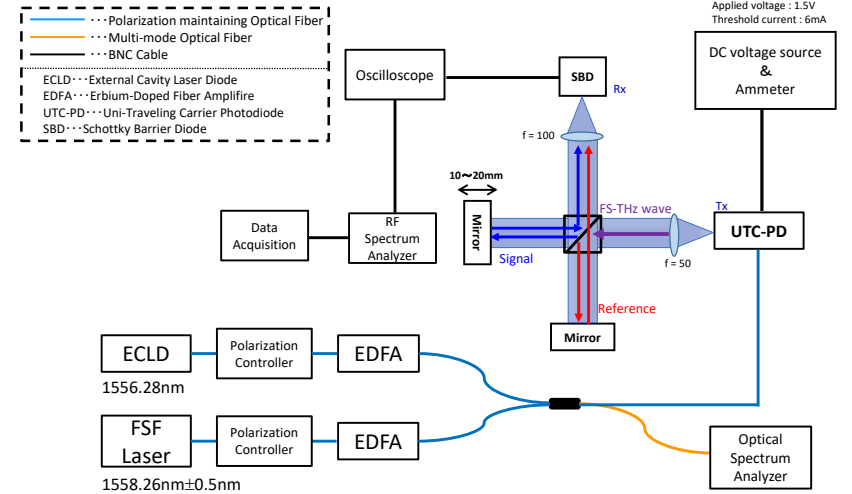
周波数シフト特性: 14.6kHz/mm

樹脂部と空気部の光路差: $L_d * (n_p - 1)$

$$n_p = \frac{L_T}{L_d} + 1$$

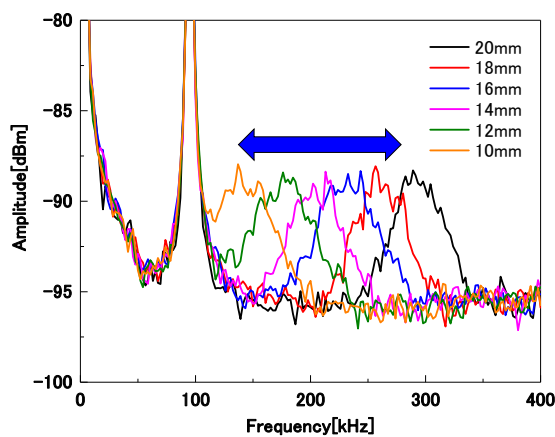
material	Frequency	Path difference	Thickness	Index of Refractive
PTFE	127.5kHz	8.73 mm	20 mm	1.437
PTFE	191.3kHz	13.1 mm	30 mm	1.437
PE	236.7kHz	16.2 mm	30 mm	1.540

FSテラヘルツ波による距離計測



Experimental setup for Detection of a FS-THz wave

FSテラヘルツ波による距離計測

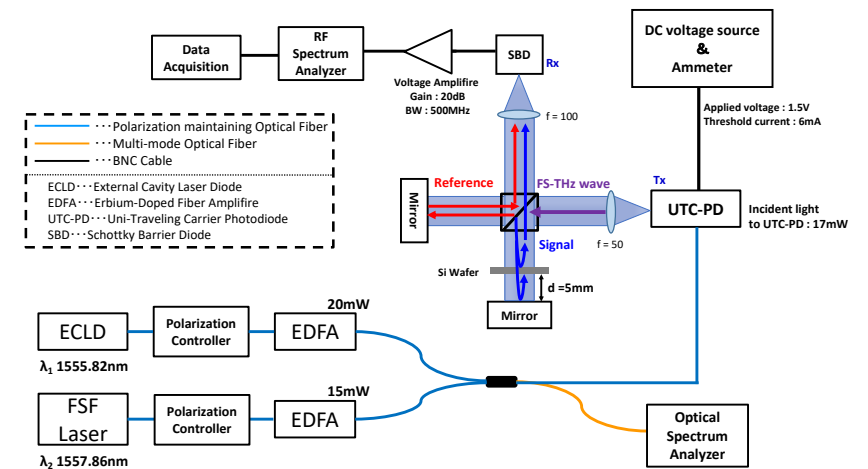


λ_1 (ECLD)=1556.28nm
 λ_2 (FSFL)=1558.26nm±0.5nm
 ν_{THz} =244.8GHz±60GHz
 λ_{THz} =1.225mm(0.98mm~1.62mm)

Path difference	Calculated	Experiment
10mm	146.0kHz	147.8kHz
12mm	175.2kHz	173.9kHz
14mm	204.4kHz	204.3kHz
16mm	233.6kHz	230.4kHz
18mm	262.8kHz	260.9kHz
20mm	292.0kHz	291.3kHz

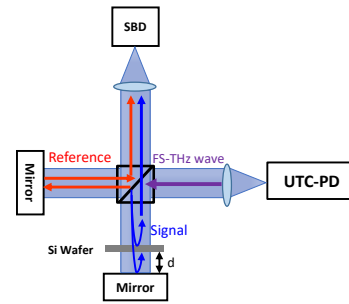
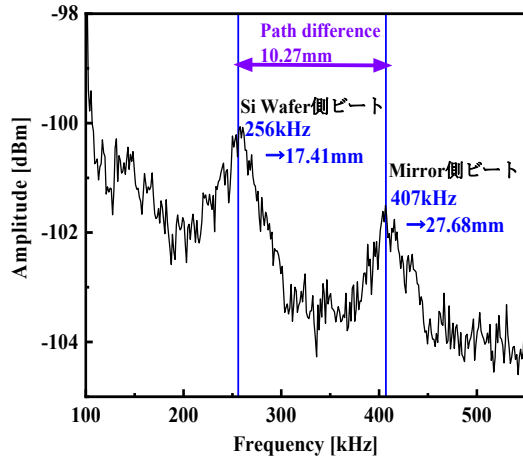
光路差に応じたビート周波数を確認

FSテラヘルツ波による距離計測



Experimental setup for Detection of a FS-THz wave

FSテラヘルツ波による距離計測



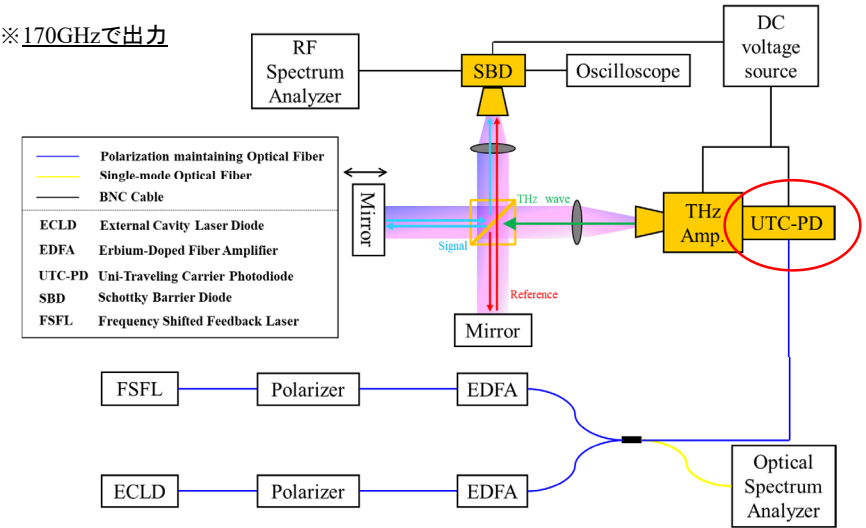
- シリコンウエハとミラー間の距離dの設定値: 5.0mm
- ビート周波数スペクトルより算出

$$d = \frac{10.27\text{mm}}{2} = 5.135\text{mm}$$

多点からの反射によるビートの同時計測

ビート信号SN比の改善

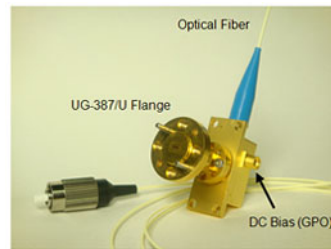
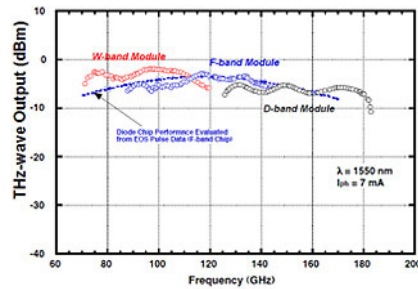
※170GHzで出力



Experimental setup for Detection of FS-THz wave

UTD-PD

矩形導波管出力UTCフォトミキサモジュール

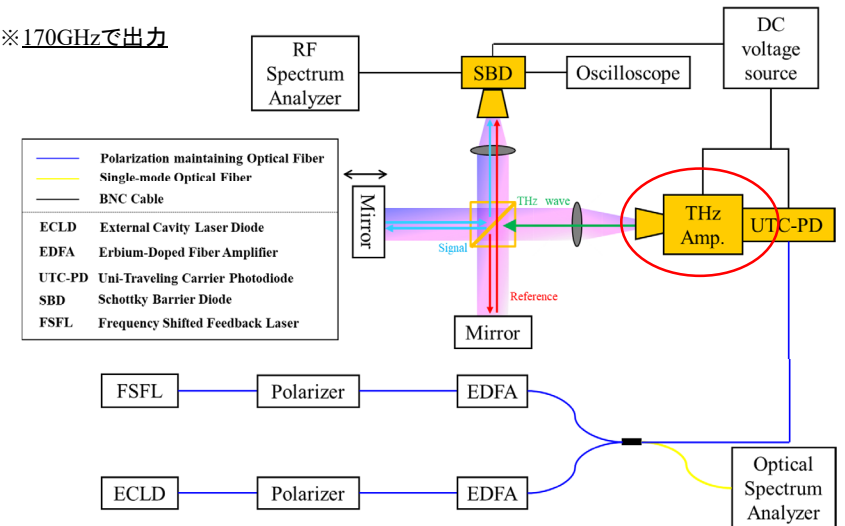


IOD-PMD-14001

	Min	Center	Max	Unit
THz出力周波数範囲	110	140	170	[GHz]
THz出力	-9.0	-6.0	-	[dBm]
駆動光源波長	1540	-	1560	[nm]
バイアス電圧	-2.5	-1.5	-1.0	[V]

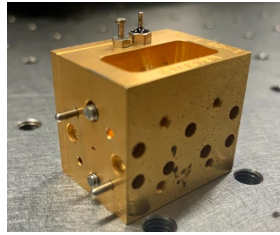
ビート信号SN比の改善

※170GHzで出力



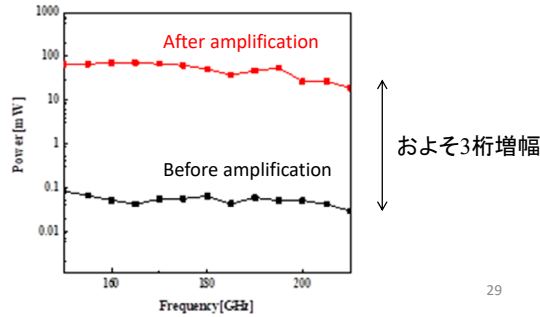
Experimental setup for Detection of FS-THz wave

THzアンプ (MMIC)



Parameter	Specifications
Amplifier Input and Output	170-260GHz; WR-4.3
DC Input	+5V / ~550mA
Amplifier Gain (typ.)	~18dB
Input Return Loss (typ.)	-10dB
Input Damage Limit	+6dBm

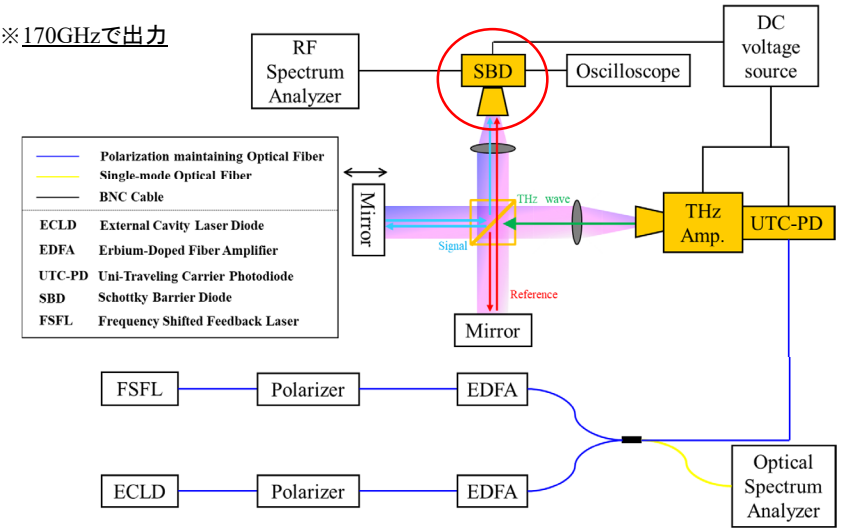
THzアンプを2台カスケードに接続



29

ビート信号SN比の改善

※170GHzで出力

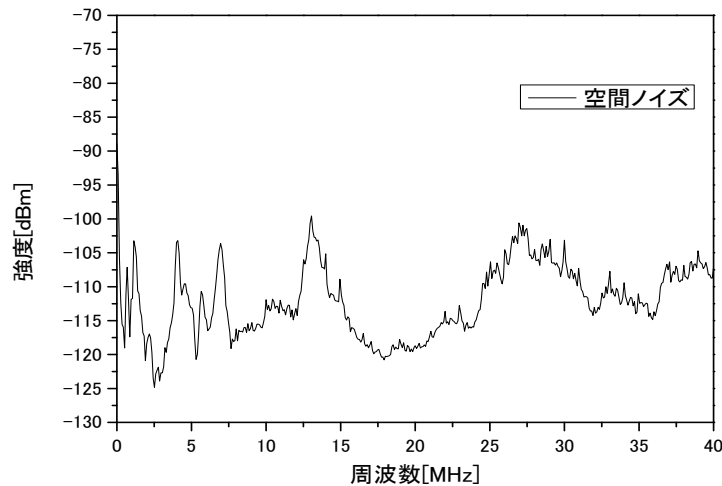


Experimental setup for Detection of FS-THz wave

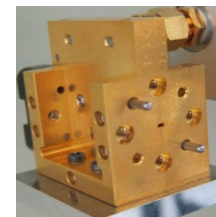
30

周囲環境雑音

RFスペアナにBNCケーブルを接続した状態でのスペクトル測定

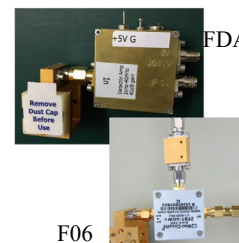


SBDおよび電流アンプ



Virginia Diodes 製 ZBD

Antenna		波状アンテナ
RF Frequency		140 ~ 220 [GHz]
Maximum RF Input Power	Recommended	0 dBm
	/ Damage	/ 5 dBm
Typical Responsivity	ZBD	2400 [V/W]
	ZBD-F	2300 [V/W]
Typical NEP	ZBD	11.0 [pW/√Hz]
	ZBD-F	1.1 [pW/√Hz]



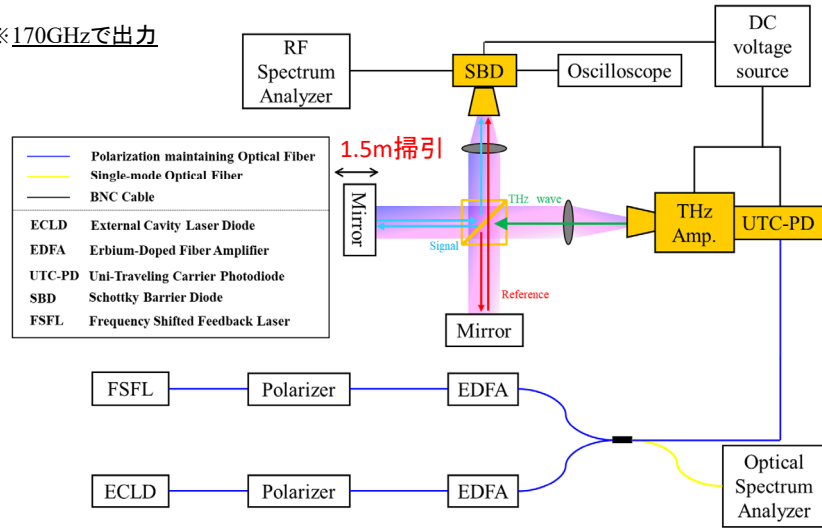
F06

Amplifier	Frequency	Gain	Bias Voltage
ZBD-FDA	~2kHz to ~40MHz	~30-40dB	+5V(~50mA)
ZBD-F06	~50MHz to ~6GHz	~15dB	+5V(~80mA)

32

ビート信号SN比の改善

※170GHzで出力



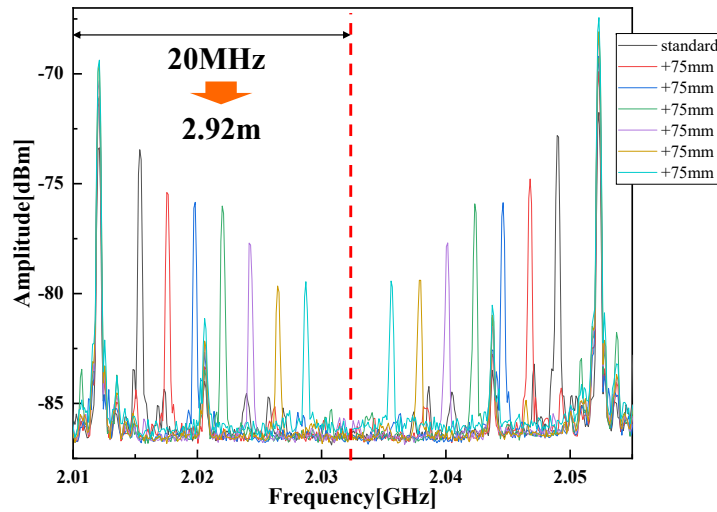
Experimental setup for Detection of FS-THz wave

33

長距離測定

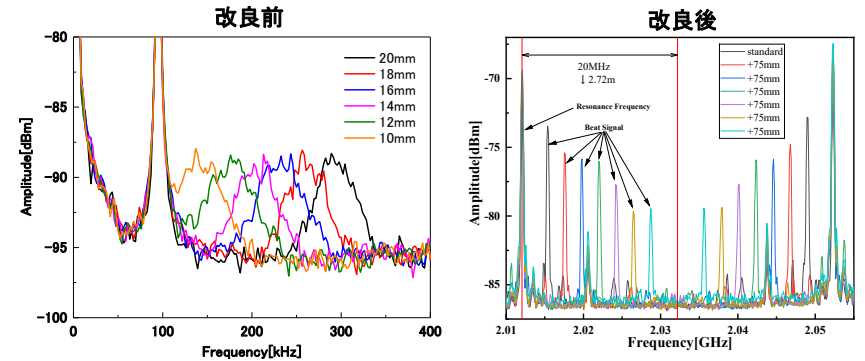


長距離測定



約3mのレンジを一括測定

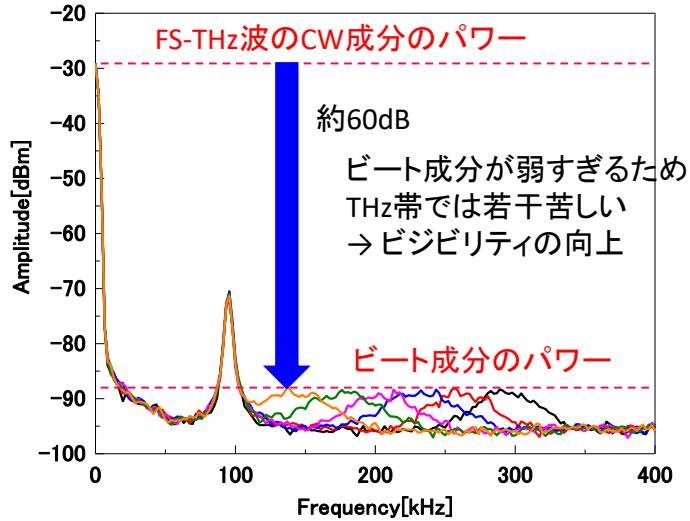
ビート信号SNおよび計測時間の改善



	改良前	改良後
Amplitude	7dBm	14dBm
Span	300kHz (100~400kHz)	50MHz (2.007~2.057GHz)
Optical pass length	20mm	2.92m
Measurement time	204s	20s

36

現状の大きな問題



FSレーザーの動作原理

Optics Communications 284 (2011) 4965–4970



Contents lists available at ScienceDirect

Optics Communications

journal homepage: www.elsevier.com/locate/optcom



The hypothesis of the moving comb in frequency shifted feedback lasers

H. Guillet de Chatellus*, E. Lacot, W. Gastre, O. Jacquin, O. Hugon

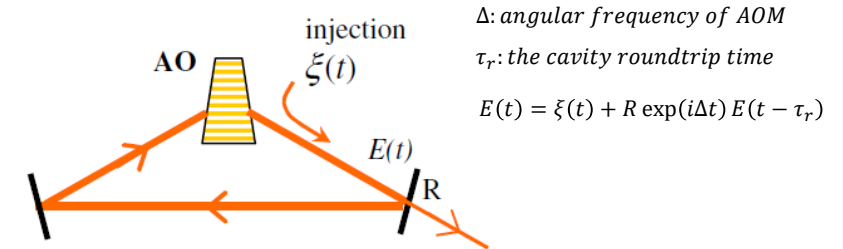


Fig. 2. Sketch of the passive cavity model (PCM).

FSレーザーの動作原理

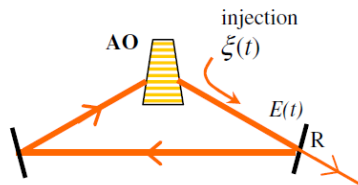


Fig. 2. Sketch of the passive cavity model (PCM).

- パッシブキャビティモデル
- ・共振器内にゲイン媒質が無い
 - ・何らかのシード光を注入
 - ・周回毎にAOMによる周波数シフト

$$E(t) = \xi(t) + R \exp(i\Delta t) E(t - \tau_r)$$

$$E(t) = \sum_{n=0}^{\infty} R^n \xi(t - n\tau_r) \exp\left(i\left(n\Delta t - \frac{n(n+1)}{2} \Delta\tau_r\right)\right)$$

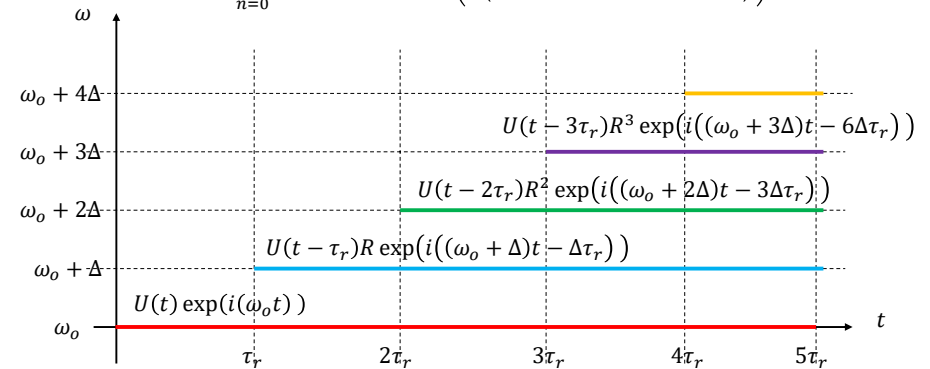
シード光として角周波数 ω_0 の単色光を考える

$$\xi(t) = \cos(\omega_0 t)$$

$$E(t) = \sum_{n=0}^{\infty} U(t - n\tau_r) R^n \exp(i\omega_0 t) \exp\left(i\left(n\Delta t - \frac{n(n+1)}{2} \Delta\tau_r\right)\right)$$

FSレーザーの動作原理

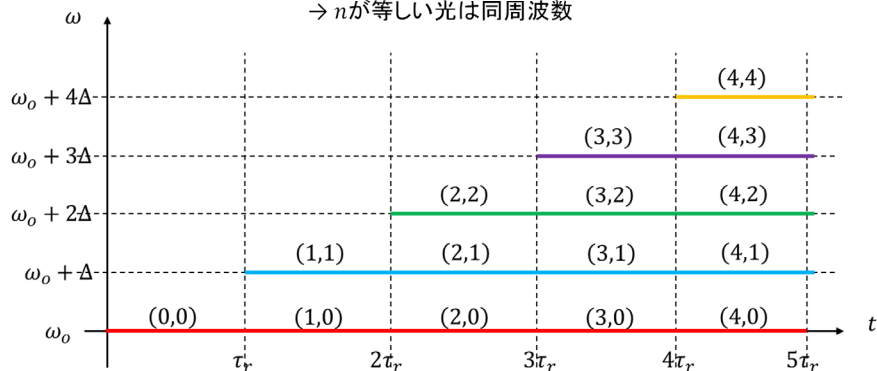
$$E(t) = \sum_{n=0}^{\infty} U(t - n\tau_r) R^n \exp\left(i\left((\omega_0 + \Delta)t - \frac{n(n+1)}{2} \Delta\tau_r\right)\right)$$



Guilletのモデルでは共振器周回数 n をパラメータとして
周波数変化時の位相変化を考慮し
周波数差 Δ の光波の集合としてモデル化

Guilletモデルの拡張

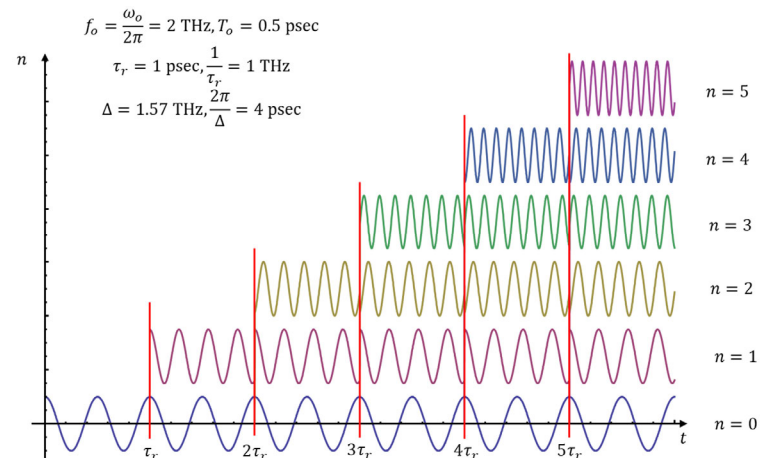
周波数シフト回数を n
 ラウンドトリップ時刻を m とし
 各時刻および周波数の光波を (m, n) で分ける
 → m が等しい光は同時刻に存在
 → n が等しい光は同周波数



$l = m - n$ が等しい光波群は
 起源となるシード光が等しい

光波群の位相関係

$$E(t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^m (U(t - m\tau_r) - U(t - (m+1)\tau_r)) R^n \exp(i(\omega_0 + n\Delta)t) \exp\left(-i\left(\frac{n(n+1)}{2} + n(m-n)\right)\Delta\tau_r\right)$$

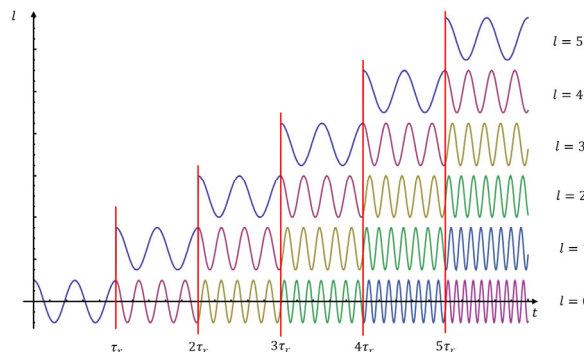


$n = 0$ はシード光、位相は連続
 $n \neq 0$ の光は τ_r 毎に位相シフト

FSレーザーの動作原理

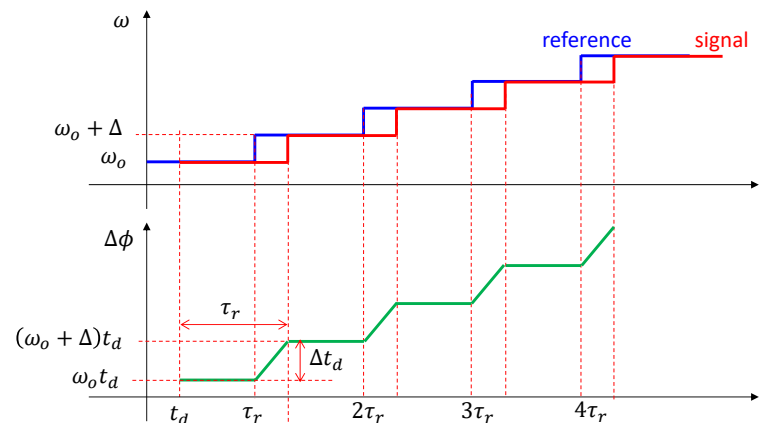
$$E(t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^m (U(t - m\tau_r) - U(t - (m+1)\tau_r)) R^n \exp(i(\omega_0 + n\Delta)t) \exp\left(-i\left(\frac{n(n+1)}{2} + n(m-n)\right)\Delta\tau_r\right)$$

この式で表現される電磁波の中に
 自己相関時に
 距離に比例する周波数成分を持つ成分が存在(するはず)



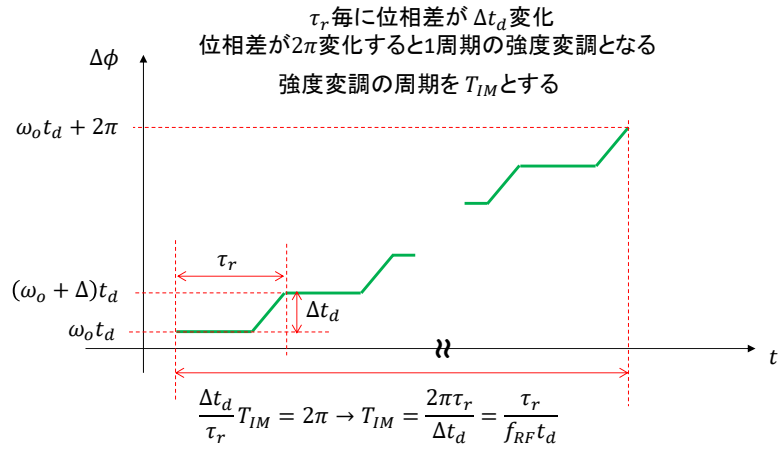
$l = 0$ の成分に着目
 自己相関を考える

周波数と位相差の時間特性



- ・階段状に周波数が変化
- ・2光路に分けた場合の時間ずれを考慮
- ・Signal光とReference光の位相差に着目

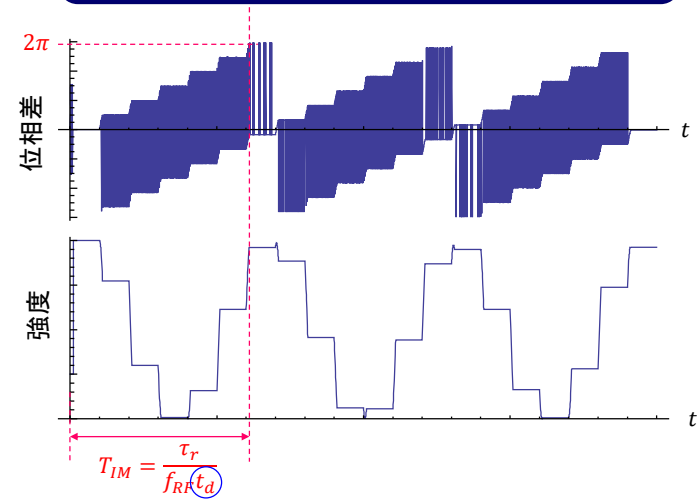
FSFレーザーの動作原理



強度変調の周波数を f_{IM} とすると

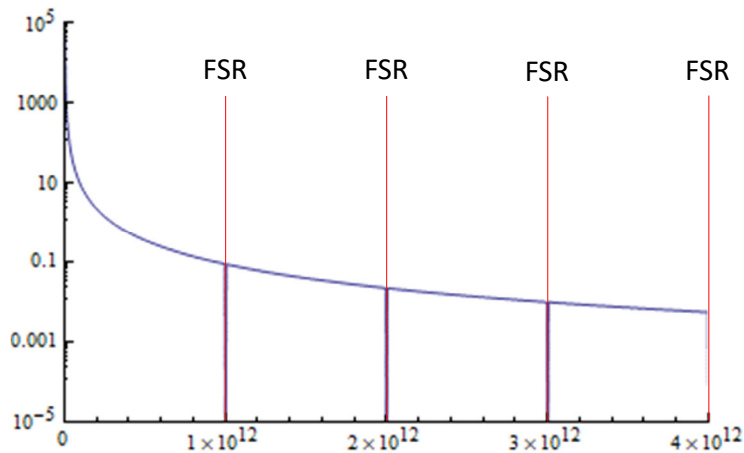
$f_{IM} = f_{RF} \frac{t_d}{\tau_r}$ 遅延時間に比例した周波数成分

計算例



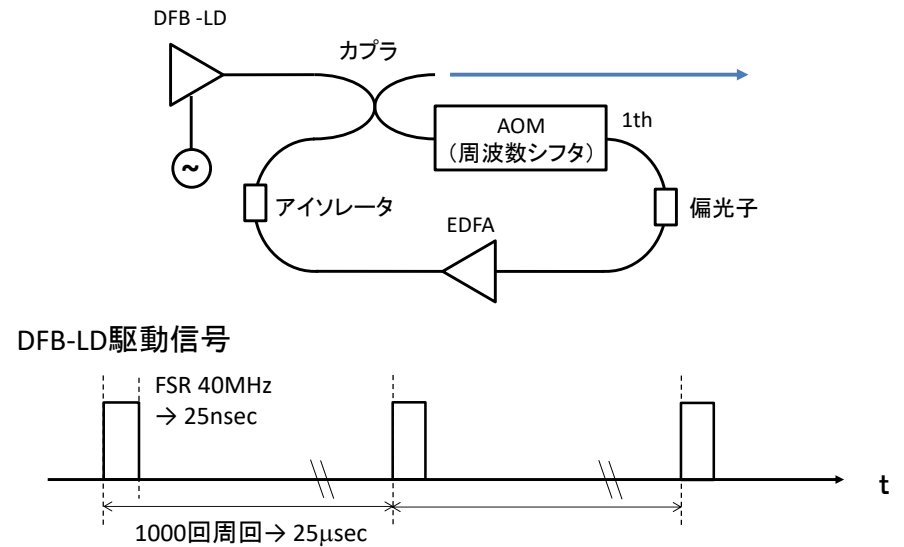
遅延時間に対応した強度変化が生じる
 $L=0$ の成分だけを抜き出すとビジュビリティが非常に高い

計算例



遅延時間に比例してビート周波数が変化

新規FSFレーザーの構成



結論・展望

結論

- FSFレーザーを励起光源としたFSテラヘルツ波発生を確認
- FSFレーザーの特性が転写されたFSテラヘルツ波によるビート信号を観測
→FSテラヘルツ波光源の開発に成功
- FSテラヘルツ波による距離計測のデモンストレーション

展望

- より簡便な実験系構築
→FS-THz波をEO検出することにより光学実験系を簡便
- ビート信号効率の向上
→FSFレーザーの動作原理解明
→新機構のFSFレーザーの導入

謝辞

スペクトルデザイン社
深澤亮一様, 碓智文様

3Dイノベーション社
伊藤弘昌先生, 原武文様

千葉工業大学
M2 本條実, M1 野村悠介
OB 小石川将晃, 南部広樹, 栗原貴大, 山口雅輝

STEM関係者各位

コンソ研究会
株式会社熊谷組, 大和ハウス工業株式会社, 積水化学工業(株),
株式会社ジャスト, 積水ハウス株式会社, 住友林業(株),
ミサワホーム株式会社, (株)長谷工コーポレーション

【和文】本研究はJSPS 科研費 JP18H03827 の助成を受けたものです。