

平成 29 年度 博士学位論文

テラヘルツ波パラメトリック発生  
及び応用に関する研究

**A study on injection-seeded terahertz-wave  
parametric generation and applications**

名古屋大学大学院工学研究科

電子情報システム専攻

村手宏輔



# 目次

第1章 序論.....	5
1.1 研究の背景.....	5
1.2 本研究の目的と構成.....	8
第2章 is-TPGによるテラヘルツ波発生、検出原理.....	10
2.1 はじめに.....	10
2.2 テラヘルツ波パラメトリック発生で用いる非線形光学効果.....	10
2.2.1 非線形光学効果とは.....	10
2.2.2 光パラメトリック効果.....	11
2.2.3 誘導ラマン散乱.....	12
2.3 テラヘルツパラメトリック発生.....	13
2.3.1 フォノンポラリトンを介したテラヘルツ波パラメトリック発生.....	13
2.3.2 パラメトリック利得.....	16
2.4 光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生器 (is-TPG) による 高出力テラヘルツ波発生.....	18
2.4.1 位相整合条件.....	19
2.4.2 光注入による高出力化.....	19
2.4.3 アクロマティック光学系による広帯域連続波長可変.....	20
2.4.4 マイクロチップ Nd:YAG レーザーの導入による高出力化.....	22
2.5 is-TPGによるテラヘルツ波検出.....	22
2.5.1 テラヘルツ波の光注入による近赤外光の発生.....	23
2.5.2 位相整合条件による検出光の発生角変化.....	23
2.5.3 近赤外光検出器による違い.....	24
2.6 本章のまとめ.....	25
第3章 is-TPGを用いた高ダイナミックレンジ分光システム.....	26
3.1 はじめに.....	26
3.2 高ダイナミックレンジ化手法.....	26
3.2.1 高ダイナミックレンジ分光システムの実験系.....	26
3.2.2 従来のシステムを用いたスペクトル測定結果.....	28
3.2.3 ダイナミックレンジの改善結果.....	30

3.3	分光システムの広帯域化.....	31
3.3.1	従来の帯域制限要因および解決法.....	31
3.3.2	周波数帯域の広帯域化の実験系.....	34
3.4	is-TPG を用いた分光イメージング.....	36
3.4.1	測定方法.....	36
3.4.2	主成分分析法.....	36
3.4.3	実験結果.....	37
3.5	本章のまとめ.....	41
第4章	is-TPG による多波長発生.....	42
4.1	はじめに.....	42
4.2	多波長テラヘルツ波発生および検出方法.....	42
4.2.1	多波長テラヘルツ波発生.....	42
4.2.2	多波長テラヘルツ波検出.....	43
4.3	複数台の ECLD を利用した多波長テラヘルツ波発生.....	44
4.3.1	2 台の ECLD を利用した 2 波長テラヘルツ波発生.....	44
4.3.2	増幅器の四光波混合を利用した多波長テラヘルツ波発生.....	49
4.3.3	5 台の ECLD を用いた 5 波長テラヘルツ波発生.....	53
4.4	多波長テラヘルツ波同時発生を用いた 1 ショットリアルタイム分光測定... ..	54
4.5	本章のまとめ.....	56
第5章	高安定リアルタイム分光システム.....	57
5.1	はじめに.....	57
5.2	is-TPG の不安定要因.....	57
5.3	高安定化方法.....	57
5.4	単一波長発生時の高安定化.....	58
5.4.1	サンプル測定光とレファレンス光の相関.....	58
5.4.2	安定化処理結果.....	60
5.5	3 波長発生時の高安定化.....	61
5.5.1	サンプル測定光とレファレンス光の相関.....	61
5.5.2	安定化処理結果.....	64
5.6	本章のまとめ.....	66
第6章	高利得テラヘルツ波パラメトリック増幅システム.....	67

6.1	はじめに.....	67
6.2	テラヘルツ波のパラメトリック増幅法.....	67
6.3	従来手法によるテラヘルツ波のパラメトリック増幅.....	68
6.3.1	従来手法の実験系および実験結果.....	68
6.3.2	従来の問題点.....	71
6.4	新型増幅器による高利得テラヘルツ波 パラメトリック増幅.....	74
6.4.1	新たな増幅手法の導入.....	74
6.4.2	新型増幅器実験系.....	76
6.4.3	新型増幅器を用いた増幅結果.....	77
6.4.4	スキャンニング・ファブリペローエタロンによる 増幅テラヘルツ波の波長測定.....	81
6.5	連続波テラヘルツ波光源のパルス増幅.....	82
6.6	本章のまとめ.....	84
第7章	結論.....	85
参考資料	.....	87
発表リスト	.....	93
謝辞	.....	106



# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

電波と光波の中間に位置するテラヘルツ (THz) 波 (図 1.1) は、電波のように紙やセラミクス、プラスチックなど様々な物質に対する透過性と、光波のようにレンズやミラーで取り回すことが可能といった特徴を併せ持つ[1], [2]。さらにテラヘルツ波周波数帯には、多くの物質の分子の振動、回転エネルギーや分子間相互作用エネルギーに由来する特徴的なスペクトル構造 (指紋スペクトル) が存在することや、波長が数十から数百  $\mu\text{m}$  オーダーに相当するため応用目的によってはイメージングに十分な分解能をもつこと、X線などの被曝の恐れがある電磁波とは異なり、エネルギーが低いため生体安全性が高いといった特徴を持つ。物質透過特性はおよそ 3 THz 以下の周波数で顕著であり、また様々な試薬類が指紋スペクトルを呈する領域は主に 0.5 THz 以上の帯域であり、工学や物理学を始めとし医学、バイオ、環境学、農学、通信などの分野において、物体の透過イメージングやトモグラフィ、ガスセンシング、物性計測、非破壊検査、高速テラヘルツ通信など多くの応用展開が期待されている[3]-[8]。

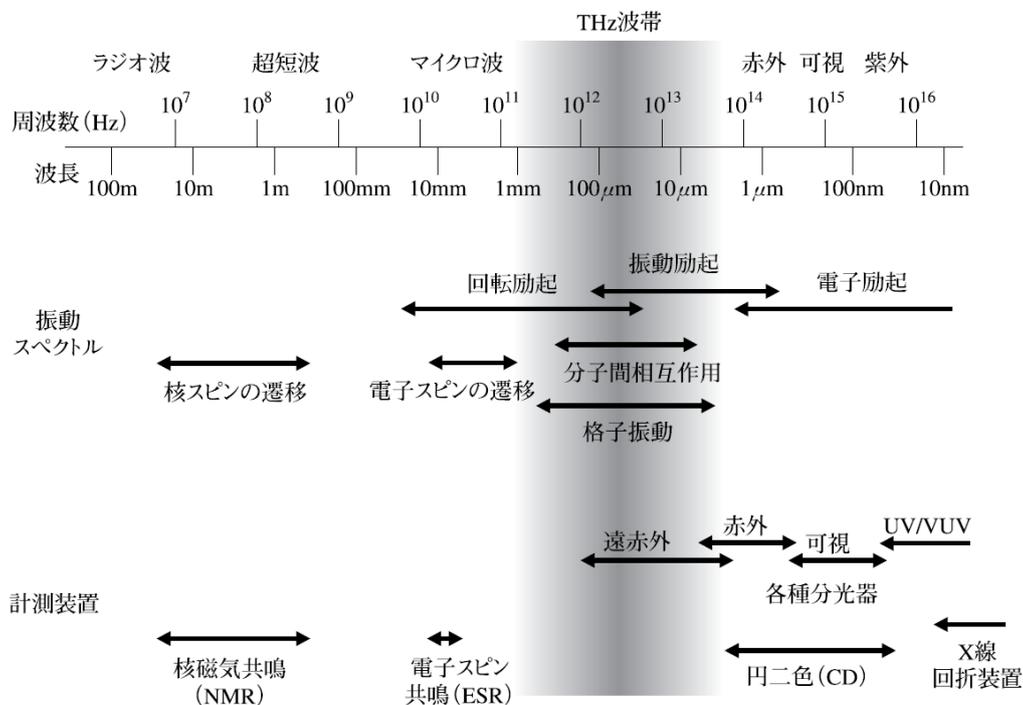


図 1.1 各周波数帯域における電磁波の呼称[1]

しかし、電波と光波の中間に位置するゆえ、光源や検出器の開発が遅れており、産業応用が進んでいない[2]。図 1.2 に従来の代表的なテラヘルツ波光源とその出力特性を示す。この図から明らかなように 0.5~10 THz の領域において高出力な光源が存在せず、この谷間をテラヘルツギャップと呼んでいる[2], [9], [10]。このギャップを埋めるために、電波帯で電子回路をベースとしたガン、インパット、共鳴トンネルダイオード (RTD) [11]等のダイオードおよびその逡倍技術[12]により高周波側へ、光波帯ではレーザー技術と非線形光学素子による周波数変換や量子カスケードレーザー[13]により低周波側へ、それぞれの発生可能な周波数帯域の拡大がなされてきた。近年では自由電子レーザー (FEL: Free Electron Laser) [14]や、パルス面をチェレンコフ位相整合角に傾斜させた高出力超短パルスレーザーを非線形光学結晶に入射し、光整流効果 (OR) によりテラヘルツ波を発生する手法[17]–[19]などにより、高出力なテラヘルツ波発生を行うことが可能となっているが、産業現場での実用化には至っていない。また、テラヘルツ分光システムとしては、テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) がある[20]。超短パルスレー

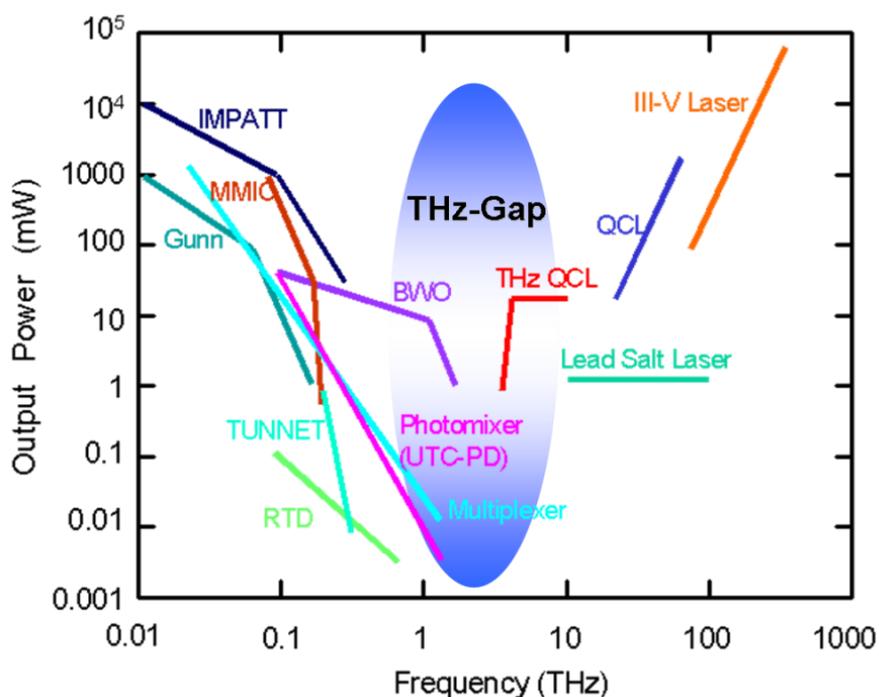


図 1.2 代表的な電磁波光源出力[2]

※IMPATT: IMPact ionization Avalanche Transit-Time diode、MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuit、BWO: Backward Wave Oscillator、RTD: Resonant Tunneling Diode、UTC-PD: Uni-Traveling-Carrier Photodiode、QCL: Quantum cascade laser

ザーで数百 fs のパルス幅を有するテラヘルツ波を発生し、その時間波形を高速フーリエ変換することによりスペクトル情報を得る。位相も同時に取得でき、また、超短パルス性を活かしたタイムオブフライト方式のトモグラフィ応用[21], [22]が可能であるなどの特徴があり、物性測定や、断層測定などに世界的に広く用いられている。しかし、高周波域でダイナミックレンジが急激に低下することや、散乱等に起因する時間波形の乱れを完全にサンプリングすることの難しさから、フーリエ変換を介して分光結果の乱れが生じやすいこと、および検出（光伝導アンテナ）エリアが数十マイクロメートルと小さいことから、ターゲット中のテラヘルツ波の散乱、多重反射、回折などの影響を受けやすく、テラヘルツ波に求められる応用の一つである遮蔽物下の薬品・禁止薬物検査などへの応用には不向きであった[23]。

その一方で高出力な単一波長のテラヘルツ波発生手法として、パラメトリック発生[24]–[28]がある。連続波長可変光源として光波から近中赤外まで幅広く用いられるパラメトリック発生方式は、テラヘルツ波発生にも利用可能であり、1960年代から70年代にかけてスタンフォード大学により非線形光学結晶であるニオブ酸リチウム（LiNbO<sub>3</sub>）を用いたテラヘルツ波パラメトリック発生の初期の研究がなされている[29], [30]。その後、1990年代半ばに川瀬らにより、結晶を共振器内に設置し単色テラヘルツ波を発生

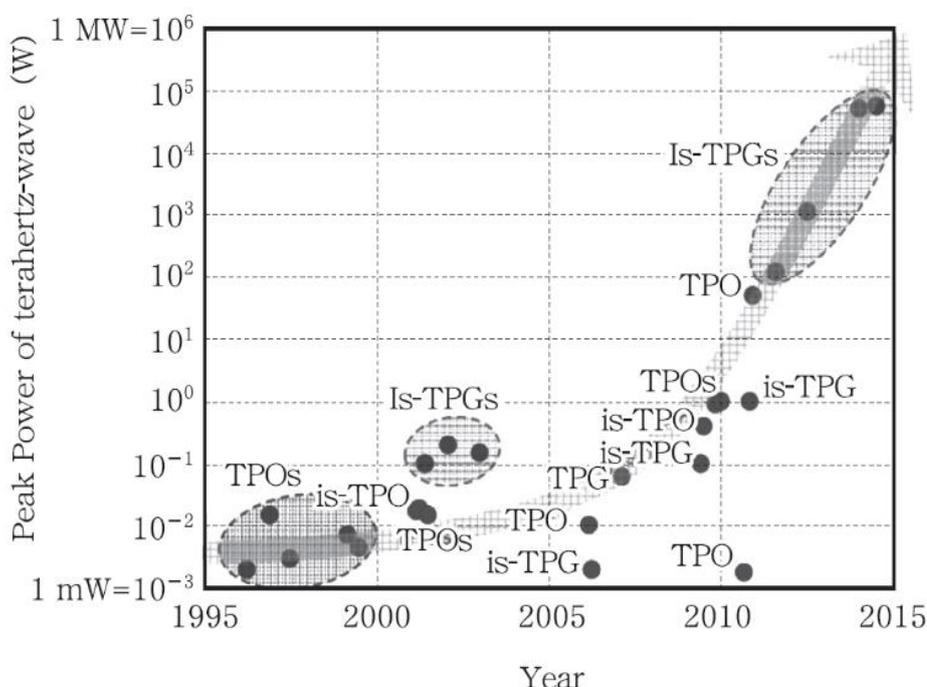


図 1.3 テラヘルツ波パラメトリック光源の尖頭値推移[31]

※TPO : Terahertz Parametric Oscillator, is-TPG : injection-seeded THz-wave Parametric Generator, is-TPO : injection-seeded THz-wave Parametric Oscillator

したテラヘルツ波パラメトリック発振器 (TPO : THz-wave Parametric Oscillator) の開発が実現し[24]、その後注入光を結晶に入射することで共振器を不要とし、高出力化も実現した光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生器 (is-TPG : injection-seeded THz-wave Parametric Generator) の開発に至っている[26]。当時 is-TPG において、励起レーザーとしてパルス幅数十 ns のアクティブ Q スイッチ Nd:YAG レーザーを用いていたが、近年 500 ps 程度のパッシブ Q スイッチのマイクロチップ Nd:YAG レーザーを導入することによりテラヘルツ波の出力が飛躍的に向上し、図 1.3 の出力 (尖頭値) 推移に示すように、尖頭値として数十 kW を実現した[28], [31]。また、is-TPG は THz-TDS とは異なり波長可変光源であるため、時間波形取得が不要であることや、1~3THz に渡って高いダイナミックレンジを有すること、また同様の原理がテラヘルツ波検出にも利用可能であり、検出エリアが比較的大きいため、テラヘルツ波の散乱、多重反射、回折などの影響を受け難く、遮蔽物下の薬品・禁止薬物検査[5]などの産業応用には最適な光源であるといえる。

## 1.2 本研究の目的と構成

以上の背景より、本研究ではテラヘルツ波の産業応用を目指して、is-TPG を用いた分光システム開発およびパラメトリック増幅システム開発を主な目的として研究を行った。これまでパラメトリック発生の原理を用いることで高出力発生および検出が可能であることは示されてきたが、実際に分光を行うためには多くの課題が残っていた。そこで本研究では is-TPG の基礎性能の向上を図るだけでなく、様々なテラヘルツ波応用実現に向けた高性能テラヘルツ波分光システム開発を行った。さらに、微弱テラヘルツ波の利用を目指し、これまで研究がほとんどなされていないテラヘルツ波パラメトリック増幅技術の確立も目指した。

本論文の構成は次の通りである。第 2 章では、非線形光学結晶である  $\text{LiNbO}_3$  を用いたテラヘルツ波パラメトリック発生、検出原理に関して説明する。はじめにパラメトリック波長変換、誘導ラマン散乱について述べた後、ポラリトンを介したテラヘルツ波パラメトリック発生、発生の逆過程であるテラヘルツ波検出に関して述べる。第 3 章では実用的な測定を目指した is-TPG を用いたテラヘルツ波分光システム開発に関して述べる。is-TPG を発生検出に用いた分光システムは、従来ノイズレベルが高くダイナミックレンジは 4 桁程度しか得られなかった。励起光の取り回し方法を工夫することでそのノイズを取り除き、7 桁以上の高いダイナミックレンジと 1.2~2.5 THz の波長可変域を実

現した（発表リスト 3. K. Murate, et. al., IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 4, No. 4, 2014）。次に波長可変域の向上も図った。これまで is-TPG の波長可変域は高周波における結晶のテラヘルツ波吸収が大きく、0.6~3.0 THz に制限されており、15 年ほど改善がなされてこなかった。それを、結晶の配置を見直すことで吸収を軽減することに成功し、0.6~5.0 THz と一桁もの波長可変性を実現した（発表リスト 6. K. Murate, et. al., Applied Physics Express, vol. 9, No. 8, 2016）。さらに、これら高性能化を図った分光システムを用いて応用測定を行った。厚さ 2 cm 以上の遮蔽物に隠された試薬でも識別してイメージングすることに成功した（発表リスト 9. K. Murate, et. al., International Journal of High Speed Electronics and Systems, vol. 25, No. 03n04 2016）。第 4 章では is-TPG の多波長発生によるリアルタイム分光システム開発について述べる。注入光を多波長化することで多波長のテラヘルツ波を同時に発生し、波長を変える必要をなくし、さらに is-TPG を用いた検出手法によりそれぞれの波長を分離して検出することで 1 ショットでの分光を実現した。本システムで糖類を測定した結果、それらの吸収スペクトルをリアルタイムで得ることが出来た（発表リスト 10. K. Murate, et. al., Applied Physics Express, vol. 10, No. 3, 2017）。第 5 章ではリアルタイム分光の高安定化について述べる。is-TPG の多波長化により、単一波長発生時に比べて安定性が低下した。そこで、テラヘルツ波を 2 つに分割し、サンプル測定光と同時にレファレンス光も取得することで安定性向上を図った。第 6 章では極微弱テラヘルツ波の高利得増幅に関して述べる。我々は 2014 年に世界初のテラヘルツ波パラメトリック増幅器開発に成功したが、当時の増幅技術では入力弱いとエネルギーが広帯域光発生に用いられ、極微弱光、特に低周波の増幅が困難であった。そこで本研究ではテラヘルツ波を一旦近赤外光に波長変換し、その状態で広帯域光を除去することで低周波の極微弱光の増幅を実現した。第 7 章では以上の内容に対する総括を行い結論とする。

以上のように、1 章で示した背景のもと、2 章で原理説明を行い、3 章で分光システムの開発と応用研究を示した。4 章、5 章では開発した分光システムのリアルタイム化及び高安定化に成功し、6 章で極微弱光の増幅を行うことでこれまで検出が困難であった極微弱テラヘルツ波の常温検出に成功した。これらを通して、本研究ではテラヘルツ波発生からテラヘルツ波増幅、応用研究まで行い、テラヘルツ波技術の産業応用可能性を示した。

## 第2章 is-TPG によるテラヘルツ波発生、

### 検出原理

#### 2.1 はじめに

本章では、本研究で用いる周波数可変光源である光注入型パラメトリック発生器 (is-TPG : injection-seeded THz-wave Parametric Generator) のテラヘルツ波発生および検出原理を述べる。非線形光学結晶である  $\text{LiNbO}_3$  に励起光を入射すると、パラメトリック効果によりシグナル光とアイドラー光に分割される。本研究ではシグナル光をテラヘルツ波、アイドラー光を近赤外光とするが、テラヘルツ波とアイドラー光の周波数差が大きく、通常利得はほとんど得られない。しかし、 $\text{LiNbO}_3$  において、フォノンと光子が結合して生成されるポラリトンを介することで、純粋な光波による相互作用ばかりでなく物質の励起波を利用しているためにテラヘルツ波領域のシグナル波発生の場合にも強いパラメトリック増幅が起こり得る。ここでははじめにパラメトリック波長変換、誘導ラマン散乱を述べた後、ポラリトンを介したテラヘルツ波パラメトリック発生を述べ、最後に発生の逆過程であるテラヘルツ波検出に関して説明する。

#### 2.2 テラヘルツ波パラメトリック発生で用いる

##### 非線形光学効果

##### 2.2.1 非線形光学効果とは[32]

物質内を光が伝搬する際、物質は光に対して分極を介して応答する。この分極  $\mathbf{P}$  は以下の式 (2-1) で表され、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $E$  は光の電界強度、 $\chi^{(n)}$  は  $n+1$  階のテンソルで表わされる非線形感受率であり  $n \geq 2$  の項が  $n$  次の非線形応答を表わす。

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}(E) = \epsilon_0(\chi^{(1)}E + \chi^{(2)}EE + \chi^{(3)}EEE + \dots) \quad (2-1)$$

光の強度が弱い場合分極  $\mathbf{P}$  は式 (2-1) の第一項のみを用いて、光の電界強度  $E$  に線

形的に応答するが、レーザー光のようにコヒーレンスを保った強度が強い光の場合分極  $P$  は式 (2-1) の  $n \geq 2$  の項を含む、非線形な応答を示すようになる。これらの非線形応答現象はレーザー光の波長変換に用いられ、コヒーレント光源開発において重要な役割を担っている。表 2.1 に代表的な非線形光学効果を示す。非線形感受率は次数が小さいほど大きな値を持ち、2 次および 3 次の非線形光学効果が特に重要である。本研究のテラヘルツ波パラメトリック発生法は、 $\text{LiNbO}_3$  結晶 (1 THz における 2 次の非線形感受率 :  $2.6 \times 10^{-5}$  esu) の 2 次の非線形光学効果である光パラメトリック効果と 3 次の非線形光学効果である誘導ラマン散乱を用いており、以下にその詳細を記載する。

表 2.1 代表的な非線形光学効果

入射光 周波数	発生する光の周波数	非線形感受率	非線形光学現象
$\omega$	$2\omega$	$\chi^{(2)}(2\omega)$	第 2 高調波発生 ( SHG )
$\omega_1, \omega_2$	$\omega_3$ ( $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ )	$\chi^{(2)}(\omega_3 = \omega_1 + \omega_2)$	和周波発生 ( SFG )
$\omega_3$	$\omega_1, \omega_2$ ( $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ )	$\chi^{(2)}(\omega_1 + \omega_2 = \omega_3)$	光パラメトリック効果
$\omega_1, \omega_2$	$\omega_3$ ( $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$ )	$\chi^{(2)}(\omega_3 = \omega_1 - \omega_2)$	差周波発生 ( DFG )
$\omega$	$3\omega$	$\chi^{(3)}(3\omega)$	第 3 高調波発生 ( THG )
$\omega$	$\omega_s$ ( $\omega_s = \omega - \omega_v$ )	$\chi^{(3)}(\omega_s = \omega - \omega_v)$	誘導ラマン散乱

## 2.2.2 光パラメトリック効果[32], [33]

光パラメトリック効果とは放出される 2 つの光の周波数の和が入射光の周波数に等しい現象のことをいう。非線形光学結晶に周波数  $\omega_p$  の励起光を入射したときに、周波数  $\omega_i$  のアイドラー光と、周波数  $\omega_s$  のシグナル光と呼ばれる光が次のエネルギー保存則を満たすように発生する。

$$\omega_p = \omega_i + \omega_s \quad (2-2)$$

発生するアイドラー光とシグナル光は結晶入射端においては、微弱な雑音もしくは蛍光と呼ばれる発光状態にあるが、結晶長や励起光強度を高めた利得が十分な場合においては励起光と相互作用し増幅効果が起こる。これを光パラメトリック増幅といい、このとき励起光、シグナル光、アイドラー光の間には次式で表わされる運動量保存則（位相整合条件）が成立する。

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_i + \mathbf{k}_s \quad (2-3)$$

式(2-3)を満たす方向にシグナル光およびアイドラー光が発生し、これらの出力光の増幅特性を示す、パラメトリックゲイン  $g$  は一般的に次式で与えられる。

$$g \equiv \sqrt{\left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right) \frac{\omega_i \omega_s}{n_i n_s} dE_p(0)} \propto \sqrt{\omega_i \omega_s I_p} \quad (2-4)$$

ここで  $\omega$  は周波数、 $n$  は屈折率、 $d$  は2次の非線形光学係数、 $E_p(0)$  は励起光の入射面での電界強度、 $I_p$  は励起光強度をそれぞれ表わしている。これより、パラメトリックゲインはアイドラー光とシグナル光の周波数積の平方根に比例することがわかる。ここで、光波帯の周波数をもつ励起光からテラヘルツ帯の出力を得る場合、すなわちシグナル光がテラヘルツ波である場合には、それぞれの周波数の間で  $\omega_p \sim \omega_i \gg \omega_s$  の関係が成り立つので、ゲイン  $g$  は最大値である縮退点  $\omega_i = \omega_s = \omega_p/2$  の値と比べて  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  と著しく低下してしまう。このため、純粋に光波のみのパラメトリック相互作用によるテラヘルツ波発生は非常に困難である。

### 2.2.3 誘導ラマン散乱[32], [33]

次に誘導ラマン散乱に関して説明する。一般に、分子や固体には分子振動や固体振動等の固有振動が存在し、これらの物質に周波数  $\omega_p$  の励起光を物質に入射したとき、物質の固有振動数  $\omega_v$  だけシフトした散乱光を発生するのがラマン散乱である。ここで周

波数  $\omega_p - \omega_v$  の光が発生する場合をストークス (Stokes) 過程、周波数  $\omega_p + \omega_v$  の光が発生する場合を反ストークス (Anti-Stokes) 過程と呼ぶ。通常の実験において、ストークス過程の発生確率が高いため、以下においてはストークス過程のみを扱うこととする。

入射光の強度が微弱な場合には、指向性を持たないインコヒーレントなストークス散乱光が観測され、自然ラマン散乱と呼ばれる。一方、高出力なレーザー光源を用いた場合には、ある閾値を超えるとその散乱光が増幅作用によって強力なコヒーレント光となる。これが誘導ラマン散乱であり、このとき光パラメトリック相互作用と同様なエネルギー保存則および運動量保存則が成り立つ。(それゆえ誘導ラマン散乱は広義のパラメトリック過程と見なす場合もある)

$$\omega_p = \omega_{Stokes} + \omega_v \quad (2-5)$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_{Stokes} + \mathbf{k}_v \quad (2-6)$$

誘導ラマン散乱は一つの波長変換法として有力な方法である。しかし、物質固有の振動数により、周波数のシフト量が決定されているため、高次の散乱過程や種々の固有振動モードが利用できる場合でも、波長変換された光の周波数は離散的な値となり、連続的な波長可変性を得ることはできない。

## 2.3 テラヘルツパラメトリック発生<sup>[34], [35]</sup>

以上のように、光パラメトリック効果において、テラヘルツ波とアイドラー光の周波数差が大きく、通常、利得はほとんど得られず、また誘導ラマン散乱を用いては波長可変性が得られない。しかし、そのパラメトリック効果と誘導ラマン散乱の混合したフォノンポラリトンと呼ばれる状態を介することで高効率なテラヘルツ波発生と広帯域な波長化可変性が実現する。

### 2.3.1 フォノンポラリトンを介したテラヘルツ波

#### パラメトリック発生<sup>[36], [37]</sup>

光が物質中を伝搬する際のイメージとして、光が入射されると分極が生成され、その分極が再び入射光と同等の光放出し、さらにその光が分極を生成するということを繰り返す。

返しながら伝搬する。このとき部分的に分極であり、光でもあり、どちらの状態とも決めることができない。この光（フォトン）と物質の格子振動の量子であるフォノン（Transverse Optical : TO）とが相互作用している混合状態をフォノンポラリトン（以下ポラリトンとする）と呼ぶ。

図 2.1 にポラリトンの分散曲線を示す。図中の 2 つの直線は、フォトンとフォノンの間に相互作用が無いと仮定したときのそれぞれのエネルギー $\omega$  と運動量 $k$  の関係を示したものである。 $\omega = ck/n$  ( $c$ : 光速、 $n$ : 屈折率) で表わされる直線は、相互作用がない場合のフォトンの分散曲線、横軸に平行な直線は相互作用がない場合のフォノンの分散曲線を示している。フォトンとフォノンの相互作用がある場合、図のオレンジの曲線で示されるように、低エネルギー側ではフォトン的な振る舞い( $\omega = ck/n$  と近い振る舞い) をし、高エネルギー側では TO フォノン周波数  $\omega_{TO}$  に漸近し、フォノン的な振る舞いをする。これがポラリトンの分散曲線であり、フォトンともフォノンともみなせる振る舞いをする。本研究においては低エネルギー側のフォトン的な振る舞いをする領域を用いて、テラヘルツ波発生を行った。LiNbO<sub>3</sub> の TO フォノンモードの周波数 7.5 THz に対し、発生に寄与しているポラリトンの周波数はおよそ 0.5~5 THz の領域であり、このポラリトンの分散曲線に従い、テラヘルツ波の連続的な波長可変性が得られる。

このポラリトンを紹介したテラヘルツ波パラメトリック発生では、励起光、アイドラー光、テラヘルツ波の 3 波の間におけるパラメトリックな非線形光学効果とみなせるが、物質の格子振動がこの効果に強く結合しているため、光パラメトリック効果と誘導ラマン散乱の融合した現象であると解釈できる。

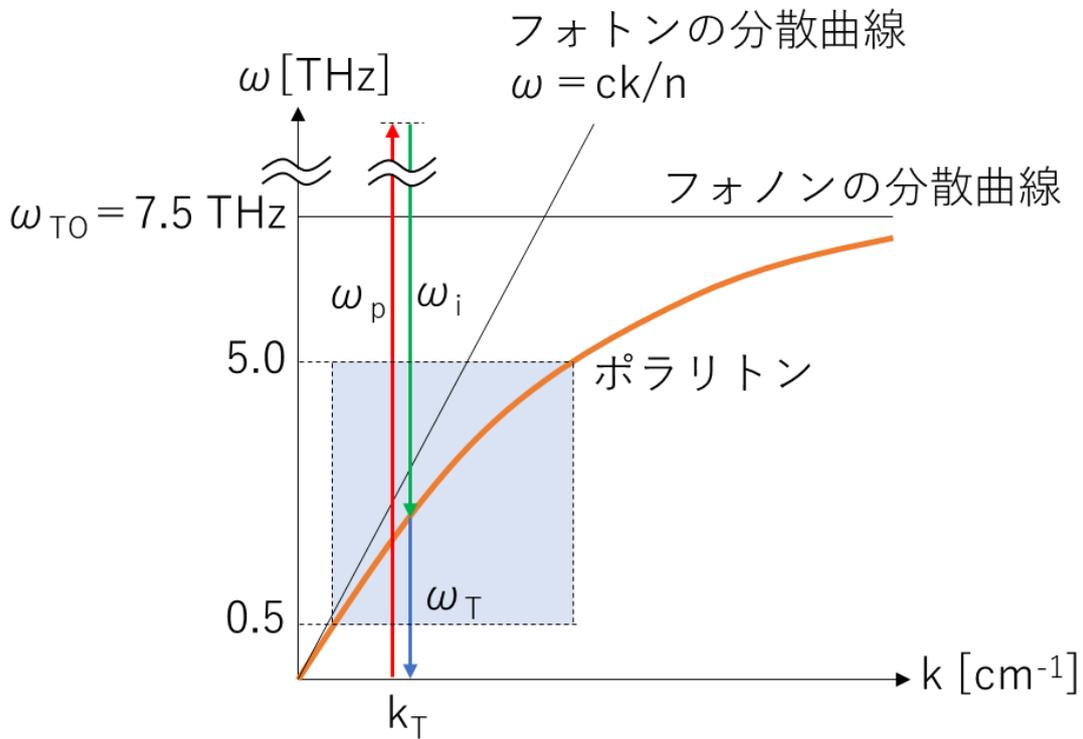


図 2.1 LiNbO<sub>3</sub> のポラリトンの分散曲線

以上のように、LiNbO<sub>3</sub>等のラマン活性かつ遠赤外活性な非線形光学材料を用いると、発生するテラヘルツ波が物質の格子振動場を量子化したフォノンと強く結合したフォノンポラリトンを介することによって、強いパラメトリック効果が利用可能となり、 $\omega_s \ll \omega_i$ の条件下であっても大きなパラメトリックゲインを得ることができる。この時、励起光  $\omega_p$  と、テラヘルツ波  $\omega_T$  およびアイドラー光  $\omega_i$  が、次式のエネルギー保存則 (2-7) および運動量保存則 (位相整合条件) (2-8) を満たすように発生する。

$$\omega_p = \omega_T + \omega_i \quad (2-7)$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_T + \mathbf{k}_i \quad (2-8)$$

発生するアイドラー光とテラヘルツ波は空間的な広がりを持ち、その出射角度に応じてそれらの波長は連続的に変化する。これが図 2.2 に示すテラヘルツパラメトリック発生 (THz-wave parametric generation: TPG) であり、全ての波は結晶の  $z$  軸方向に偏光している。

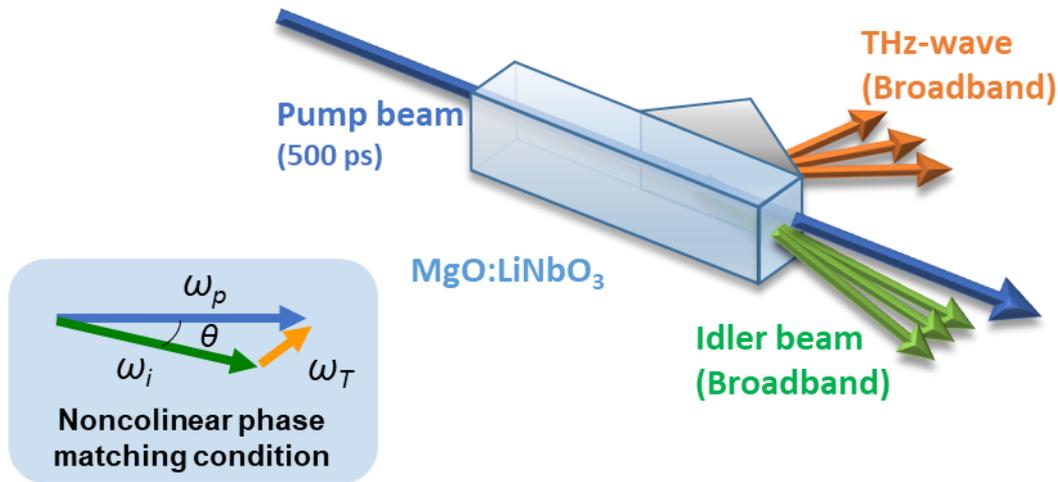


図 2.2 テラヘルツパラメトリック発生

### 2.3.2 パラメトリック利得[36]-[39]

テラヘルツ波パラメトリック発生の利得幅は、パラメトリック利得とテラヘルツ波の吸収によって決まる。LiNbO<sub>3</sub> の A<sub>1</sub> モードを用いた誘導ポラリトン散乱における広帯域な利得を計算するには、励起光電場  $E_p$ 、アイドラー光電場  $E_i$ 、テラヘルツ波電場  $E_T$  に関する結合方程式を解けばよい。励起光の減衰が小さい近似の下では、テラヘルツ波およびアイドラー光の電場の増幅は、以下の方程式で表わされる。

$$\left[ \nabla^2 + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_T \right] E_T = - \frac{\omega^2}{c^2} \chi_p E_p E_i^* \quad (2-9)$$

$$\left[ \nabla^2 + \frac{\omega_i^2}{c^2} \left( \varepsilon_i + \chi_R |E_p|^2 \right) \right] E_i = - \frac{\omega_i^2}{c^2} \chi_p E_p E_T^* \quad (2-10)$$

ここで、 $\varepsilon_T$  は LiNbO<sub>3</sub> のテラヘルツ波に対する誘電率、 $\varepsilon_i$  は LiNbO<sub>3</sub> のアイドラー光に対する誘電率、 $c$  は真空中の光速を表わす。また、感受率  $\chi_p$ 、 $\chi_R$  はそれぞれ二次の過程であるパラメトリックおよび三次の過程である誘導ラマン散乱過程に関連した  $\chi^{(2)}$ 、 $\chi^{(3)}$  であり、

$$\chi_p = d_E + \frac{S_0 \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot d_Q \quad (2-11)$$

$$\chi_R = \frac{S_0 \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma_0} \cdot d_Q^2 \quad (2-12)$$

と表わされる。ただし、 $\omega_0$  は 7.5 THz (250 cm<sup>-1</sup>) (A<sub>1</sub> モードの共鳴周波数)、 $S_0$  は振動子強度、 $\Gamma_0$  は減衰定数を表わす。また、2 つの係数  $d_E$  (=16  $\pi$   $d_{33}$ )、 $d_Q$  はそれぞれ電子分極、イオン分極に起因した 2 次と 3 次の非線形光学過程を表わし、 $d_Q$  は以下の式で表わされる。

$$d_Q = \sqrt{\frac{8\pi c^4 n_p (S_{33}/L\Delta\Omega)_0}{S_0 \hbar \omega_0 \omega_i^4 n_i (\bar{n}_0 + 1)}} \quad (2-13)$$

$$\bar{n}_0 = \frac{1}{\exp[\hbar \omega_\nu / kT] - 1} \quad (2-14)$$

ここで、 $\bar{n}_0$  はボーズ分布関数を表わし、式 (2-14) により示される。ただし  $\hbar$  はプランク定数、 $T$  は温度、 $k$  はボルツマン定数を表わす。また、 $S_{33}$  は立体角  $\Delta\Omega$  で測定したときの結晶長  $L$  からのストークス光の発生効率を表わし、ラマン散乱断面積に比例する。

共鳴周波数から十分離れた低周波数領域における結合方程式 (2-9)、(2-10) 式の解を、平面波近似の下でノンコリニア位相整合条件  $\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_T + \mathbf{k}_i$  を考慮して求めると、パラメトリック利得  $g_T$  は、

$$g_T = \frac{\alpha_T}{2} \left[ \sqrt{1 + 16 \cos \phi \left( \frac{g_0}{\alpha_T} \right)^2} - 1 \right] \quad (2-15)$$

と表わされる。ここで、 $\Phi$  は励起光とテラヘルツ波の間の位相整合角、 $g_0$  は低ロス限界でのパラメトリック利得、 $\alpha_T$  はテラヘルツ波帯の吸収係数を表わし、それぞれ以下の式で表され、 $g_T$  は  $\alpha_T$  と  $g_0$  の交点においてピークを持つようなプロファイルとなる。

$$g_0 = \sqrt{\frac{\pi\omega_p\omega_i I_p}{2c^3 n_T n_i n_p}} \chi_p \propto \sqrt{\omega_i \omega_T I_p} \quad (2-16)$$

$$\alpha_T = \frac{2\omega}{c} |\text{Im}(\sqrt{\epsilon_T})| \quad (2-17)$$

ただし、 $n_T$ 、 $n_i$ 、 $n_p$ はそれぞれ、テラヘルツ波、アイトラー光、励起光の屈折率、 $I_p$ は励起光強度を表わす。

結合方程式 (2-9)、(2-10) や低ロス限界でのパラメトリック利得  $g_0$  は、光波領域のパラメトリック過程のものと類似している。しかし、感受率 $\chi_p$ が  $d_E$  と  $d_Q$  で表わされる2つの項を含み、これらの寄与がほぼ 1:4 であることから、誘導ポラリトン散乱におけるパラメトリック過程ではイオン分極の寄与 (フォノンの寄与) が本質的である。この相互作用の物理的なメカニズムは、極性結晶のラマン効果として捉えることができる。 $z$  軸方向に偏光した励起光が  $\text{LiNbO}_3$  結晶に入射すると、まず軽い電子雲が振動し ( $\sim 10^{14}$  Hz)、これが連鎖的に原子核 ( $\text{Li}^+$ イオン) を  $z$  軸方向に振動させる。重い  $\text{Li}^+$ イオンは、テラヘルツ波帯の周波数で振動するが、そのイオン分極によってテラヘルツ波を放出することができる。この電子雲を伴った  $\text{Li}^+$ イオンの振動は、電子雲をテラヘルツ波帯の周波数で変調するため、その振動 (電子分極) により、THz の周波数シフトを受けた  $z$  軸偏光のアイトラー光を放出することになる。

## 2.4 光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生器 (is-TPG) による高出力テラヘルツ波発生

前節で説明したように、ポラリトンを介することで、テラヘルツ波パラメトリック発生が可能である。しかし、高出力なテラヘルツ波発生、また広帯域波長可変性を得るために、以下で説明する位相整合条件を満たす必要がある。本節では is-TPG における位相整合条件を説明し、その後光注入によるテラヘルツ波の高出力化、狭帯域化、アクロマティック光学系による広帯域波長可変の方法を述べ、最後にマイクロチップ Nd:YAG レーザー導入によるテラヘルツ波の高出力化について述べる。

## 2.4.1 位相整合条件

非線形光学効果を用いた波長変換では、入射光と出力光の位相を結晶中で常に揃える必要がある。これを位相整合と呼び、相互作用する光の運動量保存則と等しい[32]。

テラヘルツ波パラメトリック発生を行なう際には、光パラメトリック相互作用と同様、励起光、アイドラー光、テラヘルツ波の各周波数の間には、式 (2-8) の運動量保存則が成り立つ。この関係を満足させるような位相整合には、パラメトリック増幅に適したノンコリニア位相整合法を用いる (図 2.3)。MgO:LiNbO<sub>3</sub> 結晶の  $z$  軸方向に偏光した励起光を入射させることにより、ある角度  $\theta$  をもったアイドラー光が発生し、同時にシグナル光であるテラヘルツ波も発生することで位相整合条件を満足する波数ベクトルを形成する。このとき  $\theta$  を位相整合角と呼び、余弦定理より次式が成り立つ。

$$\cos \theta = \frac{k_p^2 + k_i^2 - k_T^2}{2k_p k_i} = \frac{n_p^2 \omega_p^2 + n_i^2 \omega_i^2 - n_T^2 \omega_T^2}{2n_p \omega_p n_i \omega_i} \quad (2-18)$$

式 (2-7) において、励起光周波数  $\omega_p$  は一定 (1064 nm) であるため、 $\omega_T$  は  $\omega_i$  のみの関数として表わされ、 $\omega_i$  の値により  $\omega_T$  を変化させることができる。またこのとき、式 (2-18) より、 $\theta$  が位相整合条件を常に満たしている必要がある。すなわち、アイドラー光の周波数と位相整合角を制御することにより、テラヘルツ波の周波数が制御できる。

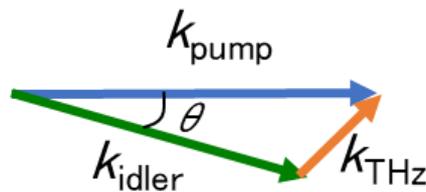


図 2.3 ノンコリニア位相整合条件の波数ベクトルの関係

## 2.4.2 光注入による高出力化[26], [40]

図 2.4 に示すように、LiNbO<sub>3</sub> 結晶に励起光のみを入射すると、結晶内部では複数の縦モードが競合しながら成長していくため、アイドラー光とテラヘルツ波が広帯域に、ノンコリニア位相整合条件を満たすように角度を持って発生する。これはテラヘルツ波パ

ラメトリック発生 (Terahertz wave Parametric Generator: TPG) と呼ばれ、この状態では波長可変性はなく、また出力も弱い。

ここで、図 2.4 (b) に示すようにアイドラー光への注入光 (種光) を、位相整合角を満たすように結晶へ入射すると、注入光を種光として、同一波長の縦モードが他の縦モードよりも早く成長し増幅される。その結果、他のモードは発生できなくなり、アイドラー光が狭帯域化され、それに伴い対応するテラヘルツ波 ( $\omega_T = \omega_P - \omega_i$ ) の狭帯域化も実現する。また、パラメトリック利得が単一周波数に集中するため、図 2.4 (a) の TPG に比べ、高出力なテラヘルツ波発生を行うことができる。またこのとき、注入光の波長と入射角度をノンコリニア位相整合条件を満たすように制御することで、発生するテラヘルツ波の波長が制御でき、広帯域波長可変性が得られる。

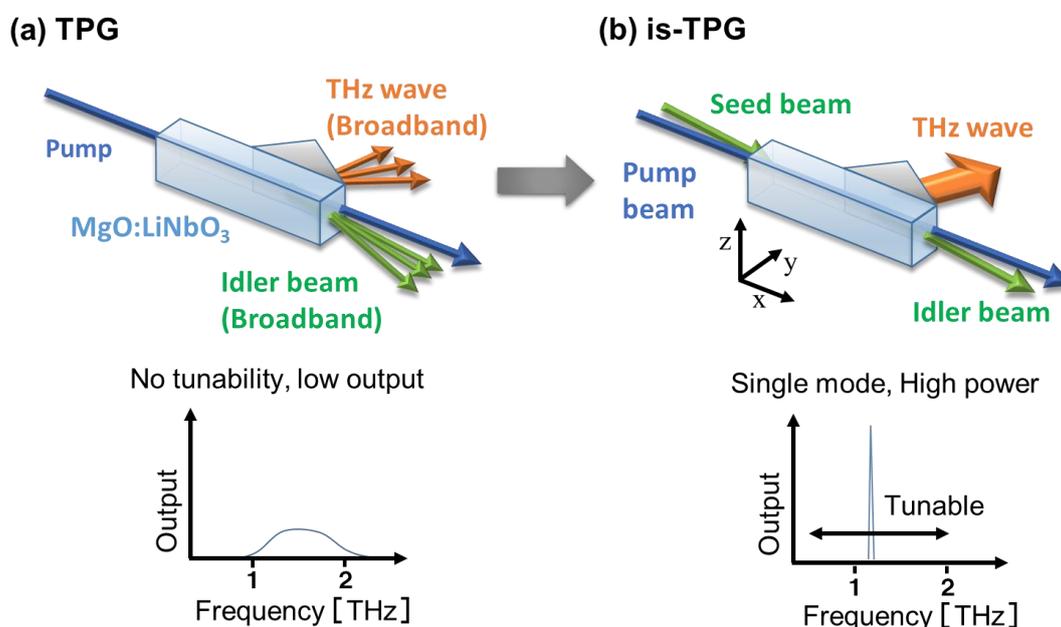


図 2.4 光注入の原理図

### 2.4.3 アクロマティック光学系による広帯域連続波長可変<sup>[40]</sup>

前節の通り、ノンコリニア位相整合条件を満たすように注入光を入射することで、連続的なテラヘルツ波の波長可変性を得ることができる。しかしながら、ノンコリニア位相整合条件を満たすためには、波長ごとに注入光の入射角度を変化させる必要がある。is-TPG では、図 2.5 に示す回折格子と二枚のレンズを用いたアクロマティック光学系により、機械動作不要で自動角度調整を実現している。

この時、波長  $\lambda_1$  の光を回折格子に角度  $\alpha$  で入射すると、発生する一回折角  $\beta$  は回

折格子の格子間隔  $d$  として次式 ( 2-19 ) を満たす。

$$\lambda_1 = d (\sin \alpha + \sin \beta) \quad ( 2-19 )$$

一次回折光が励起光となす角  $\theta_1$  は、焦点距離  $f_1$ 、 $f_2$  のレンズによって構成したテレスコープ系を用いて  $f_1/f_2$  倍に拡大され、角度  $\theta_2$  で結晶に入射する。この時、波長が変化すると、結晶への入射角度も変化するが、入射位置は常に同一である。注入光波長と位相整合角度の関係を図 2.6 に示す。 $d = 0.83 \mu\text{m}$  (1200 lines/mm) の回折格子を用いた際の  $\theta_1$  をテレスコープ系によって 3 倍した  $\theta_2$  と、位相整合角度がほぼ一致していることがわかる。よって is-TPG では、 $d = 0.83 \mu\text{m}$  の回折格子と、 $f_1/f_2 = 3$  となるレンズ 2 枚を用いることで、 $\theta_2$  は位相整合角度をおおよそ満たし、回折格子に入射する注入光の波長を変化させるだけで、自動的に位相整合がほぼ満たされる。以上の手法により、is-TPG を用いて高出力かつ広帯域波長可変テラヘルツ波発生が実現する。

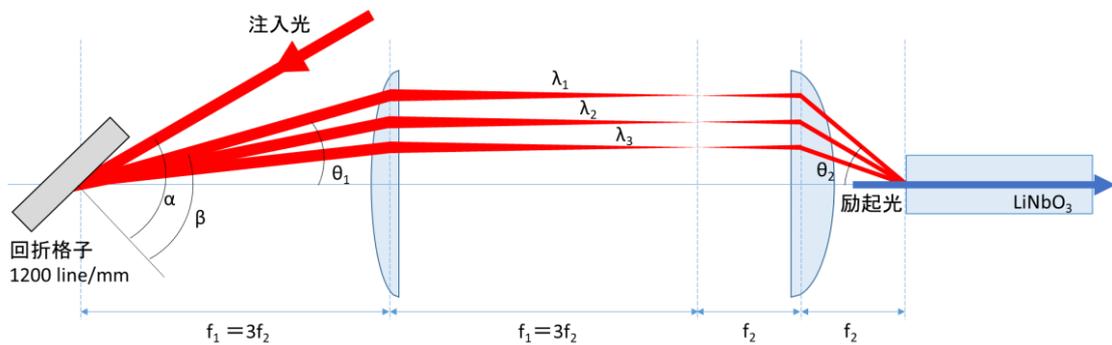


図 2.5 アクロマティック光学系の概略図

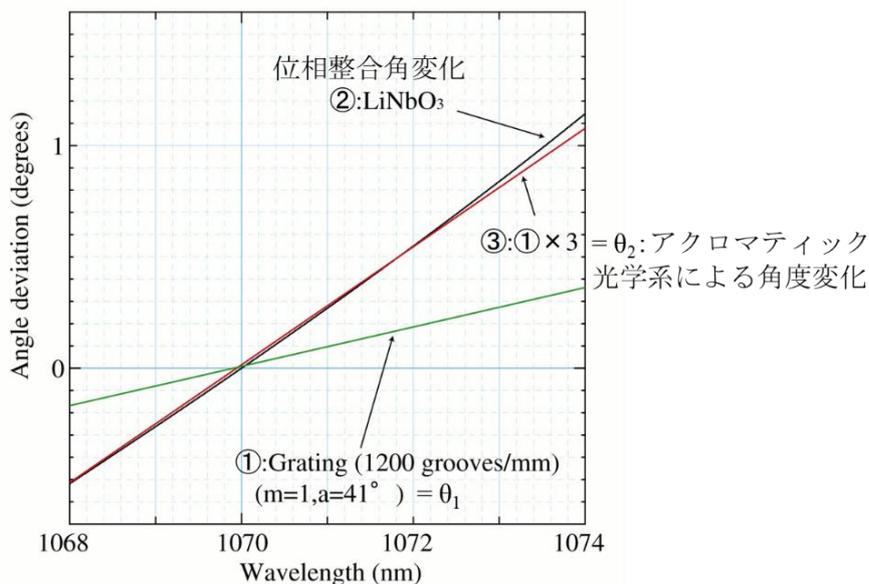


図 2.6 注入光の波長に対する回折角と位相整合角度の関係

#### 2.4.4 マイクロチップ Nd:YAG レーザーの導入による高出力化

テラヘルツ波パラメトリック光源において、高強度レーザーを用いるため、2次や3次高調波発生、和周波、差周波発生、誘導ラマン散乱、誘導ブリュリアン散乱等の多くの非線形効果が起こる。その中で、is-TPG で用いるのは誘導ラマン散乱（誘導ポラリトン散乱）であり、高効率なテラヘルツ波発生を実現するためには競合する他効果を抑制する必要がある。特に、最近理化学研究所の林、南出、名古屋大学の川瀬らの研究[28]で、従来の励起光源である 10~25 ns の Nd:YAG レーザーを用いた場合、is-TPG に用いる誘導ラマン散乱に比べて、誘導ブリュリアン散乱の利得が 1000 倍程度大きく [41]–[43]、テラヘルツ波発生効率を大きく低下させていることが報告された。LiNbO<sub>3</sub> 結晶の場合、誘導ブリュリアン散乱は 1.5 ns で定常状態に達するとされており [44], [45]、1 ns 以下のパルス幅を有するレーザーを用いることで抑制ができることがわかった。しかし、その一方でパルス幅が短くなりすぎると（10 ps 以下）、フーリエ限界パルス幅の関係より輝度の低下を招く。そこで、近年では、パルス幅 500 ps 程度を有する、マイクロチップ Nd:YAG レーザーを用いることで、誘導ブリュリアン散乱を抑制しつつ、誘導ラマン散乱（誘導ポラリトン散乱）利得を最大限活かすことができるようになった。

このマイクロチップ Nd:YAG レーザーの導入により、テラヘルツ波出力の尖頭値は 50 kW に達し、マンリー・ローの関係から求めた変換効率上限は  $10^{-3}$  に対して、以前の ns の Nd:YAG レーザーを用いた場合の変換効率が  $10^{-7}$  程度であったものが  $10^{-4}$  まで改善された [28], [46]。

さらに、マイクロチップ Nd:YAG は共振器とレーザー媒質が一体となった小型のレーザーであるため実験系全体の小型化に寄与し、受動 Q スイッチ [47] を用いていることから Q スイッチに高電圧操作を伴う従来の Nd:YAG レーザーと比べ高い安定性を有するなど、多くの利点を有している [27], [28], [48]。

## 2.5 is-TPG によるテラヘルツ波検出

次に is-TPG によるテラヘルツ波検出に関して説明する。現在テラヘルツ波帯の常温動作の検出器として焦電検出器やゴーレイセルなどがある。しかしそれらは感度が低く、極微弱光の検出が困難である。そこで本研究では、テラヘルツ波を近赤外光に波長変換し、近赤外光検出器で測定することで高感度検出を行った。

## 2.5.1 テラヘルツ波の光注入による近赤外光の発生

近赤外光への波長変換はテラヘルツ波発生と同様に is-TPG の原理を用いる[28], [49], [50]。前節で述べた is-TPG によるテラヘルツ波発生では、励起光と共に角度位相整合条件を満たすように 1068 ~ 1075 nm 付近の近赤外光を注入光として入力することでテラヘルツ波の狭線化、高出力化を行った。その一方でテラヘルツ波検出においては、近赤外光の代わりにテラヘルツ波を注入光として用いる。テラヘルツ波が入射されることで、広帯域に発生しているアイドラー光とテラヘルツ波が狭線化・高出力化される。この時入射するテラヘルツ波の強度に応じて、発生するアイドラー光の強度が変化するため、この近赤外光のアイドラー光を観測することでテラヘルツ波が検出可能である。この際、アイドラー光を検出するための検出器として、近赤外用焦電検出器やフォトディテクタ、CCD 等の高感度な検出器を使用することができる。近赤外光検出器はテラヘルツ波検出器に比べて歴史が古く、技術も成熟しているため、テラヘルツ波を直接検出するよりも極めて高感度な検出が実現する。近赤外光検出器を適切に選択することで、低温 4 [K]動作の Si ボロメータよりも高感度な検出が可能である。

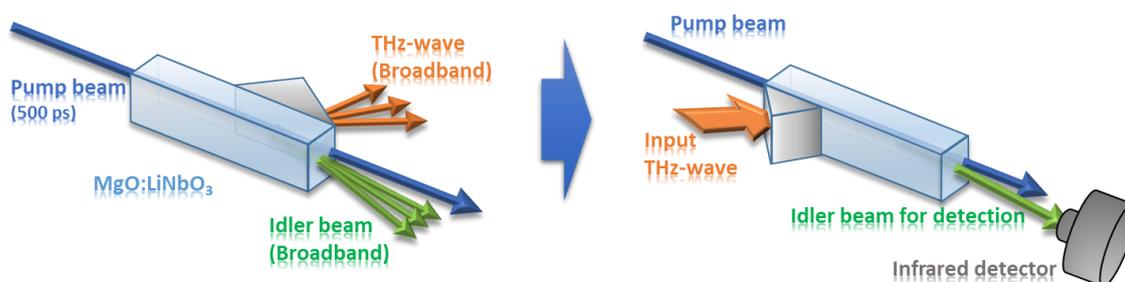


図 2.7 テラヘルツ波検出原理図

## 2.5.2 位相整合条件による検出光の発生角変化

テラヘルツ波検出を行う際も発生と同様にパラメトリック波長変換を用いるため、角度位相整合条件を満たす必要がある。テラヘルツ波の入力においては、テラヘルツ波の波長が励起光に対して長いことや、Si プリズムを用いている[51], [52]ことから入射角度のトレランスは大きい。その一方で検出用アイドラー光発生角は注入光の入射角と同様に波長に応じて変化し、検出器を固定してはスペクトルが取得できない。そこで、

本研究では、単一画素の焦電検出器やフォトディテクタを用いる際は角度位相整合条件に従い検出器を動かしながら測定を行った。また、アレイ型のビームプロファイラ等の検出器を用いる際は、センサーサイズ内に移動量が収まっていれば検出器を動かす必要はない。さらにその検出光の位置はテラヘルツ波の波長に応じて変わるため、入力テラヘルツ波の波長を検出することができる。

### 2.5.3 近赤外光検出器による違い

本検出手法において検出感度は近赤外光検出器の感度にも依存するが、種類によって一長一短がある。最も感度が良いのは、高速 PIN フォトディテクタである。ただ、検出用アイドラー光の 100 ps 程度のパルスを実タイムで観測するため最低でも帯域幅 10 GHz 以上の測定装置を準備する必要がある。検出器、オシロスコープ、ケーブルを高速測定用に揃える必要があり、特にこの速度に対応するオシロスコープは一千万円以上と非常に高額である。また、高速測定となると、僅かな時間ジッターも考慮する必要があり、単一の周波数で限界性能を試すには最適であるが、分光測定には向かない。そこで、現在実用的に用いることが可能なアイドラー光検出器として、近赤外用焦電検出器、ビームプロファイラ、InGaAs を用いたフォトレシーバー(New port : 2053)を用途に応じて使い分けている。

分光装置や、テラヘルツ波 CT 装置など、高いダイナミックレンジを必要とする測定においては焦電検出器が主に用いられる。損傷しきい値が高く、また近赤外光に対するダイナミックレンジが高いため、アイドラー光を減衰させることなく、高いダイナミックレンジが得られる。ただ、その一方で最小感度は他の検出器に比べて低い。

ビームプロファイラは検出光の位置 (テラヘルツ波周波数) やプロファイルを正確に見ることができ、また感度も良いため、本論文で述べるリアルタイム分光器の検出器として、あるいは is-TPG の検出部の調整に用いられる。ただ、近赤外光に対するダイナミックレンジが低いため、アイドラー光の減衰量を変化させないと高いダイナミックレンジが得られない。

フォトレシーバーは PIN フォトダイオードほどではないが、ある程度の応答速度があり、ここで述べた 3 種類の検出器の中では最も感度が良い。しかしその一方で損傷しきい値が低く、入射光の減衰が必須である。測定装置に組み込む用途ではなく、実験的に感度を上げたい際に用いる。

## 2.6 本章のまとめ

本章では is-TPG によるテラヘルツ波発生および検出原理を述べた。

非線形光学結晶である  $\text{LiNbO}_3$  結晶のポラリトンモードを介した誘導ラマン散乱により励起光が近赤外光のアイドラー光とテラヘルツ波に分割される。しかし、その状態では広帯域なテラヘルツ波発生 (TPG) であり、波長可変性は得られず、また出力も弱い。そこにノンコリニア位相整合条件を満たす角度で近赤外光の注入光を入射することで、注入光と同一波長のアイドラー光のみを増幅し、対応するテラヘルツ波の単一周波数、高出力化が可能となる。このとき、回折格子と 2 枚のレンズを用いたアクロマティック光学系により、注入光の波長を変えた際に自動的に入射角度も変化し、広帯域波長可変性を得ている。また、パラメトリック光源が開発されてから 10 年以上 is-TPG の励起光源として 10~20 ns のフラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザーを用いていたが、パルス幅が長く、競合過程の誘導ブリュリアン散乱にエネルギーが用いられ、高い誘導ラマン散乱利得が得られなかった。誘導ブリュリアン散乱は 1.5 ns で定常状態に達することから、近年の研究ではパルス幅が 500 ps 程度のマイクロチップ Nd:YAG レーザーの導入によりその抑制が図られてきた。テラヘルツ波出力は尖頭値で 50 kW に達し、また装置の小型化や安定化も可能となった。

また同様の原理を用いることでテラヘルツ波の高感度検出も可能である。is-TPG において、注入光として近赤外光の代わりにテラヘルツ波を、ノンコリニア位相整合条件を満たすように入射することで、近赤外光 (アイドラー光) を発生する。この近赤外光を、近赤外用の検出器で測定することで、テラヘルツ波を直接検出する場合に比べて、高感度な検出が可能である。

# 第3章 is-TPG を用いた高ダイナミックレンジ分光システム

## 3.1 はじめに

テラヘルツ波を用いた応用の中で、期待されるものの一つに遮蔽物下の禁止薬物検査が挙げられる。この応用は、世界中で広く用いられるテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) [20]では実現が困難であり、私が研究をすすめるパラメトリック光源が得意とする応用である。これまでに川瀬らにより封筒内の禁止薬物検査が可能であることが示されているが[5]、当時の技術ではダイナミックレンジが 4 桁程度しかなく、厚手の EMS 封筒等は透視できなかつた。

その一方で近年 is-TPG の出力は大幅に高出力化され[28]、さらに同様の原理を用いることで高感度なテラヘルツ波検出も実現した[49],[50]。そこで本研究では、これらを用いることで高性能な分光システムを目指した。まずは、分光システムの高ダイナミックレンジ化を図った。従来 is-TPG を発生検出に用いてもノイズレベルが高く、ダイナミックレンジが 4 桁程度しか得られなかつた。それを本研究では、ノイズレベルを下げ、7 桁以上の高いダイナミックレンジを実現した。その次に、これまで 15 年間改善がなされていない周波数可変域の広帯域化を行った。結晶を僅かに傾けることで高周波における吸収の影響を低減し、従来に比べて 2 THz の広帯域化に成功した。最後にこれら高性能化された分光システムを用いて従来では困難であった、厚手の遮蔽物越しの試薬測定を行った。

## 3.2 高ダイナミックレンジ化手法

### 3.2.1 高ダイナミックレンジ分光システムの実験系

is-TPG を用いた分光システムを図 3.1 に示す。is-TPG により発生したテラヘルツ波を、ミラーやレンズを用いて取り回し、検出用結晶に入力し近赤外光に波長変換することにより検出を行っている。発生側、検出側ともに 5mol%MgO : LiNbO<sub>3</sub> を用い、発生側には 50×6×5 mm (x×y×z-axis)、検出側には 65×6×5 mm (x×y×z-axis) のサイズに切

り出し、両 x 端面は 1064nm で AR コートを施した。LiNbO<sub>3</sub> におけるテラヘルツ波帯の屈折率が高く、結合器なしでは全反射するため空間中にテラヘルツ波を取り出すことや、空間から取り入れることが出来ないため、発生、検出ともに y 面に高抵抗 Si 製のプリズムカップラーを圧着した[51], [52]。励起光源は波長 1064 nm、パルス幅 450 ps、繰り返し周波数 100 Hz、出力 0.7 mJ/pulse のマイクロチップ Nd:YAG レーザー[53]–[55]（浜松ホトニクス：LA0880 特注）を、さらに光増幅して 18 mJ/pulse として用いた。発生側注入光源として外部共振器型レーザーダイオード（New Focus Verocity 6321）からの光を 80 mW に増幅して用いた。注入光波長を変えると同時にグレーティングとテレスコープ系を用いたアクロマティック光学系[40]により入射角度を変え、ノンコリニア位相整合条件を満たすように LiNbO<sub>3</sub> 結晶に入射することで、広帯域波長可変テラヘルツ波を発生させることができる。ここでは上記の条件（励起光 18 mJ、注入光 80 mW）で is-TPG を動作させ、テラヘルツ波出力として 1.6 THz で 3 kW 程度を得ている。（Gentec-EO：THZ5I-BL-BNC で測定）発生したテラヘルツ波は集光し、サンプル測定が行えるようにした。

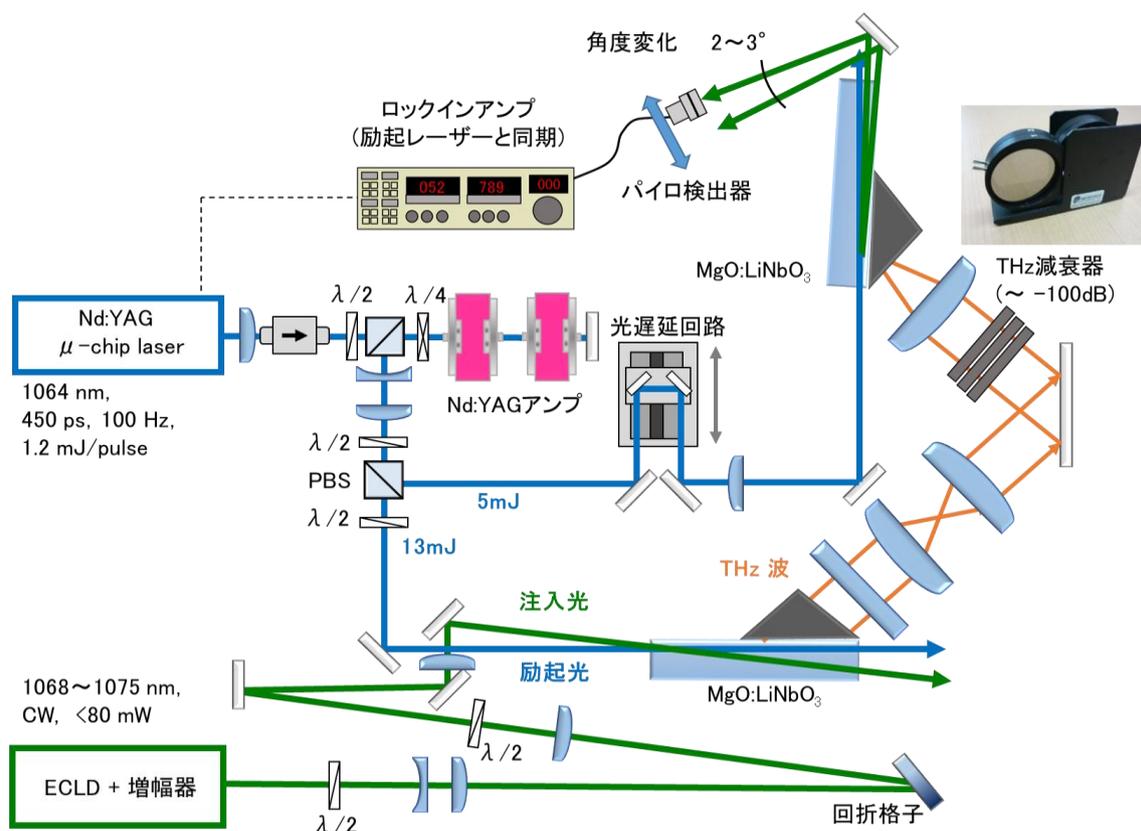


図 3.1 高ダイナミックレンジテラヘルツ分光システムの実験系

テラヘルツ波検出には通常テラヘルツ波用焦電検出器や Si ボロメータを用いるが前者は感度が低い、後者は液体 He が必要などの問題点がある。そこで本研究では前節で説明した、テラヘルツ波を高効率なパラメトリック変換で再度近赤外光に変換することで検出感度の改善を図った。検出側 is-TPG においては、励起光と同時にノンコリニア位相整合条件を満たすようテラヘルツ波を注入光として入射することで、その波長に応じたアイドラー光を高効率に発生させ検出を行った[28], [49], [50]。この際、検出用励起光の光路に光遅延回路を入れ、テラヘルツ波と励起光のタイミングを最適化出来るようにした。アイドラー光は近赤外光であるため、近赤外領域の種々の高感度検出器を用いて検出することが可能である。ここでは gentec 製の ED-100A を用いており、その出力を励起レーザーと同期したロックインアンプを介し測定を行った。この時テラヘルツ波検出においてテラヘルツ波の波長によりアイドラー光の発生角が変化するので[28]、波長に応じて自動ステージを用いて焦電検出器を移動し測定した。

### 3.2.2 従来のシステムを用いたスペクトル測定結果

本実験系において、検出側励起光として当初は発生側結晶の透過光を再利用していた。その時のスペクトルを図 3.2 に示す。テラヘルツ波光路にテラヘルツ波減衰器（透過率 30, 10, 3, 1 % 各 2 枚。合計-100 dB まで減衰可能）を設置し、100 % 透過の状態から減衰率を徐々に増やしていき、各減衰率においてスペクトルを測定した。また、このとき大気中の水蒸気の吸収の影響をなくし、綺麗なスペクトルを取得するために、テラヘルツ波光路に簡易的なチャンバーを作製し、窒素パージを行った。

図 3.2 より、帯域にして 1.2~2.5 THz のスペクトルを得ることができ、減衰量-40 dB の青いスペクトルまでノイズレベルからの違いが見えていることから、最もダイナミックレンジが高い周波数ではおよそ 40 dB のダイナミックレンジを有していることがわかる。しかし、1.4 THz より高い周波数において、ノイズレベルが上昇している。この領域にノイズがのってしまい、ダイナミックレンジが落ちていると考えた。このノイズの原因として考えられるのは、検出用の励起光発生で使用した光を再度用いていることである。発生に用いた後の励起光は、時間波形的にも、空間分布的にも乱れている（図 3.3）。時間波形について一度テラヘルツ波発生に用いているため、パルスの尖頭が欠けた形 (depleted pump) となっている[25]。空間分布的に乱れる原因は、主には結晶状態、MgO ドープのムラ、結晶端面における干涉縞によってプロファイルの乱れが起きると考えられる。また、上記原因の他に、検出に用いる励起光の強度が強いために TPG

が多く発生し、ノイズの元となっている可能性もある。これらの励起光の乱れがテラヘルツ波検出部にてノイズを増やし、スペクトルのノイズレベルの上昇が起こったと考えた。

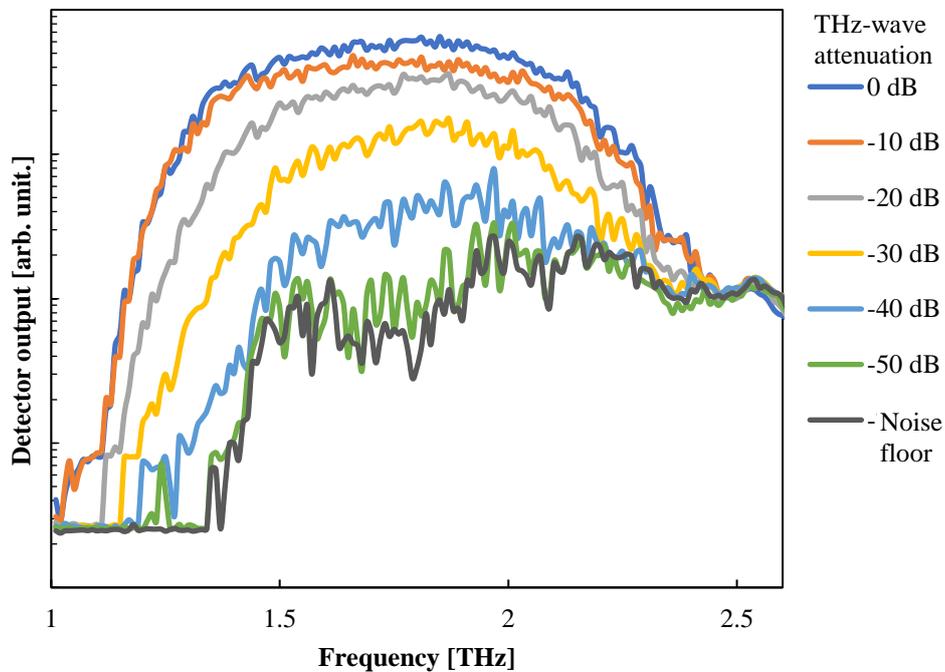


図 3.2 従来の実験系（励起光分離前）を用いたテラヘルツ波スペクトルおよびダイナミックレンジ。ノイズレベルが高く、ダイナミックレンジが4桁程度しか得られなかった。

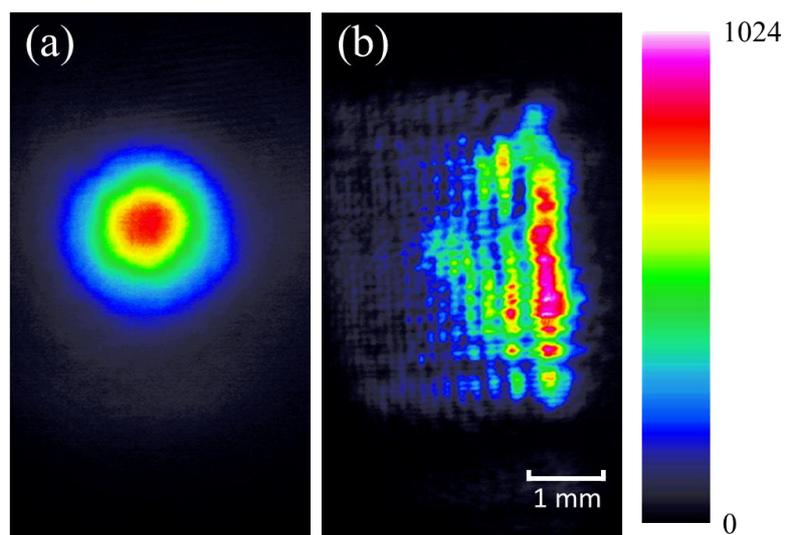


図 3.3 励起光の空間プロファイル (a) 結晶透過前 (b) 結晶透過後

### 3.2.3 ダイナミックレンジの改善結果

そこで、これらの問題を解決するために、時間的、空間的に乱れていない励起光を検出側にも入射することを考えた。発生側結晶透過後の励起光の乱れを、結晶の変更などにより少なくすることも考えられるが、それよりも、発生に用いる前に発生用と検出用の励起光に分離する方式が容易である。図 3.1 に示すように発生側結晶入射前に  $\lambda/2$  板と PBS を組み合わせて、励起光の分離を行ない、検出用に乱れの無い励起光を用いた。また、励起光分離用の  $\lambda/2$  板を回転させることによって、発生に用いる励起光と検出に用いる励起光の比を変更し、最適化を図った。

図 3.4 に励起光を分離した際のスペクトルおよびダイナミックレンジを示す。測定方法は励起光を再利用した際と同じで、テラヘルツ波光路にテラヘルツ波減衰器（透過率 30, 10, 3, 1 % 各二枚。合計 -100 dB まで減衰可能）を設置し、100 % 透過の状態から減衰

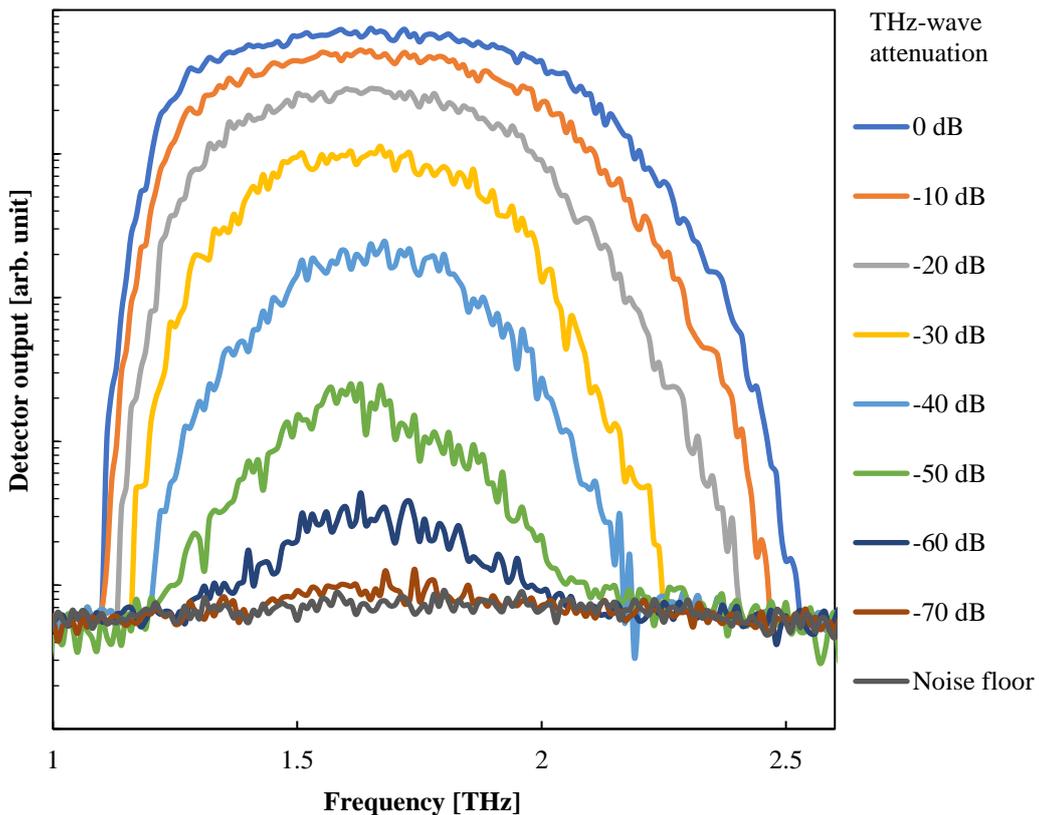


図 3.4 高ダイナミックレンジ化された分光器（励起光分離後）のテラヘルツ波スペクトルおよびダイナミックレンジ。ノイズレベルが下がり 7 桁以上の高いダイナミックレンジが実現した。

率を徐々に増やしていき、各減衰率においてスペクトルを測定した。また、同様に大気中の水蒸気の吸収の影響をなくすために、テラヘルツ波光路に簡易的なチャンバーを作成し、窒素パージを行った。

図より、1.2~2.5 THz の帯域でスペクトルを得ることができ、減衰量-70 dB の茶色いスペクトルまでノイズレベルとの違いがはっきり見えていることから、最大 70 dB のダイナミックレンジを有していることがわかる。励起光再利用時と比較して、およそ 30 dB の改善を行うことができた。また 1.4 THz より高い周波数域で増大していたノイズもほぼ消えており、励起光を分離した効果が顕著に得られた。

### 3.3 分光システムの広帯域化

is-TPG は近年ではテラヘルツ波出力が格段に上がり、自由電子レーザーを超えるピークパワー数十 kW もの出力を卓上サイズで実現した。一方で波長可変範囲は 0.6~3.0 THz[28]であり、過去 15 年以上改善がみられていない。そこで本研究では結晶配置に変更を加える事により、今まで出力することが困難であった 3 THz 以上の高周波領域への波長可変範囲拡大を行った。

#### 3.3.1 従来の帯域制限要因および解決法

is-TPG の波長可変範囲が長年 0.6~3.0 THz より改善されていない原因として、周波数が高くなると結晶中のテラヘルツ波の吸収が大きくなり[57],[58]、テラヘルツ波が発生していても空間中に取り出すことが出来ないという点がある。2章 式 2.16、2.17 に示されている式より、吸収係数は周波数が高くなるにつれ指数関数的に増大し、それに伴って吸収も考慮したパラメトリック利得は減少していく。そのため結晶内部でテラヘルツ波が発生しても空間中に取り出せなくなり、出力可能な波長域を制限していた。そこで実験系に変更を加える事で上記問題を解決し、波長可変範囲を拡大することを試みた。

高周波においてテラヘルツ波の吸収係数が大きいため、テラヘルツ波が結晶中を僅かに進むと減衰する。結晶外に取り出すためにはテラヘルツ波をより結晶表面近くで発生させ、結晶中の伝搬距離を短くすることが必要となる。そのため的手段として、励起光のビーム径をより小さくし、励起光と結晶表面を近づけることが考えられる。しかし、励起光のビーム径を小さくすると、低周波の波長可変範囲が犠牲となる。テラヘルツ波

は結晶中で励起光との相互作用で増幅され取り出される。その際に角度位相整合条件に従い、励起光を横切って増幅されるが、励起光のビーム径が小さいと、波長の長い低周波は相互作用体積内で波数が十分にとれず、出力が低下する。また、パワー密度が高くなり、結晶が損傷するなどの問題がある。そこで、図 3.5 に示すようにビーム径を変化させることなく、LiNbO<sub>3</sub> 結晶の角度を変化させ、テラヘルツ波が出力される端面に励起光の一部を浅く反射させる（反射しない残りはそのまま透過させる）ことでテラヘルツ波を出来る限り結晶表面近くで発生させ、高周波のテラヘルツ波の取り出し効率の向上を図った。

また本研究では、注入光に用いる外部共振器型半導体レーザー（External Cavity Laser Diode: ECLD）も新たなものに変更した。従来用いていた NewFocus 社の Velocity では波長可変範囲が狭く、上記手法をとっても大幅な広帯域化が難しかったため、新たな ECLD としてスペクトラクエストラボ（株）の  $\lambda$ -master1040 と増幅器  $\lambda$ -amp1040 を導入した。本レーザーは波長可変範囲が広い（980 nm～1090 nm）だけでなく波長分解能が 0.05 pm (15 MHz) かつモードホップフリーで精度よく波長を変えることが可能である。また、独自の転置リットマン構造を有しノイズが極力抑えられており、ASE（Amplified Spontaneous Emission）フリー動作（-75dB@0.01nm）が可能である（図 3.6）[59]。通常の ECLD だと波長可変域の端では ASE 光により SN が下がってしまい、十分な光注入が行えないが、本レーザーでは波長可変範囲の端の 1080 nm を超えたあたりでも十分な SN を得られ、is-TPG の広帯域化に最適である。諸特性を表 3.1 にまとめた。

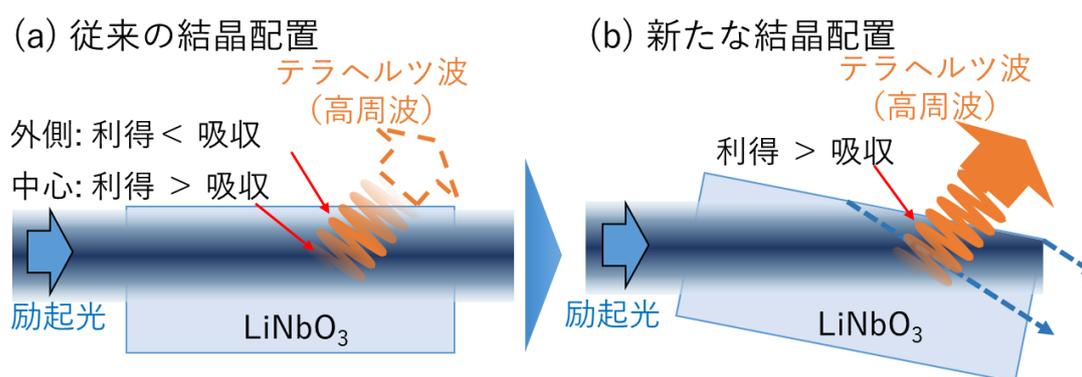


図 3.5 吸収低減のために結晶を僅かに傾ける効果

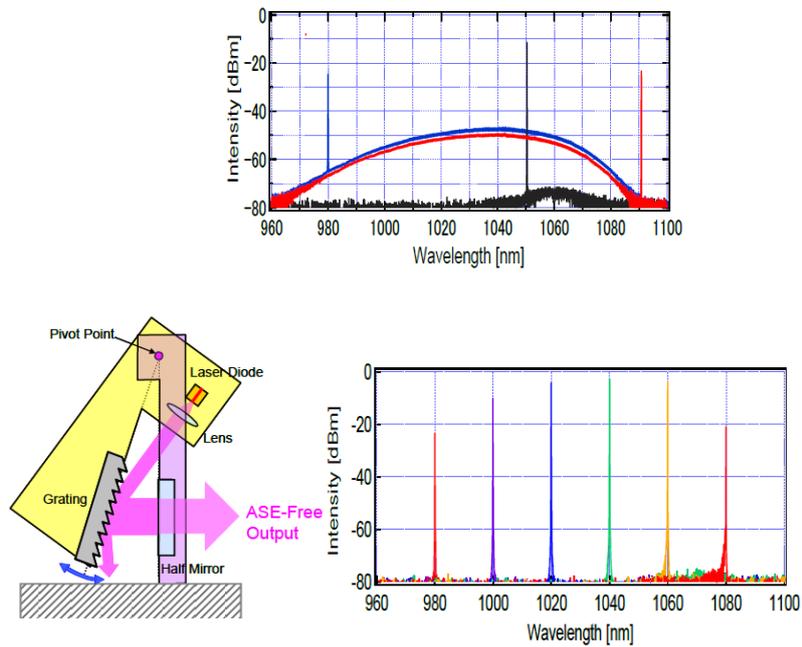


図 3.6 通常のリットマン構造（上）と転置リットマン構造（下）の ASE レベルの比較[59]

表 3.1  $\lambda$ -master1040 の仕様

項目	仕様
帯域	980～1090 nm
SNR	< -75dB@0.01nm
モードホップフリーレンジ	> 50 nm
発振線幅	～100 kHz
波長分解能	0.05 pm (15 MHz)
ファイバー結合出力	> 50mW
チューニングスピード	15 nm/s

従来のレーザーでは波長可変範囲が狭いだけでなくモードホップフリーであると謳っていても、実際はモードホップを起こしてしまうことや、波長の分解能がスペック通り得られないこと、長時間放置すると波長が勝手に変わってしまうことなどの問題点もあり、高精度に再現性のよい測定を行う事が難しかった。一方で本レーザーはスペック通りの動作をし、現在のところ is-TPG 用注入光源として最適であると考えている。

### 3.3.2 周波数帯域の広帯域化の実験系

結晶の傾きを変える方法を用いた広帯域 is-TPG の実験系を図 3.7 に示す。励起光としてパルス幅 390 ps、1.2 mJ のマイクロチップレーザーを増幅しパルスエネルギー 18 mJ としたものをを用いた。注入光としてはスペクトラクエストラボ  $\lambda$ -master1040 を用い、波長は 1066 nm から 1086 nm（テラヘルツ波の周波数にして約 0.4~5.6 THz）まで変化させて測定を行った。注入光の波長の分解能は 0.01 nm でありこれをテラヘルツ波の周波数に直すとおよそ 2.6 GHz となる。この際、アchromatic 光学系の角度変化と実際の位相整合角の条件が次第にずれていくことや、波長を変えていくとミラーの大きさが足りずレーザー光がミラーから外れてしまうなどの問題があったため、1066 nm ~1086 nm の範囲を 17 回に分割し測定を行った。その各回においてアchromatic 光学系だけでなく、結晶の傾きや励起光への寄せ具合なども最適化を行った。（図 3.7 において赤色矢印で示した部分は全て各周波数で最適化を行っている）また、DTGS を用

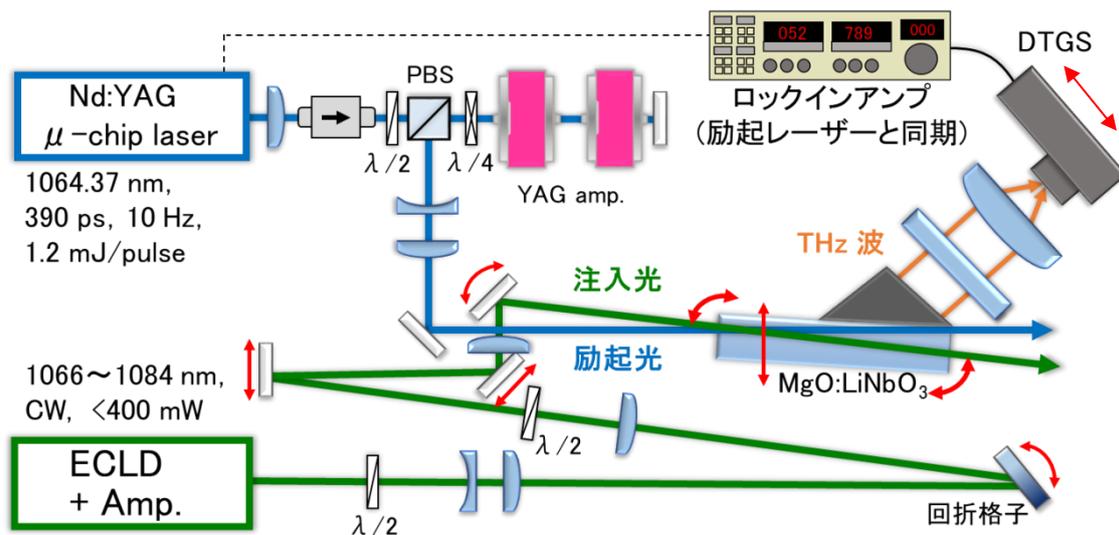


図 3.7 スペクトル広帯域化の実験系

いた焦電検出器の出力はレーザーの繰り返し周波数で同期をとったロックインアンプを通して記録した。

実験結果を図 3.8 に示す。同様の実験系を用いて結晶を励起光と並行にした場合（オレンジ線）と、周波数ごとに結晶角度を最適化した場合（青線）の結果を比較した。また、水蒸気の吸収ライン（赤線）[60]をグラフに重ねて表示し、テラヘルツスペクトル中の吸収ラインと比較することで周波数の妥当性を確認した。結晶が励起光に平行な場合、低周波は同様に出力できているが、周波数が高くなるにつれて出力が減少し、3.5 THz ほどでノイズレベルに達した。その一方で、周波数に合わせて結晶角度を最適化した場合は、2 THz 付近でピークをもつスペクトルとなり、テラヘルツ波の波長可変範囲は 0.6 ~ 5 THz とおよそ一桁に達した。ECLD が従来に比べて広帯域化され、また注入光角度も最適化して測定を行ったため、結晶を傾けない場合でも従来の 3 THz 上限と比べると若干の広帯域化が実現したが、それ以上に、結晶角度を周波数に応じて傾斜させることで帯域が大幅に拡大し、その重要性を確認した。

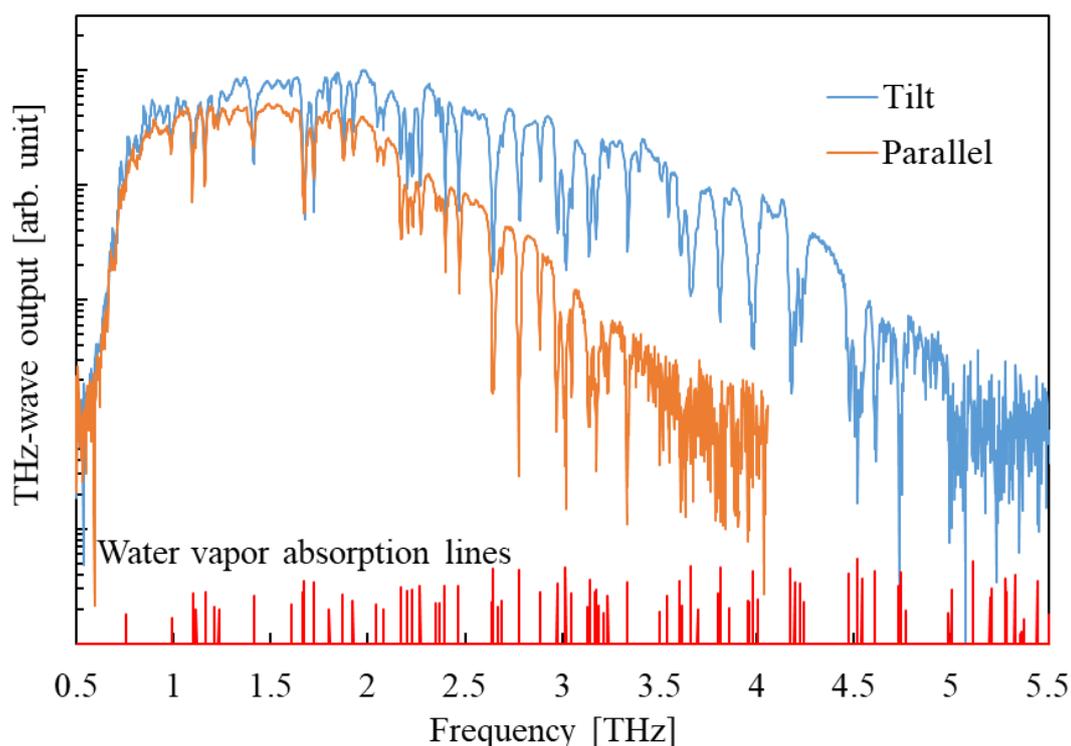


図 3.8 結晶傾斜による帯域の改善結果。結晶を傾けない従来の配置（オレンジ線）に比べて結晶を周波数に応じて変えた本手法（青線）では 1.5 THz ほどの広帯域化が実現した。

## 3.4 is-TPG を用いた分光イメージング

以上のように is-TPG を用いた分光システムにおいて、7 桁以上のダイナミックレンジと 5 THz までの波長可変性を実現した。本システムは検出エリアのトレランスが mm オーダーと THz-TDS と比べて 1 桁以上大きいため、サンプルによる散乱や屈折の影響を受け難い。さらに、様々な試薬類が指紋スペクトルを有し、かつ種々の材質が透明な 1~2 THz 付近でのダイナミックレンジが高く、遮蔽物越しの試薬識別に最適である。そこで私が開発した分光システムを用いて、厚手の遮蔽物越しでの試薬類の分光測定を行い、郵便物内禁止薬物検査応用を実証した。

### 3.4.1 測定方法

実験系は図 3.1 と同様のものを用いた。図 3.1 のテラヘルツ波集光点にサンプルを設置し、XY ステージを用いて 1 mm ステップで動かし、12×42 mm の範囲でスキャンすることで 12×42 = 504 ピクセルの透過画像を得る。この測定を 1.39 から 1.87 THz の範囲の 12 周波数で行い、それぞれ周波数の異なる 12 枚のテラヘルツ波透過画像を取得した。これをマルチスペクトル画像と呼び、ここから以下で示す主成分分析法によって各試薬の分布を抽出した。

### 3.4.2 主成分分析法

本報告で用いた主成分分析法の分光画像への適用原理の概要を述べる[5], [61]。まず、異なる吸収スペクトルを有する M 種類の物質からなる測定対象を、N 通りの異なる波長でイメージングした場合を考える。

イメージングシステムが線形であると仮定すると、次の線形行列方程式で表せる。

$$[X] = [S][C] \quad (3-1)$$

ここで、[X]は測定した画像を表し、各波長における画像の L 画素を 1 次元に並べた行ベクトル (1×L) を縦に N 波長分重ねた N×L 行列である。[S]は測定したスペクトルを表し、各物質のスペクトルの N 波長に対応した値 (N×1) を横に M 種類分重ねた N×M 行列である。また、[C]が最終的に求める各物質の空間パターンで、L 画素を 1 次元に並べた行ベクトル (1×L) を縦に M 種類分重ねた M×L 行列である。N=M の場合、[C]は

単純に次式 (3-2) を計算することによって求まる。

$$[C] = [S]^{-1}[X] \quad (3-2)$$

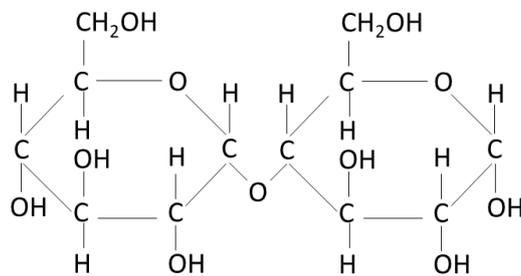
本報告のように、 $N > M$  の場合は、方程式の個数  $N$  が未知数の個数  $M$  を上回るため、最小二乗法により  $\| [X] - [S][C] \|^2$  を最小にする  $[C]$  を解くと、

$$[C] = ([S]^t[S])^{-1}[S]^t[X] \quad (3-3)$$

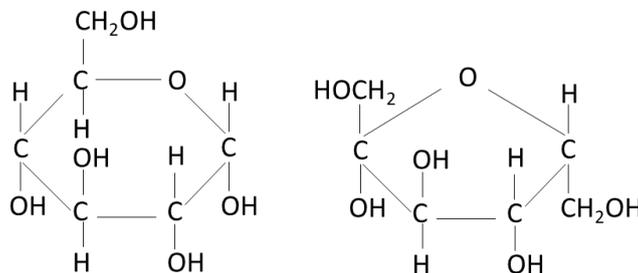
となりこの  $[C]$  が各物質の空間パターンを示す。ここで  $t$  は転置行列を意味する。なお、この時テラヘルツ波は主にサンプル中の吸収によって減衰するため、透過強度はランベルト・ベール則を満たす。したがって、式 (3-1) の線形関係を満たすためには測定した画像の透過強度と入射光強度の比の対数を取る必要がある。

### 3.4.3 実験結果

本実験で用いたサンプルは、図 3.9 に示す構造式のマルトース、グルコース、フルクトースの 3 種類の糖類粉末である。2003 年の川瀬らの報告[5]では科学警察研究所の立



マルトース(麦芽糖)



グルコース

フルクトース

図 3.9 測定した糖類の分子構造

会の下で実験に禁止薬物を用いていたが、近年規制が厳しく、禁止薬物を実験に用いることが難しかったため、糖類で代用した。なお、過去の我々の経験上、禁止薬物の代用試薬として糖類を用いることは、実際上問題ない。糖類の粉末（粒径 30~130  $\mu\text{m}$  程度）をプラスチック製の袋（10×10 mm）に封入し、厚さ約 1 mm のサンプルを作製した。図 3.10 のように、左からマルトース、グルコース、フルクトースの順でサンプルを並べ、メンディングテープで固定し、厚紙の EMS 封筒 2 枚、段ボール 2 枚、気泡緩衝材 4 枚で遮蔽した。このときのサンプルの厚さは約 23 mm であり、2003 年の報告で用いた約 0.1 mm の薄い封筒よりも格段に分厚い。なお、用いた EMS 封筒は重量制限以内で様々なものを封入して郵送できるため、禁止薬物の密輸手段として用いられることが多いとされている。

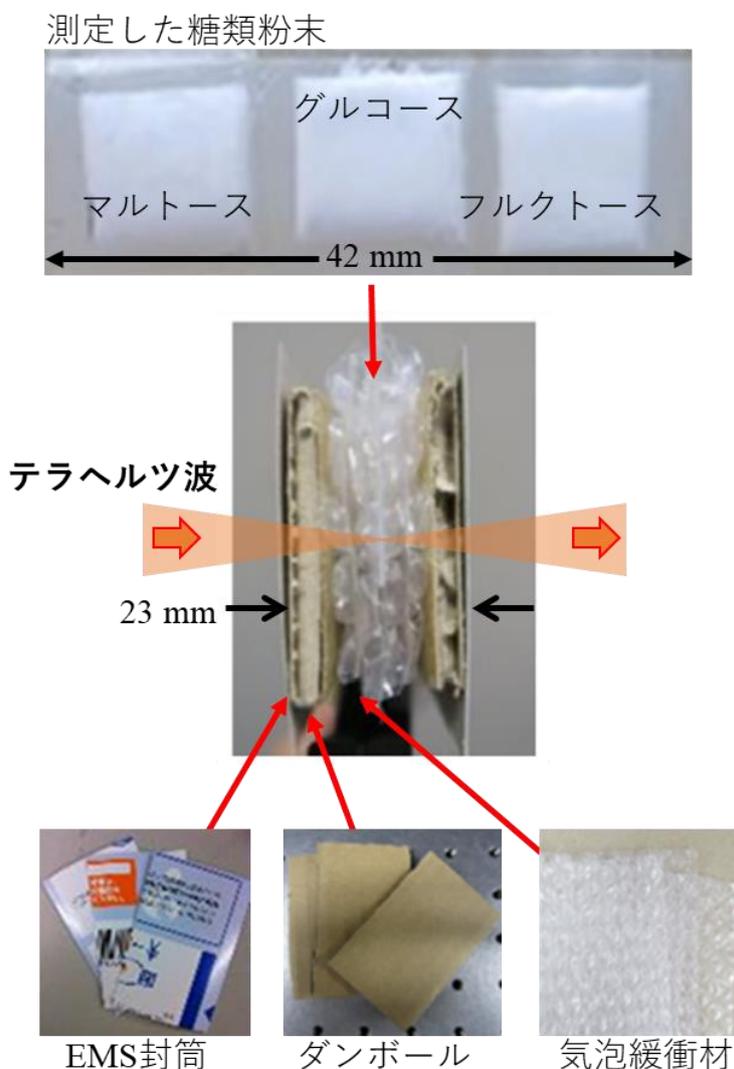


図 3.10 厚さ 23 mm の遮蔽物とその中に隠した糖類サンプル。

次に、図 3.11 に示すように周波数を 1.39~1.87 THz の範囲で変化させ、N=12 枚のマルチスペクトル画像を測定し、このマルチスペクトル画像から  $N \times L = 12 \times 504$  の行列[X]を生成した。画像のカラースケールはサンプルの透過強度  $I_t$  と遮蔽物のみの場合の透過強度  $I_0$  の比の対数を取った吸光度  $-\ln(I_t/I_0)$  で表されている。したがって、吸収が大きいほど白く写る。マルチスペクトル画像では、比較的吸収の小さいグルコースが他の 2 つの糖に比べて暗く見えるが、主成分分析法を用いることで、このような物質による吸収の差異の影響を打ち消し、各成分の空間パターンのみを求めることができる。つまり、吸収が小さい場合でも検出することができる。

図 3.12 は本システムで測定した各糖の吸収スペクトルであり、それぞれの吸収ピーク（マルトース：1.1 THz と 1.6 THz、グルコース：1.4 THz、フルクトース：1.7 THz）が確認できる[62]。図 3.12 からマルチスペクトル画像で測定した 12 点の周波数に対応する吸光度を取得し、行列[S]を生成した。ここで、分光画像においてノイズ成分となる紙、プラスチックおよび散乱などの周波数依存性が糖類のそれに比べて小さいことを考慮し、行列[S]には周波数無依存成分を追加することで、ノイズ成分を除去している。すなわち、[S]は  $N \times M = 12 \times 4$  の行列となる。

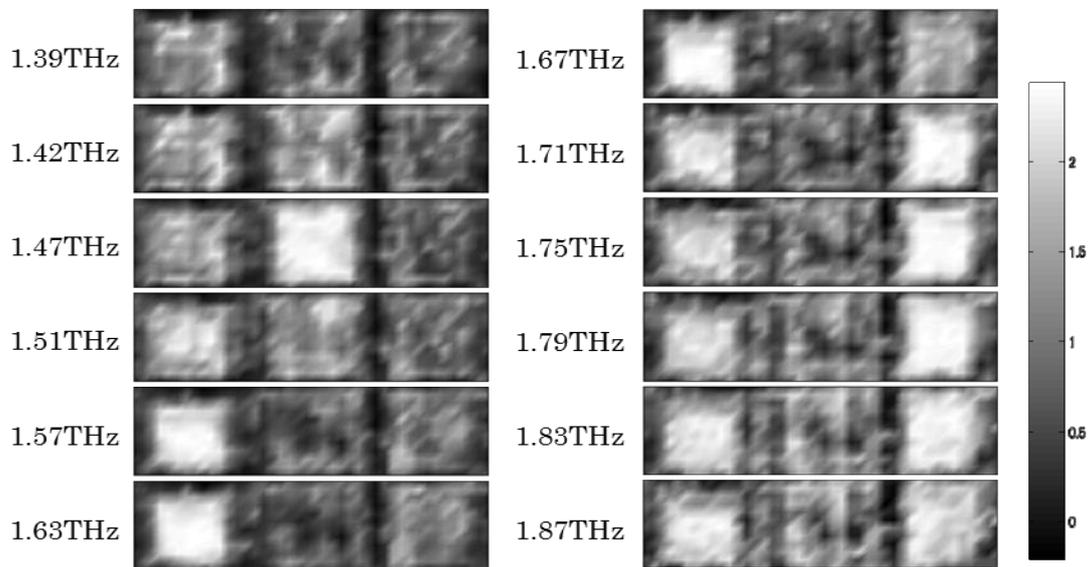


図 3.11 測定したマルチスペクトル画像。吸光度で表されており、吸収が大きいほど白く写る。

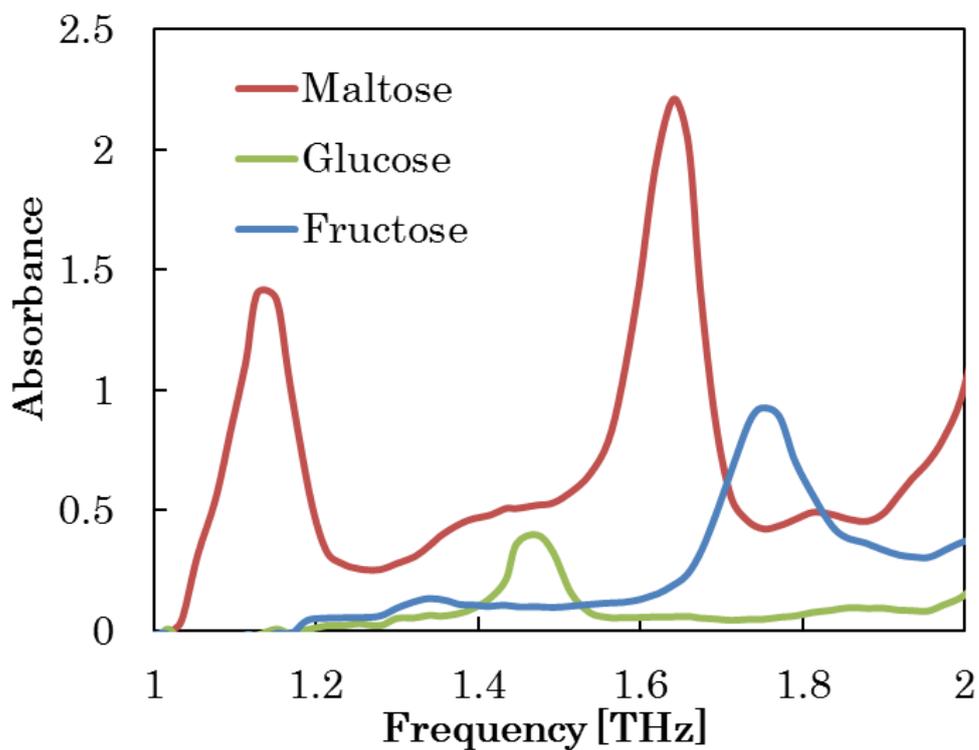


図 3.12 糖類それぞれの吸収スペクトル

このようにして得た行列[X]と[S]を式 (3) に代入することで、 $M \times L = 4 \times 504$  の行列[C]を求めた。この行列[C]から各糖の成分を抽出してイメージングした結果を図 3.13 に示す。これらの画像から、分厚い遮蔽物越しにおいても 3 つの糖が識別されていることがわかる。また、白色の濃淡の違いには、粉末の空間分布状態も現れている。

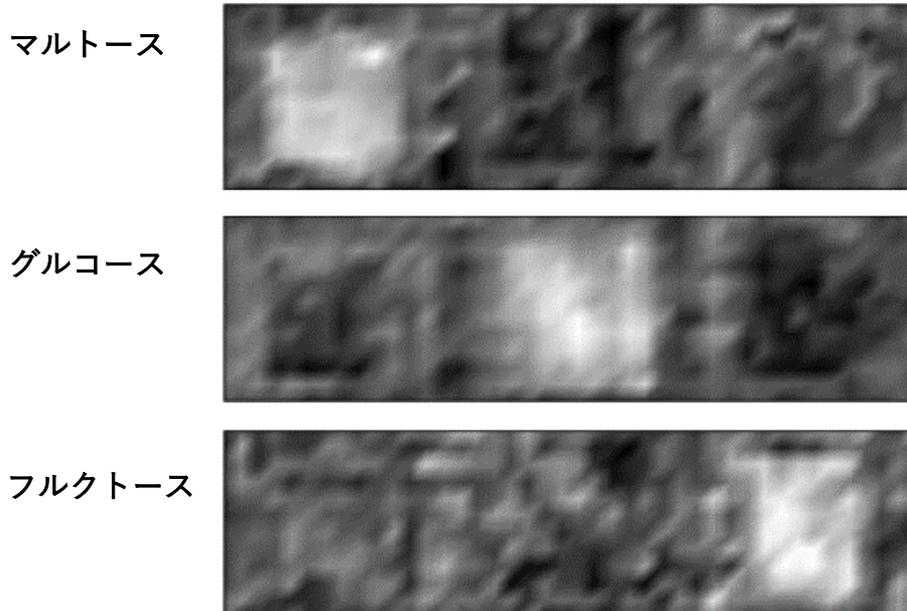


図 3.13 厚手の遮蔽物越しの分光イメージング結果。各糖類を識別してイメージングすることに成功した。(測定条件 1 画素のサイズ：1 mm、測定範囲：12×42 mm、画素数：12×42=504 画素)

### 3.5 本章のまとめ

本章では高出力化された is-TPG を用いて高ダイナミックレンジかつ広帯域な分光システムを開発することを目的に研究を行った。当初はノイズレベルが高く十分なダイナミックレンジが得られなかったが、励起光を分離することにより検出側でのノイズが大幅に低減し、7桁以上の高いダイナミックレンジを実現した。さらに結晶傾斜を行うことで高周波における結晶の吸収を抑え、is-TPG の周波数帯域の広帯域化にも成功した。is-TPG の周波数帯域は、理化学研究所の林らにより低周波域の拡大にも成功しており、0.4 THz からの発生を確認している[63]。本章の結果と合わせ、0.4～5 THz の波長可変性が得られる広帯域光源となった。最後にこの分光システムを用いて、遮蔽物越しの試薬の分光イメージングを実現し、本システムの実用性を示すことに成功した。

## 第4章 is-TPG による多波長発生

### 4.1 はじめに

is-TPG を用いた分光システム開発、さらには応用研究まで実現した。しかし、is-TPG は波長可変光源ゆえに、1 パルス毎に 1 波長しか出力できず、応用測定の際に問題が生じる。一つ目に、分光の際に、波長を変える必要があり、測定時間が長くなること[8]、二つ目に、パルス毎の出力ゆらぎによって、各波長間の測定値がばらつき、平均化が必要となることである。これら問題を解決するために、本研究において is-TPG の多波長発生を目指した。多波長発生により、波長を変える必要が無いので、測定時間が短くなる。さらに、1 パルスで分光するため、各波長間の測定値のゆらぎを無視でき、平均化が不要になる。これらにより、励起レーザーの繰り返しレートでリアルタイムに分光が可能となり、従来では難しかったベルトコンベア上で流れる錠剤の全数検査など、新たな応用が実現することを期待している。

### 4.2 多波長テラヘルツ波発生および検出方法

#### 4.2.1 多波長テラヘルツ波発生

is-TPG による多波長発生方法について説明する。通常の is-TPG では、入射する注入光の波長と角度を、LiNbO<sub>3</sub> 結晶の角度位相整合条件を満たすように制御することで広帯域波長可変性が得られる。一方で図 4.1 に示すように、この注入光を多波長化し、全ての波長で角度位相整合条件が満たされるよう結晶に入射すると、エネルギーが各波長に分割され多波長テラヘルツ波が発生する。当初、この多波長注入光として以下の 3 種類の検討を行った。

- ① 半導体増幅器の ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光を利用した場合
- ② 半導体増幅器の ASE 光を結晶に入射し増幅されたアイドラー光を利用した場合
- ③ 複数台の ECLD を組み合わせた場合

各方法でテラヘルツ波の安定性や出力が異なっており、①、②の方式では、光増幅器の広帯域な ASE 光を回折格子で空間的に分散させ、そこからスリットで任意の波長を抜き出し注入光とした。スリットの位置により波長を変えることができ、また、スリットの数が波長数に対応するため、テラヘルツ波の多波長化が容易に実現したのだが、光増

幅器の ASE 光の不安定性ゆえに安定的なテラヘルツ波発生が難しかった[64]。そこで本稿では、テラヘルツ波の多波長発生に③の複数台の ECLD を組み合わせる方式について述べる。

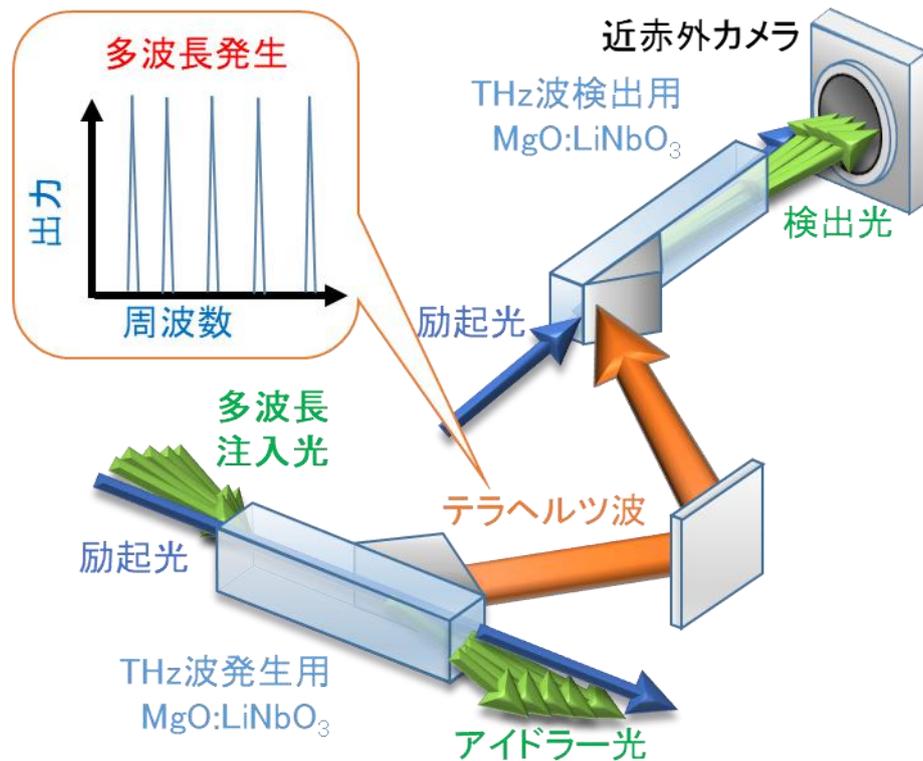


図 4.1 多波長テラヘルツ波発生および検出

#### 4.2.2 多波長テラヘルツ波検出

is-TPG の原理を用いた多波長テラヘルツ波検出に関して説明する。2 章で説明したように、テラヘルツ波検出ではテラヘルツ波の発生とは逆過程で、テラヘルツ波を注入光として用い励起光とテラヘルツ波の差の周波数に相当する近赤外検出光を発生する [28], [49], [56]。近赤外検出光強度は入射テラヘルツ波の強度によって変化するため、テラヘルツ波の高感度な検出が可能である。また、この検出法では、入力するテラヘルツ波の波長に応じて、角度位相整合条件に従って近赤外検出光の発生角が変化する。単一周波数の場合は近赤外検出器を動かす必要があるため、波長ごとに分離できるメリットは無い。その一方で多波長テラヘルツ波の検出では、発生する近赤外検出光も多波長と

なり、このとき、検出光の発生角は波長ごとに異なるため、各波長を分離して検出可能である。図 4.1 に示すように本研究では、近赤外光カメラ（ビームプロファイラ）を用いることで、全波長の同時検出を実現した。

## 4.3 複数台の ECLD を利用した多波長テラヘルツ波発生

### 4.3.1 2 台の ECLD を利用した 2 波長テラヘルツ波発生

多波長注入光を得る方式として、複数台の ECLD の利用を考えた。アンプの ASE 光を用いる方式と比較して、波長数と同じだけの ECLD を用意する必要があり、コスト面や装置サイズの面では不利であるが、コンピューター制御で任意の波長が選択可能であることや、各波長の出力調整が容易であることなどの利点がある。

まずは、2 台の ECLD を用いて、2 波長の発生を試みた。図 4.2 に多波長 is-TPG の実験系を示す。励起光源としてパルス幅 650 ps のマイクロチップ Nd:YAG レーザー（波長 1064.4 nm、繰り返し 11 Hz、出力 0.7 mJ/pulse）を半導体励起 Nd:YAG 結晶によって 21mJ まで増幅したものを利用した。注入光としては 2 台の ECLD からの 2 波長を半導体光増幅器で 400 mW まで増幅し利用した。この 2 波長注入光を用いてテラヘルツ波を発生するためには、全ての波長で角度位相整合条件を満たす必要がある。そこで、グレーティングとテレスコープ系を用いたアクロマティック光学系により、各波長の結晶への入射角度が、自動的に角度位相整合条件を満たすようにした。この時、テラヘルツ波と同時に近赤外光のアイドラー光も発生する。この多波長アイドラー光はエネルギーメーター（Coherent : EnergyMax-USB J-25MT-10KHz）で観測した。放射されたテラヘルツ波は 3 種類の方法で検出した。1 つ目は、テラヘルツカメラ（NEC : IR/V-T0831）による測定で、2 波長それぞれの出力およびプロファイルの測定をした。2 つ目は、テラヘルツ波用焦電検出器（Genetec : UV-100A）による直接検出で、テラヘルツ波の出力や安定性を計測した。3 つ目は、is-TPG の原理を用いたアップコンバージョンによる検出手法で、検出側 LiNbO<sub>3</sub> 結晶で近赤外検出光に波長変換し、角度位相整合条件により発生角が異なる各波長の検出光をビームプロファイラ（Genetec : Beamage 3.0）により空間的に検出した。

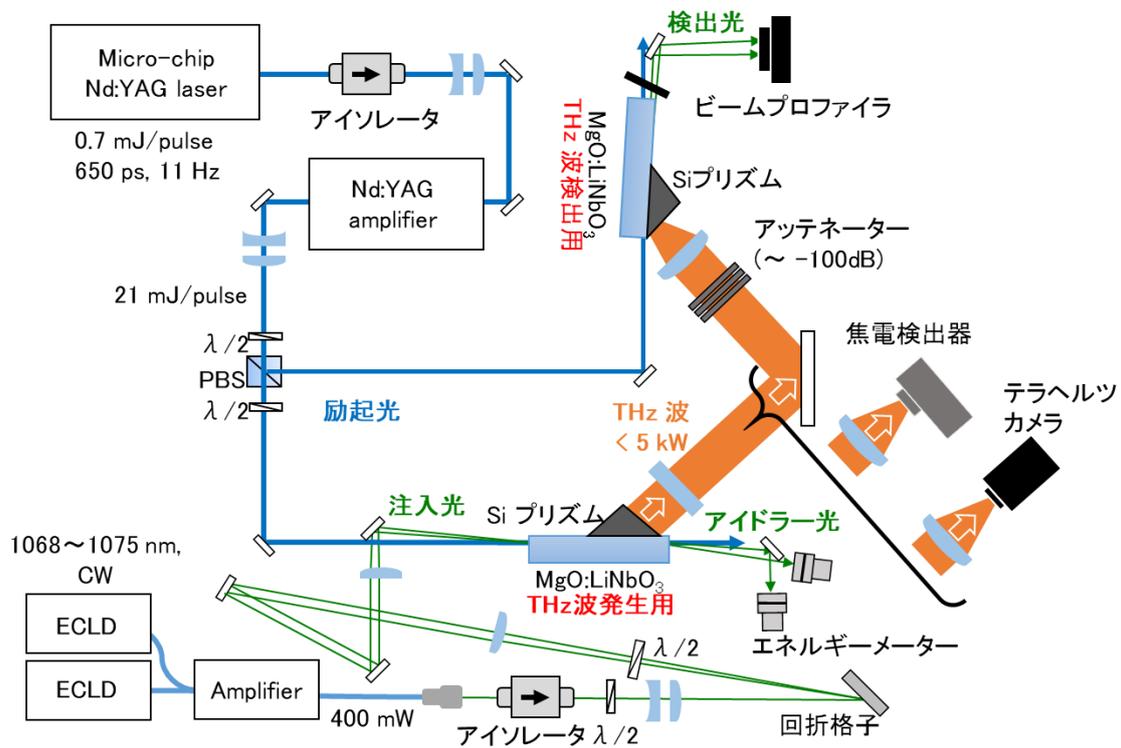


図 4.2 多波長 is-TPG の実験系。発生したテラヘルツ波は、テラヘルツカメラ、焦電検出器、is-TPG の原理を用いたアップコンバージョンによる検出の 3 種類の方法で測定した。

テラヘルツ波の測定を行う前に、テラヘルツ波と同時に発生するアイドラー光の測定を行い、多波長発生の挙動を観測した。注入光には、ECLD からの 1070.6nm と 1074.1nm の 2 波長を用いた。1070.6nm の注入光強度を変化させた場合の、2 波長のアイドラー光強度の相関をエネルギーメーターで観測した結果を図 4.3 に示す。1070.6nm の注入光の減衰に伴い、同波長のアイドラー光強度は、当然ながら減衰する。しかしその一方で、もう一波長の 1074.1nm の注入光強度は変化させていないにも関わらず、発生するアイドラー光強度は増加した。すなわち、2 波長はそれぞれ独立して発生するのではなく、互いにパラメトリック利得を食い合っていることが判明した。また、両波長のエネルギー合計はおよそ一定であり、多波長発生時は、エネルギーがその波長数で分割されることもわかった。本測定はアイドラー光の観測であったが、アイドラー光とテラヘルツ波は同時に対となってパラメトリック発生するため、この挙動はテラヘルツ波でも同様に見られると考えられる。

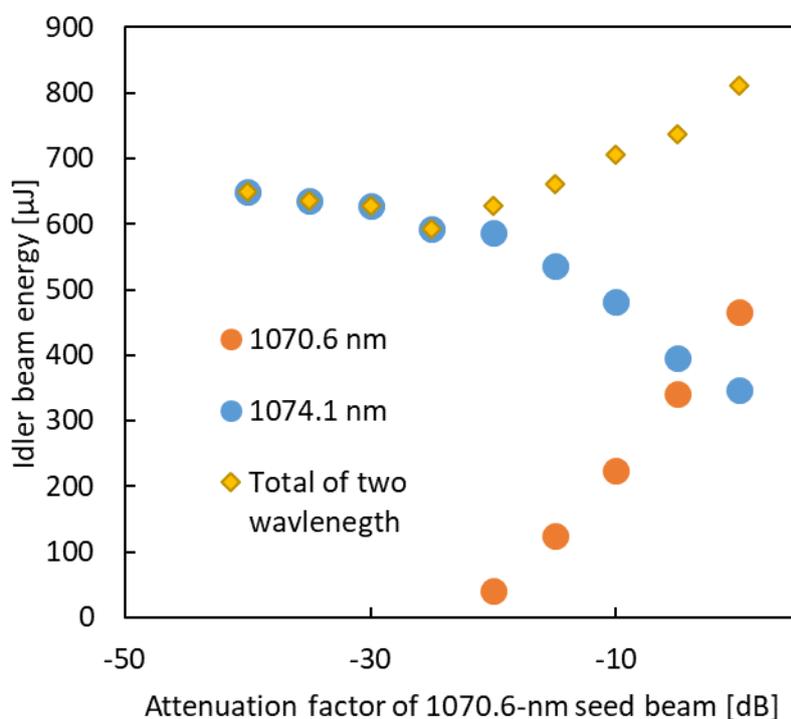


図 4.3 1070.6 nm の注入光強度を変化させた際の、2 波長アイドラー光（1070.6nm と 1074.1nm）の発生強度の相関性および 2 波長出力の合計。2 波長は独立して発生するのではなく、互いにパラメトリック利得を食い合っており、出力に逆相関がみられた。

次に、テラヘルツカメラを用いて多波長テラヘルツ波発生の確認、各波長のテラヘルツ波出力比の測定および最適化を行った。is-TPG から発生するテラヘルツ波は角度位相整合条件のため、各波長の発死角が異なる。Si プリズムカップラーを用いているため、発死角変化は小さい[51],[52]が、集光点では各波長のテラヘルツ波を区別して観測可能である。そこでテラヘルツカメラを用いて 2 波長発生時の、集光点における各波長の出力を観測し、それぞれの出力が同程度になるように調整を行った。

図 4.4 (a) に示すように、1.46 THz と 1.98 THz 発生時に、それぞれ一波長ずつ発生させた場合と、2 波長同時に発生させた場合の出力プロファイルをみることができた。この 2 波長間での出力が同程度になるように調整を行う際、図 4.4 (b) に示すように、励起光を結晶端面に寄せた場合と離れた場合でテラヘルツ波出力比が変化する。3 章の広

帯域化で説明したように結晶内のテラヘルツ波吸収が高周波で大きく[57],[58]、励起光が端面から遠いと高周波成分は吸収され、逆に端面に近いと低周波成分が結晶を横切って発生する際に十分な相互作用長が得られず出力が低下する[63]。実際に多波長発生を行う際はこれらを考慮に入れて最適化を行う必要がある。

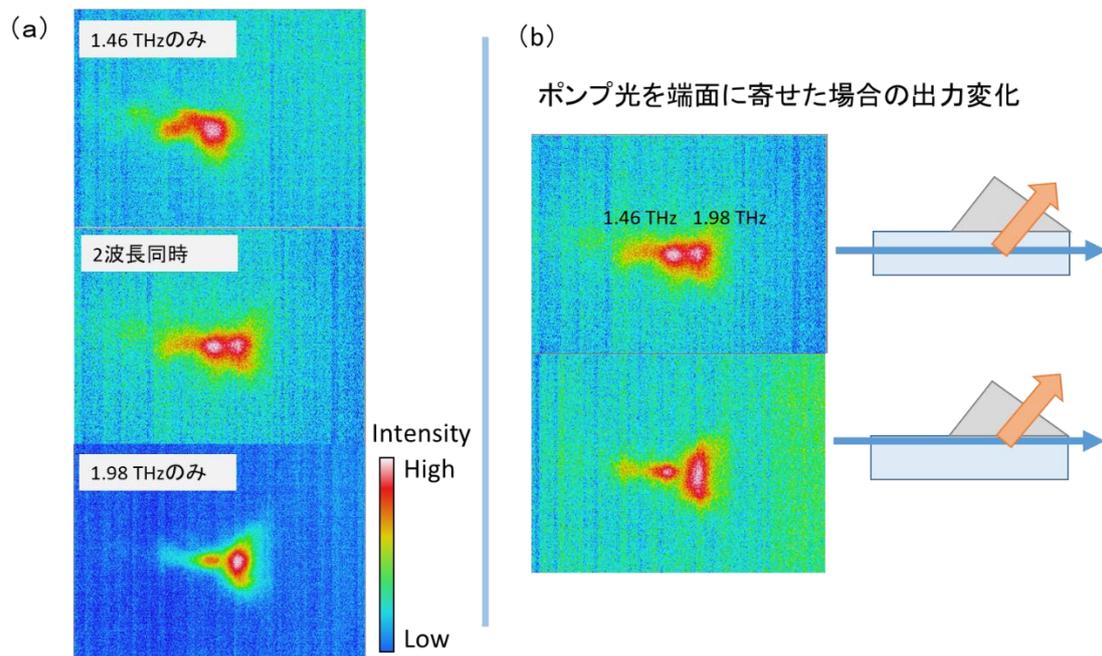


図 4.4 (a) 1.46 THz と 1.98 THz 発生時に、それぞれ一波長ずつ発生させた場合と、2波長同時に発生させた場合の出力プロファイル。(b) 励起光を結晶端面に寄せた場合の出力変化。

次に、図 4.5 に示す注入光用アโครマティック光学系の調整に関して述べる。図 4.5 (a) はアโครマティック光学系の角度変化の波長依存性を示しており、②の実際の位相整合角変化と③のアโครマティック光学系による角度変化[40]はおおよそ重なっており、通常の is-TPG では問題とならない。その一方で多波長発生 is-TPG では、この②と③の僅かな違いが出力に影響を及ぼす。図 4.5 (b) に注入光用アโครマティック光学系の調整を行った際のテラヘルツ波出力変化を示す。アโครマティック光学系を 1.5

THz に対応する 1070 nm に最適化を行った場合では、1.5 THz が強い一方で、2.5 THz は弱くなっている。逆に 2.5 THz に対応する 1074 nm に最適化を行った場合は逆の挙動を示す。単一波長の場合は、1 つの波長なのでエネルギーはそこに集中するが、多波長発生の場合、角度位相整合がより合った波長にエネルギーが流れやすくなり、このような現象が起こると考えている。ここでは 2 波長が同程度の出力となるように、アクロマティック光学系の調整を行った。

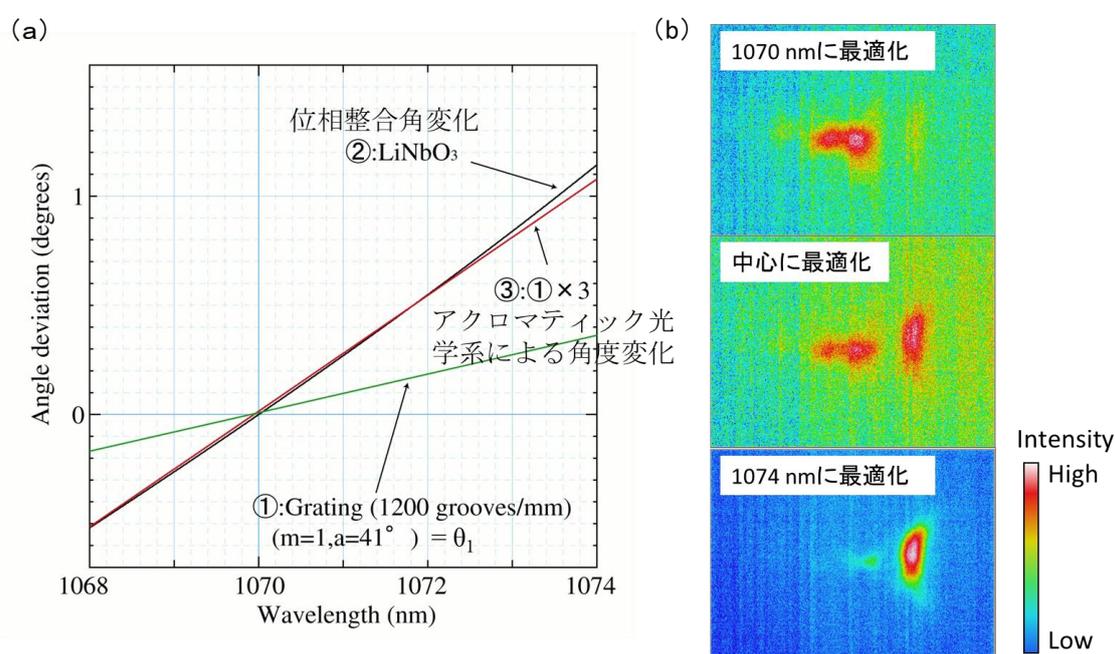


図 4.5 アクロマティック光学系の調整と 2 波長テラヘルツ波の出力変化 (a) アクロマティック光学系の角度変化と位相整合角変化 (b) アクロマティック光学系を各波長において最適化した場合の 2 波長の出力比

次に、発生した 2 波長テラヘルツ波の合計強度をテラヘルツ波用焦電検出器で直接観測した。注入光は 1070.0 nm と 1070.6 nm を使い、それぞれ 1.50 THz と 1.64 THz の発生に対応している。図 4.6 に示すように通常の is-TPG による 1.50 THz のみ (オレンジ線) および 1.64 THz のみ (黄線) の単一波長発生時と、1.50 THz と 1.64 THz の 2 波長発生時 (青線) でテラヘルツ波の出力とその安定性を比較した。単一波長発生時と 2 波長同時発生時の出力に差はなく 1.4kW 程度が得られた。安定性を示す変動係数 (または相対

標準偏差 RSD : relative standard deviation) は単一波長発生時が 0.84% (1.50 THz)、1.38% (1.64 THz) で、2 波長発生時は 1.11%であった。アンプの ASE 成分を用いる方法、およびそれを一度増幅する方法では、安定的なテラヘルツ波発生を行うことができなかったが、本方式を用いることで、単一波長発生時と同等の出力、安定性が得られた。なお、テラヘルツ波用焦電検出器では 2 波長を分離して検出は出来ないため、2 波長発生時は 2 波長出力の合計を計測した。

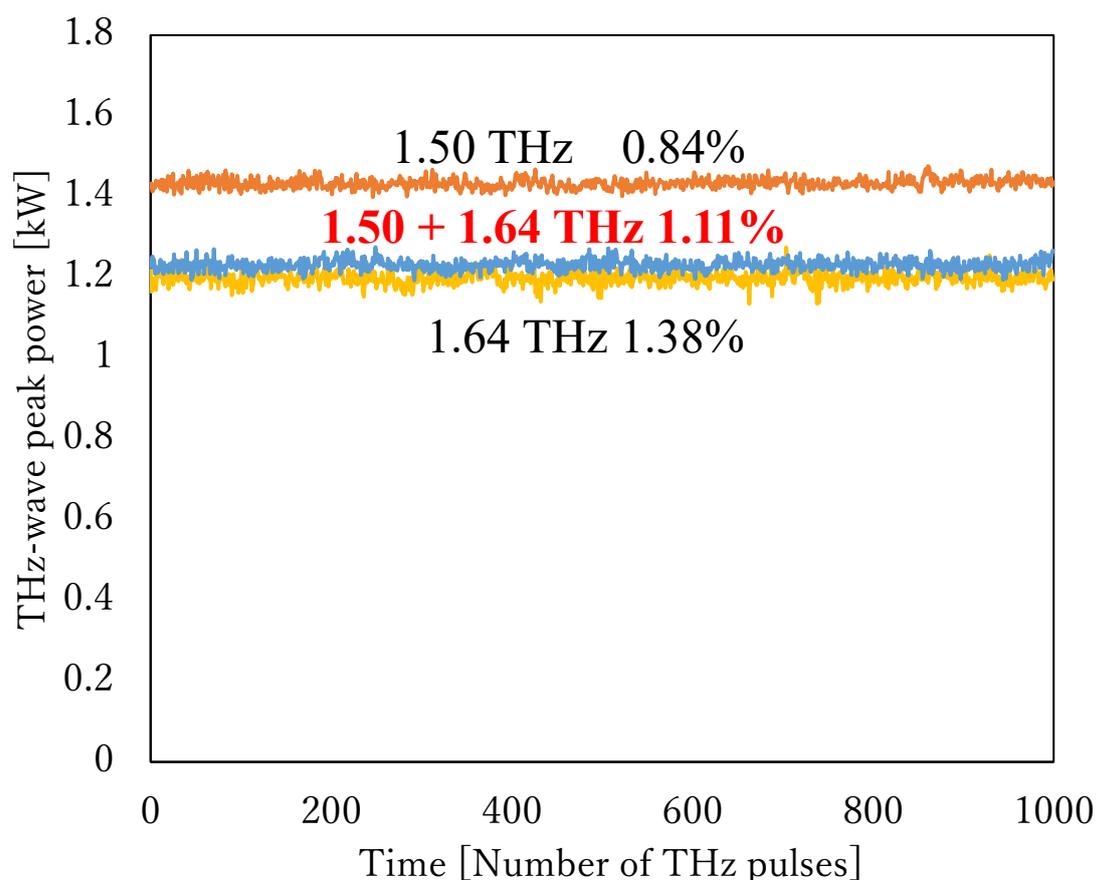


図 4.6 単一波長発生時と 2 波長発生時における、焦電検出器によるテラヘルツ波出力および安定性の比較

#### 4.3.2 増幅器の四光波混合を利用した多波長テラヘルツ波発生

以上のように安定的な 2 波長テラヘルツ波発生を 2 台の ECLD を用いて実現した。次に、ECLD からの 2 波長を半導体光増幅器に入射することで、増幅器内部の四光波混合[65]により図 4.7 に示すように 2 波長以上の多波長を得た。

ここで四光波混合とは、2波長あるいは3波長の相互作用により、新たな波長を生成する非線形光学効果であり、例えば、2台のECLDからの $f_1$ と $f_2$  ( $f_2 > f_1$ )の2波長が入力された場合、

$$f_3 = f_1 - (f_2 - f_1) = 2f_1 - f_2 \quad (4-1)$$

$$f_4 = f_2 + (f_2 - f_1) = 2f_2 - f_1 \quad (4-2)$$

となる $f_3$ および $f_4$ が出力される。さらに $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ の各波長間での相互作用により、再度多波長な光が生成され、多波長の注入光を得ることができる。

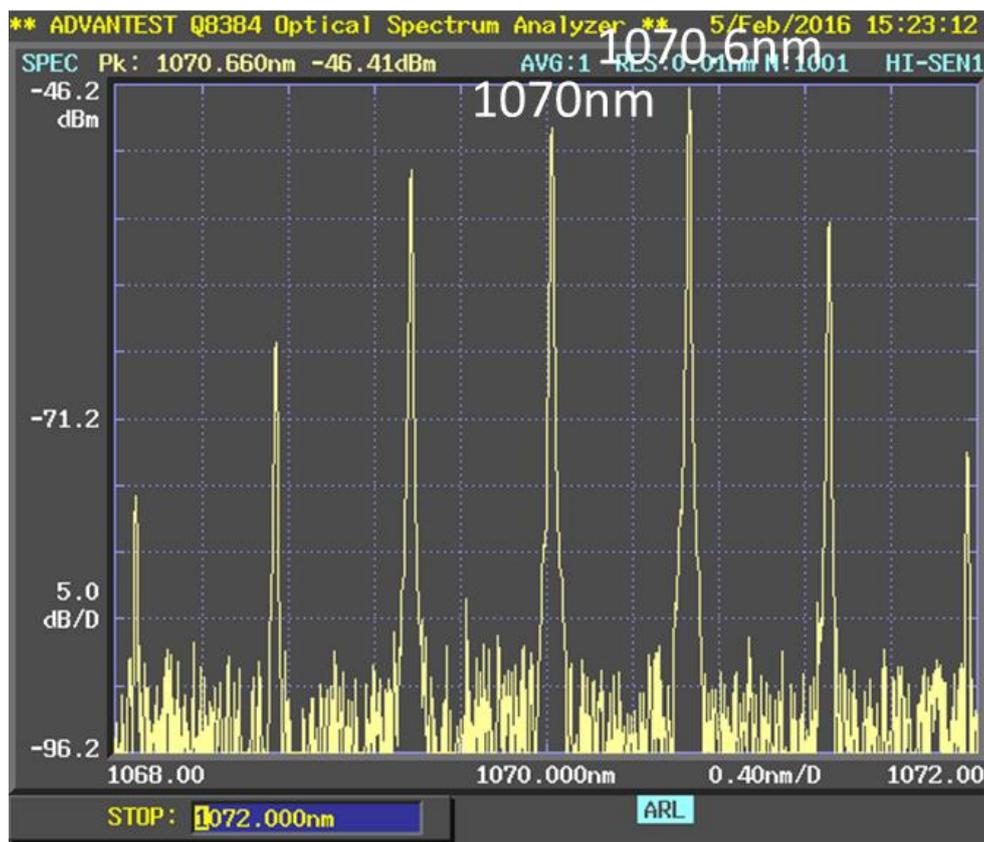


図 4.7 四光波混合による多波長注入光をスペクトラムアナライザーで観測した。入力した 1070.0 nm と 1070.6 nm だけでなく、等間隔で多数の波長の出力を観測できた。

実験系に変更は無いため、前節の測定時にも2波長以上のテラヘルツ波が出ていると考えている。しかし、四光波混合で出力される多波長注入光は、ECLDの2波長以外は相対的に弱い。そのため、発生するテラヘルツ波も2波長以外は一桁以上弱く、テラヘルツカメラやテラヘルツ波用焦電検出器では検出が難しい。ゆえに前節の測定は2波長によるものと考えた。一方で、本節では検出方法として図4.2に示すように検出側結晶で近赤外検出光に波長変換する方式を用いた場合を述べる。本検出方式では、弱いテラヘルツ波でも検出でき、さらに多波長のテラヘルツ波が同一光路で入力されても、各波長を分離して検出可能である。また、近赤外検出光の発生角度から、検出したテラヘルツ波の周波数が得られるため、簡便な分光器として機能する。図4.8に実験系の写真および、観測された検出光を示す。近赤外検出光をビームプロファイラで観測することで、4波長のテラヘルツ波を同時に検出できた。左から1.32 THz、1.54 THz、1.76 THz、1.98 THzの検出光である1069.51 nm、1070.35 nm、1071.18 nm、1071.92 nmを示す。is-TPGによる4波長テラヘルツ波の同時発生および検出を初めて実現した。

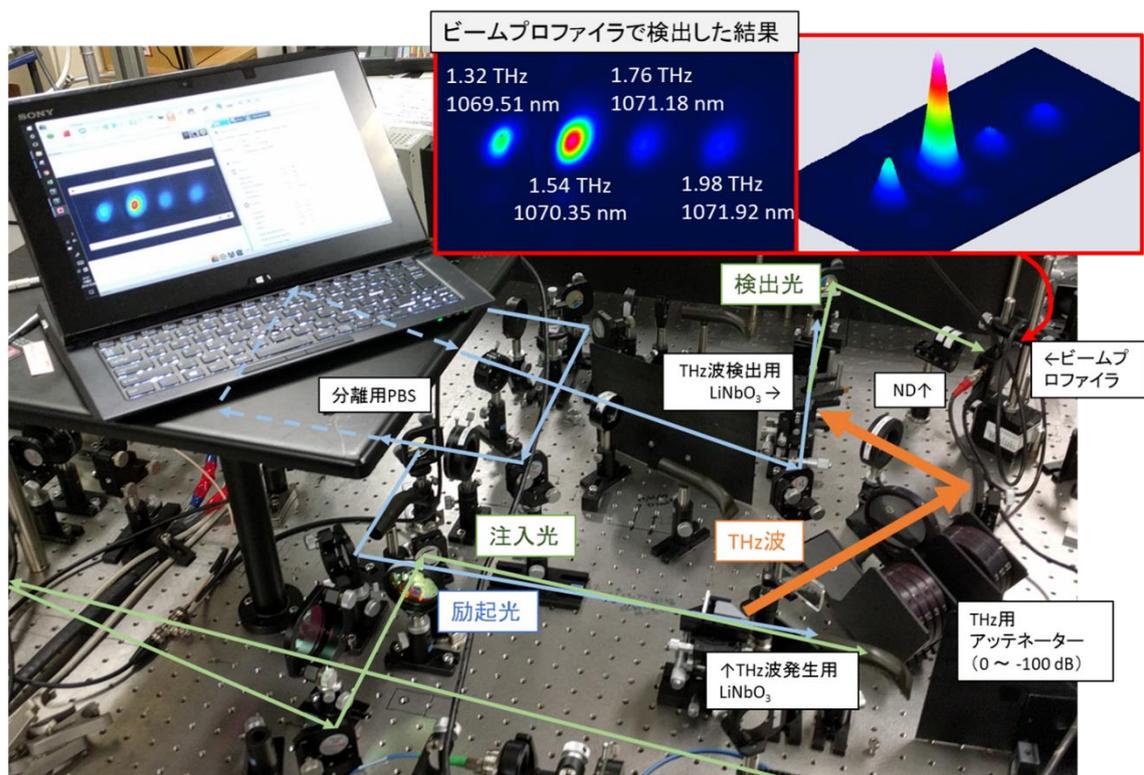


図 4.8 増幅器の四光波混合で注入光を多波長化することにより多波長テラヘルツ波発生を行った実験系の写真、およびその時の検出光測定結果

次に本実験系を用いてシステムのダイナミックレンジ測定を行った。テラヘルツ波光路中にアッテネーター (Transmittance: 30%, 10%, 3%, 1%) を2セット挿入し0~-60 dBまで減衰させた。図4.9に示すように、テラヘルツ波減衰に伴い4波長とも同じように減衰していき、最大で約6桁のダイナミックレンジを確認できた。同一の方法で確認した単一波長発生時のダイナミックレンジは約7桁で、4波長発生時でも単一波長発生時に近いダイナミックレンジが得られた。

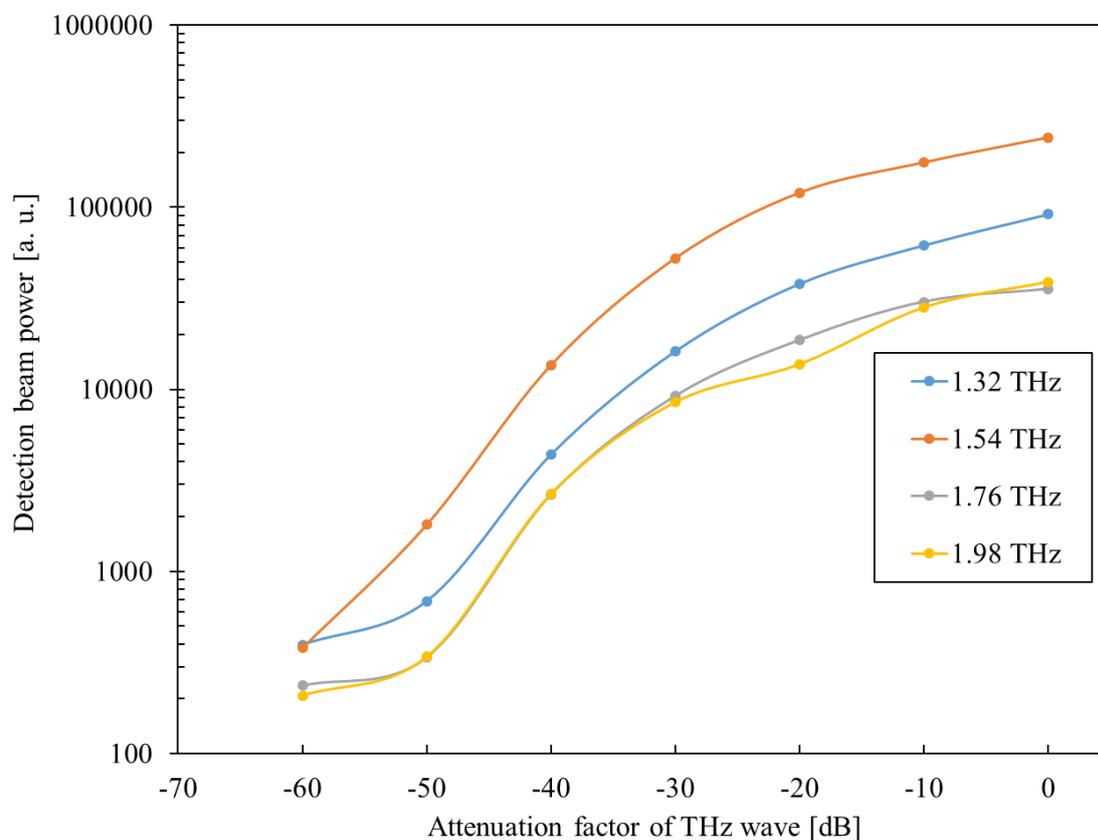


図4.9 ビームプロファイラを用いた、4波長のテラヘルツ波 (1.32 THz、1.54 THz、1.76 THz、1.98 THz) 発生時のダイナミックレンジの結果。

### 4.3.3 5 台の ECLD を用いた 5 波長テラヘルツ波発生

以上のように四光波混合を用いて 4 波長までのテラヘルツ波発生が実現した。ECLD の台数以上に波長が得られる利点はあるが、出力比を任意に決める事ができず、また波長間隔も入力した 2 波長の間隔で決まるため一定となる。そこで本節では ECLD の台数を増やし、四光波混合を用いずに多波長テラヘルツ波発生を行った。各波長を自由に選択でき、さらにその出力比も容易に調整可能であることから、安定的かつ、出力がほぼ同じテラヘルツ波が発生可能となる。その一方でレーザーの台数だけコストや装置が大きくなるなどの問題がある。

図 4.10 に 5 波長発生時の検出光を示す。1.36、1.48、1.64、1.82、2.00 THz の 5 波長の発生及び検出を実現した。四光波混合を用いた場合に比べて、全ての出力がおおよそ同レベルであり、また、波長間隔も任意に調整できた。この時、出力を揃えるために各波長の ECLD 出力を細かく調整した。具体的には、is-TPG で多波長発生を行うと、位相整合が良好な中心波長付近で利得の引き込みが起こり、中心波長のみが強くなりやすい。そのため、中心波長付近の注入光出力を下げ、両端付近の波長の注入光出力を強くすることで、図のように全波長で同程度の出力を実現した。本システムを用いることで、任意の試薬の吸収ピーク位置にテラヘルツ波周波数を合わせる事が可能となった。実際に試薬の測定を行った結果を次節に示す。

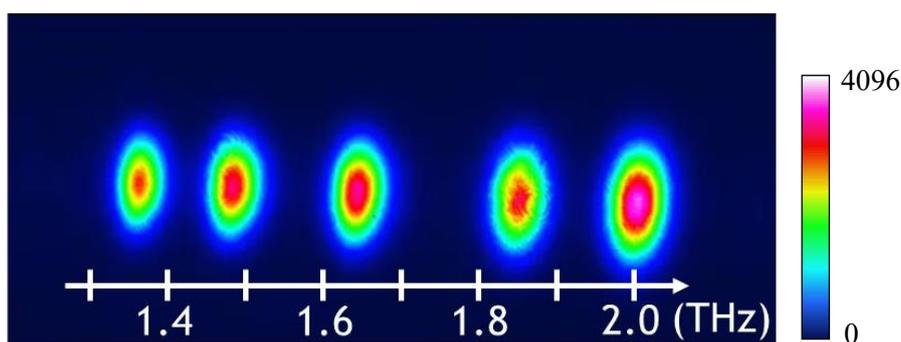
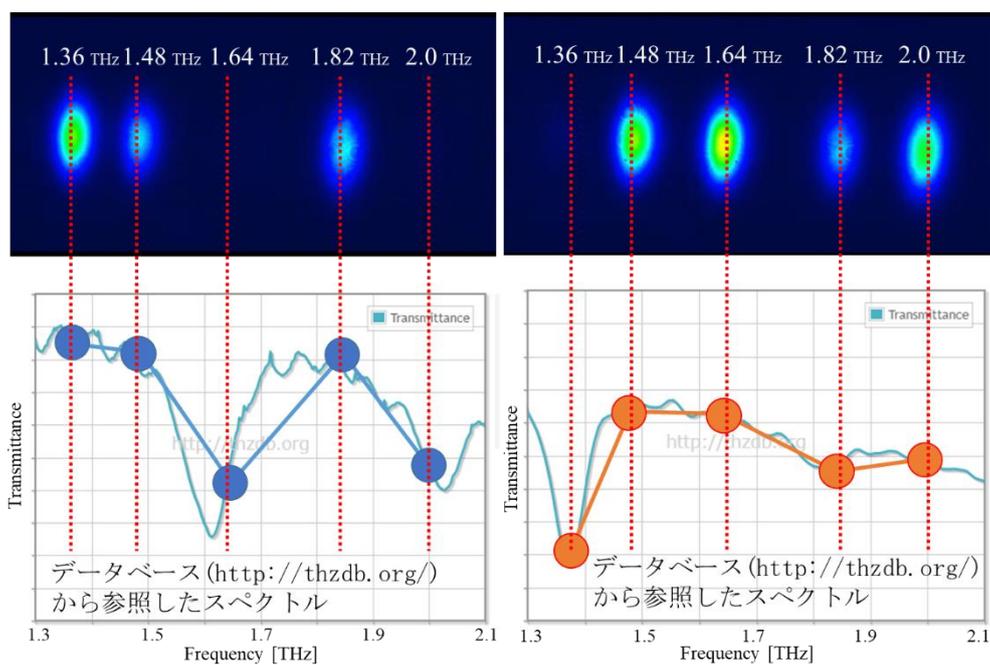


図 4.10 5 波長テラヘルツ波同時発生および検出結果。全ての波長で同程度の出力を実現した。

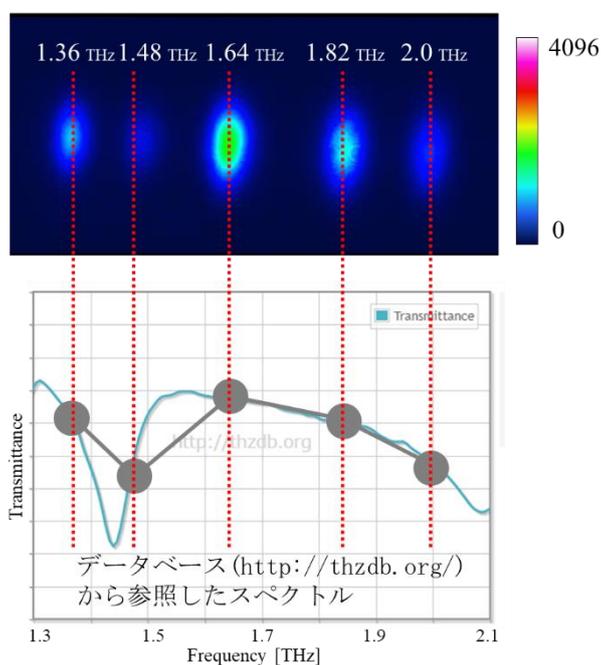
## 4.4 多波長テラヘルツ波同時発生を用いた1ショットリアルタイム分光測定

最後に、本システムを用いて実際に3種類の糖類を分光計測した結果について記す。マルトース、グルコース、ラクトースの40%含有ペレット（60%はポリエチレン）を、前述の5波長のテラヘルツ波光路中に設置し分光計測した。各試薬の吸収スペクトルはマルトースが1.61 THzと2.03 THz、グルコースは1.45 THzと2.10 THz、ラクトースは1.37 THzと1.81 THzである。用いた5波長の周波数は、その吸収ライン[62]に重なるように選択した。各試薬を挿入した際の検出光変化を図4.11に示す。試薬を挿入すると即座にそれぞれの試薬の吸収スペクトルの周波数に一致したテラヘルツ波の減衰が確認でき、多波長is-TPGを用いて1ショットで糖類の識別が実現した。レーザーの繰り返し周波数（11 Hz）のフレームレートで測定が行えるため、リアルタイムでの試薬識別が実現したといえる。



(a) マルトース挿入時

(b) ラクトース挿入時



(c) グルコース挿入時

図 4.11 5 波長 is-TPG による 1 ショットリアルタイム分光測定結果。下の実線はデータベースから参照した各試薬の吸収スペクトル。それぞれの試薬の吸収スペクトルの周波数に一致したテラヘルツ波の減衰が確認でき、1 ショットで糖類を識別できた。

## 4.5 本章のまとめ

本章では多波長テラヘルツ波発生を行い、1ショット分光実現を目的に研究を行った。多波長テラヘルツ波を発生するために必要な多波長注入光として、当初、半導体光増幅器の ASE 光を利用する方法を考案した。スリットの位置で波長を変えることができ、スリット数が波長数に対応するため、容易に多波長化が実現可能であるが、ASE 光自体の不安定性故に安定的なテラヘルツ波発生ができず、応用測定は難しかった。そこで、本稿では、複数台の ECLD を用いて多波長注入光を作成した。まずは 2 台の ECLD の出力を増幅器内部の四光波混合により多波長化し用いた。4 波長までの安定的な発生、検出が実現し、ダイナミックレンジ最大 6 桁が得られた。その後、ECLD を 5 台まで増やして、5 波長発生を行った。波長および出力をそれぞれ独自に制御できるため、試薬の吸収に合わせた波長設定が容易に行え、また、全ての波長で出力を揃えることができ、正確な測定が実現する。実際にテラヘルツ波光路中に糖類のペレットを挿入した際の検出光変化を測定した所、サンプル挿入と同時に出力変化が確認でき、1 ショットでの分光が実現した。本方式を用いることで、カメラのビデオレートで測定が行えるため、従来では困難であったリアルタイム測定が実現する。

今後は複数台の ECLD と四光波混合を組み合わせ、20 波長程度までの発生を目指す。四光波混合で発生した光は入力光と比べて弱いため、そのままでは 20 波長の注入光として用いることができない。安定的な多波長テラヘルツ波発生を行うためには全波長で出力を揃える必要があり、今後その方策を検討し、実現していきたい。

# 第5章 高安定リアルタイム分光システム

## 5.1 はじめに

前章において多波長テラヘルツ波発生によるリアルタイム分光装置開発を行った。ビデオレートでのリアルタイム分光が実現したが、実際の応用を目指した際に課題が残っている。その一つに、各波長間での利得競合による不安定性がある。多波長発生の際、多波長の出力合計値はほぼ一定で安定的であるが、各波長の出力をみると利得競合が発生しある波長が強くなると他の波長が弱くなり、安定性が低下する。この不安定性を克服しないとリアルタイムでの応用測定は難しい。そこで本章では、実験系の改良により測定の安定性向上を目指した。

## 5.2 is-TPG の不安定要因

多波長発生は、各波長間での利得競合のため単一波長発生時に比べて不安定になりやすく、励起光や注入光の僅かな変化で出力比が変わってしまう。この揺らぎを引き起こす原因としては、励起光の各パルス間での僅かな出力揺らぎ、励起光の横モードの僅かな乱れ、励起光のポインティングスタビリティ、注入光の各波長間の出力揺らぎ、および空気の流れによる揺らぎ、などが挙げられるが、主因が特定できていない。

## 5.3 高安定化方法

上述のように多波長テラヘルツ波の不安定性の主因がわかっていないため、本章では安定的なテラヘルツ波発生を行うのではなく、出力されたテラヘルツ波を2つに分割し、レファレンス光も同時取得することで安定的な測定を目指した。

実験系を図 5.1 に示す。マイクロチップ Nd:YAG レーザーからの出力光を増幅し、テラヘルツ波発生用結晶、サンプル測定光検出用結晶、レファレンス光測定用結晶に励起光を3分割した。注入光として3台の ECLD を増幅して用い、アクロマティック光学系を通すことで、全ての波長で角度位相整合角が満たされる。テラヘルツ波発生用結晶から出力されたテラヘルツ波を10%反射のポリ塩化ビニリデンフィルム(食品用ラップ)で2つに分割し、反射光をレファレンス光とし、透過光をサンプル測定用に用いた。サ

サンプル測定光は 10%減衰するが、それは 0.05 桁程度の僅かな減衰であり、実質的にダイナミックレンジはほとんど低下しない。また、レファレンス光は 10%の反射であり、サンプル測定光に比べて 1 桁弱い。参照用途には十分高い出力といえる。サンプル測定光は、サンプル透過後に検出用結晶で近赤外光に波長変換し、レファレンス光は別の検出用結晶で近赤外光へと波長変換した。次いでこれら検出光をビームプロファイラで同時に検出した。

この実験系を用いて、単一波長発生時において 2 つの検出光がどのような挙動を示すのかを確認し、次いでサンプル測定光をレファレンス光で除することで測定値の安定性向上を図った。その後、3 波長発生についても同様に試みた。

## 5.4 単一波長発生時の高安定化

まずは 1.46 THz の単一波長発生を行い、本手法の有効性を検証した。

### 5.4.1 サンプル測定光とレファレンス光の相関

サンプル測定光とレファレンス光のプロファイルを図 5.2 に示す。それぞれの検出光強度が同程度となるように、励起光強度、およびテラヘルツ波入射ミラーの調整を行った。動画でみると、2 つの検出光が同じように動き、相関が見て取れた。そこで、それぞれの出力の時間経過を測定した結果を図 5.3 に示す。短時間のパルス毎のゆらぎだけでなく、長時間の出力も同じように変化していることがわかる。相関係数を計算すると 0.95 であり比較的高い値が得られた。

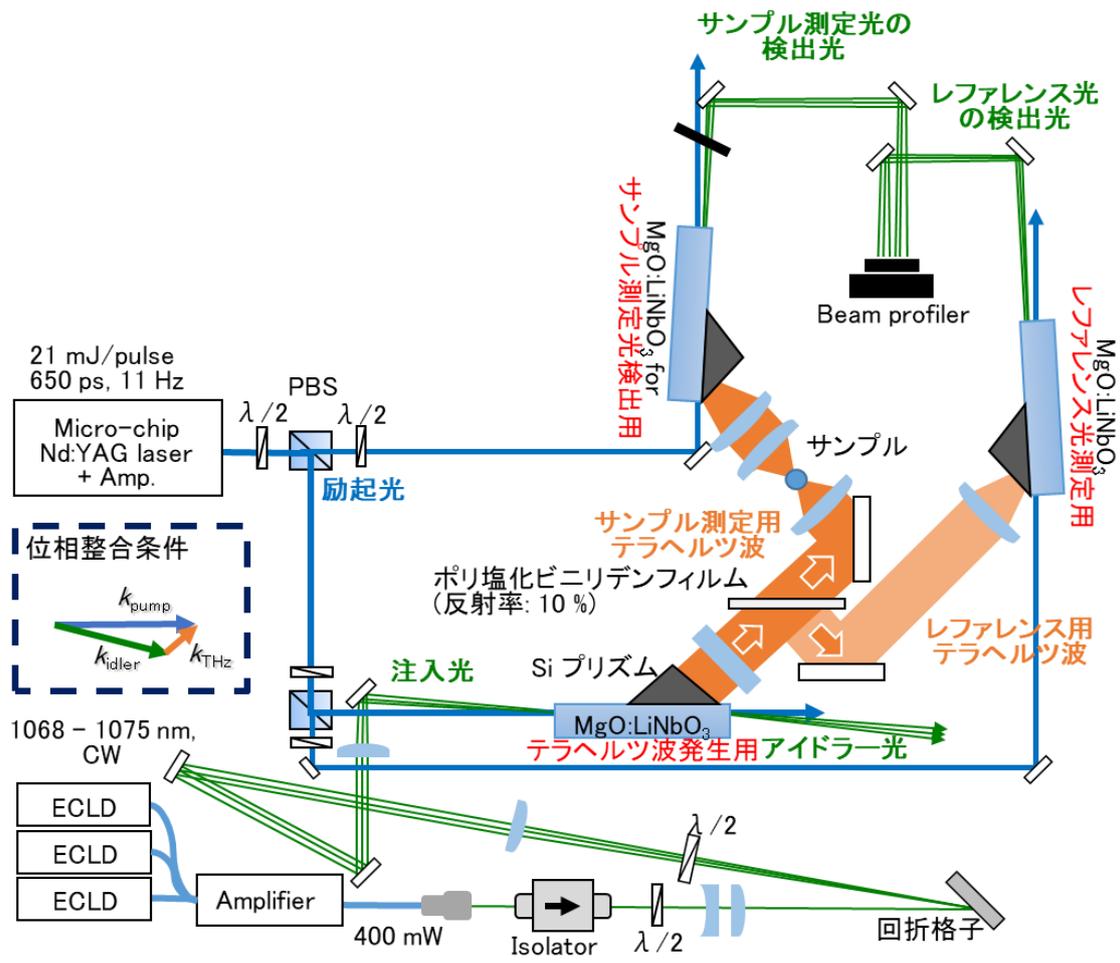


図 5.1 高安定リアルタイム分光システムの実験系

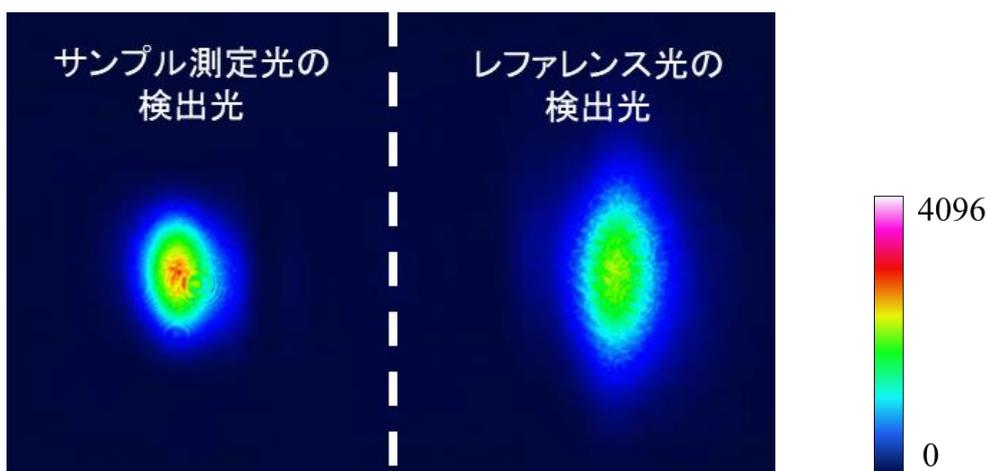


図 5.2 単一波長発生時におけるサンプル測定光とレファレンス光の検出光プロファイル

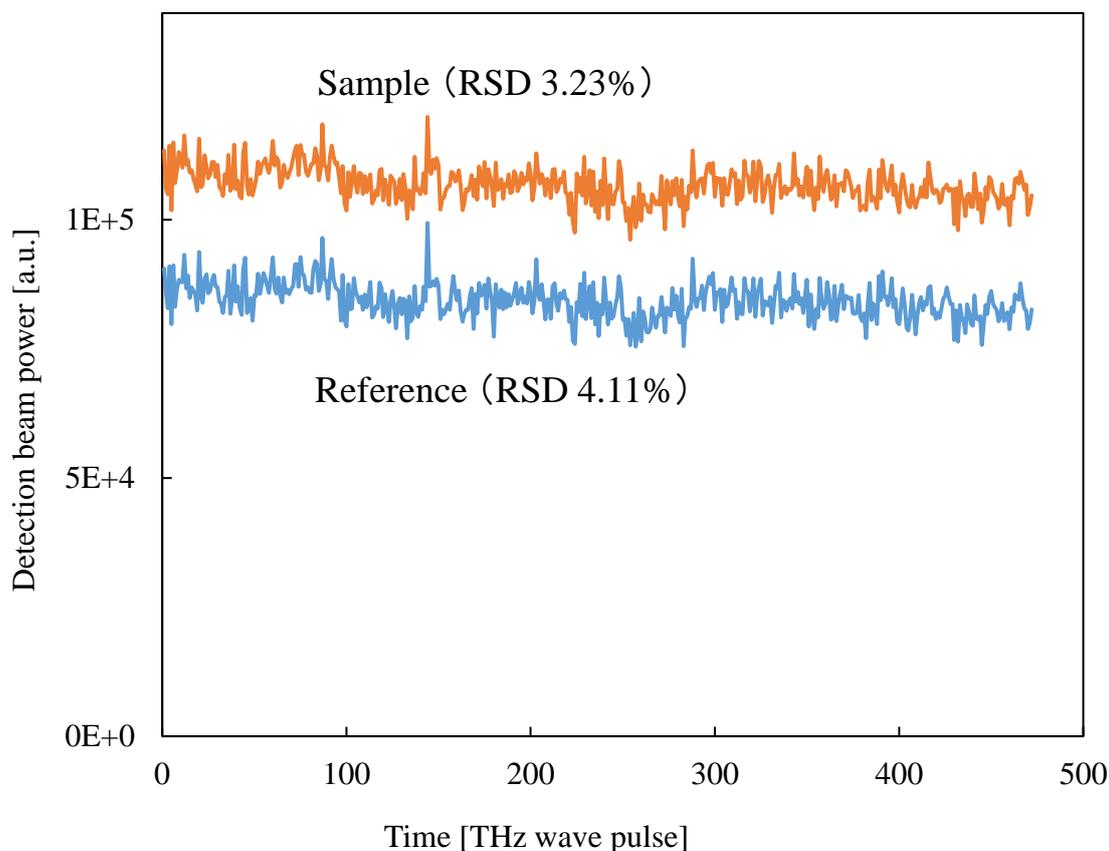


図 5.3 単一波長発生時におけるサンプル測定光およびレファレンス光の出力の時間安定性。安定性の指標として相対標準偏差 (RSD, Relative Standard Deviation) を用いた。

#### 5.4.2 安定化処理結果

次にその2つの検出光出力から安定性向上を図った結果を図 5.4 に示す。サンプル測定光をレファレンス光で除して、正規化して表示した。図 5.3 に比べてゆらぎが抑制できていることがわかる。また、元データでは時間経過とともに出力が落ちていたのだが、処理を加えることでその長時間の出力変化も抑えることに成功した。サンプル測定光の安定性が 3.23%であったが、安定化処理により 1.48%に向上した。

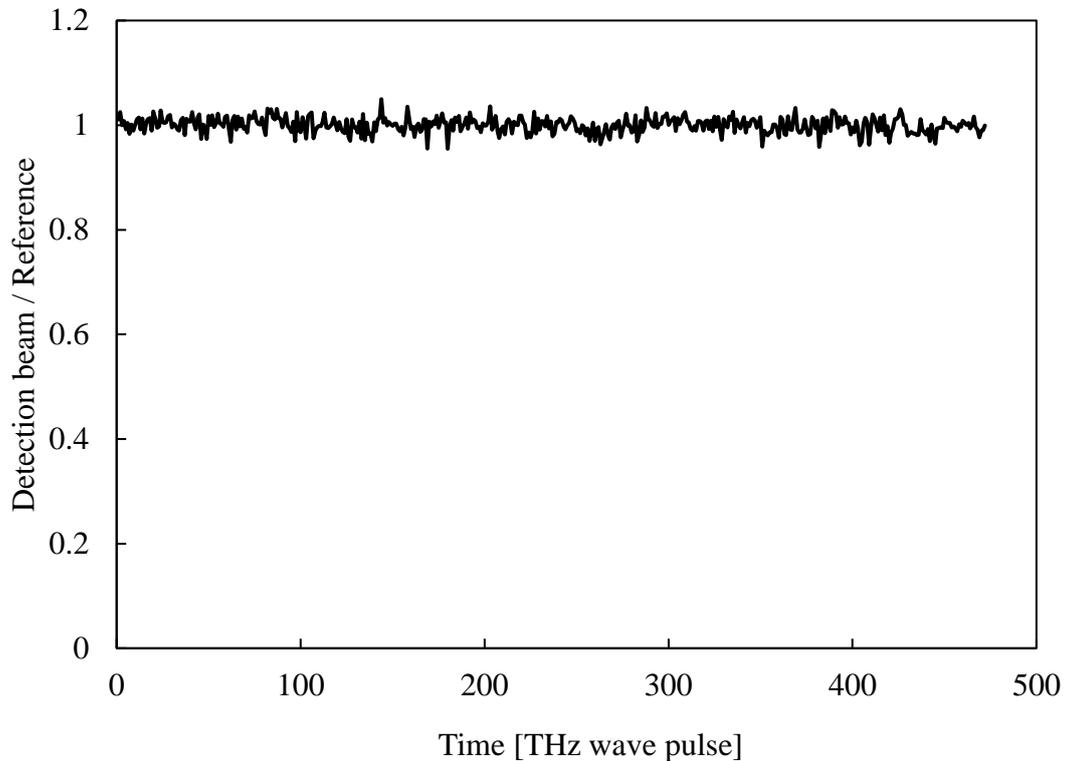


図 5.4 単一波長発生時における安定性向上結果。パルス間のゆらぎだけでなく、長時間の出力変動も抑えることに成功した。

## 5.5 3 波長発生時の高安定化

次に ECLD3 台を用いて 3 波長発生を行い、安定化処理の実験的検証をおこなった。

### 5.5.1 サンプル測定光とレファレンス光の相関

図 5.5 に、1.47、1.64、1.81 THz の 3 波長発生時におけるサンプル測定光とレファレンス光のプロファイルを示す。矢印で結ばれた 2 つの輝点は同じ波長の検出光を示している。それぞれの検出光強度が同程度となるように、励起光強度、およびテラヘルツ波入射ミラーの調整を行った。

3 波長発生時においても、検出光変化を動画でみると 2 つの検出光が同じように動き相関が見て取れた。それぞれの出力の時間経過を測定した結果を図 5.6 に示す。どの周波数においてもレファレンス光とサンプル測定光間には相関が見て取れ、0.9 程度の比較的高い相関係数が得られた。

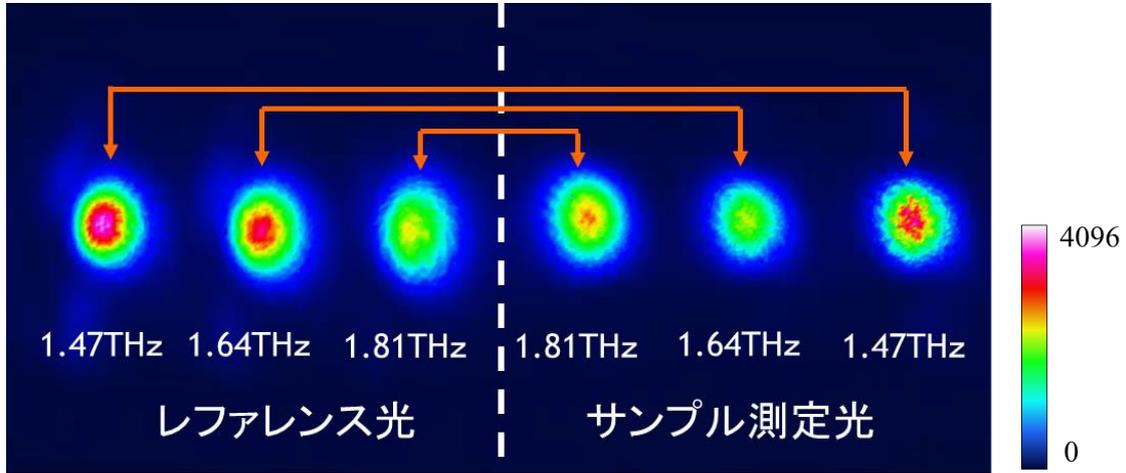
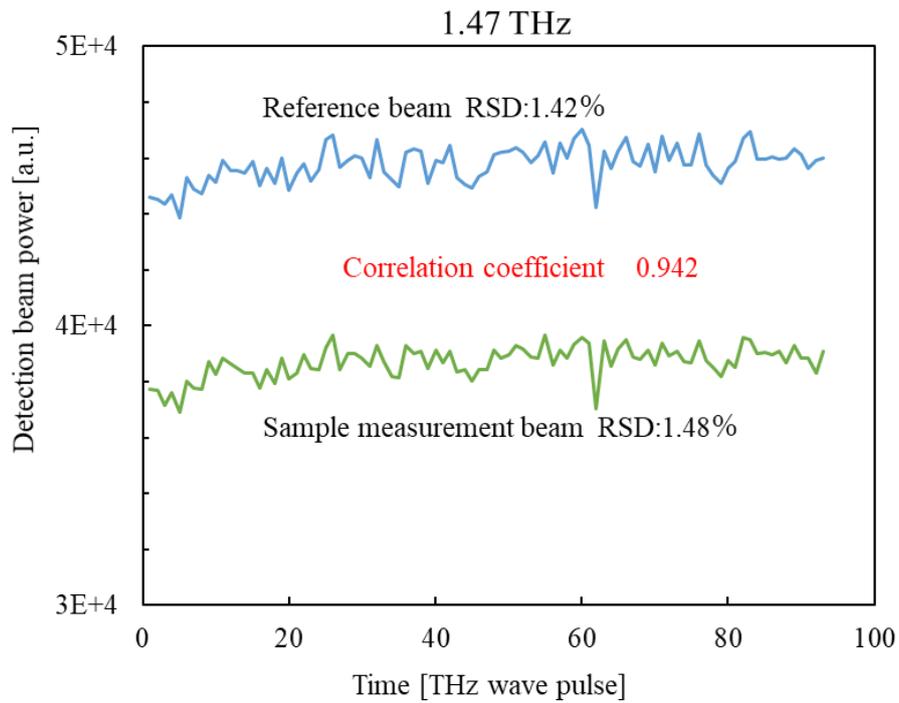


図 5.5 3 波長発生時におけるサンプル測定光とレファレンス光の検出光プロファイル。  
矢印で結ばれた 2 つの光が同じ波長の検出光を示す。



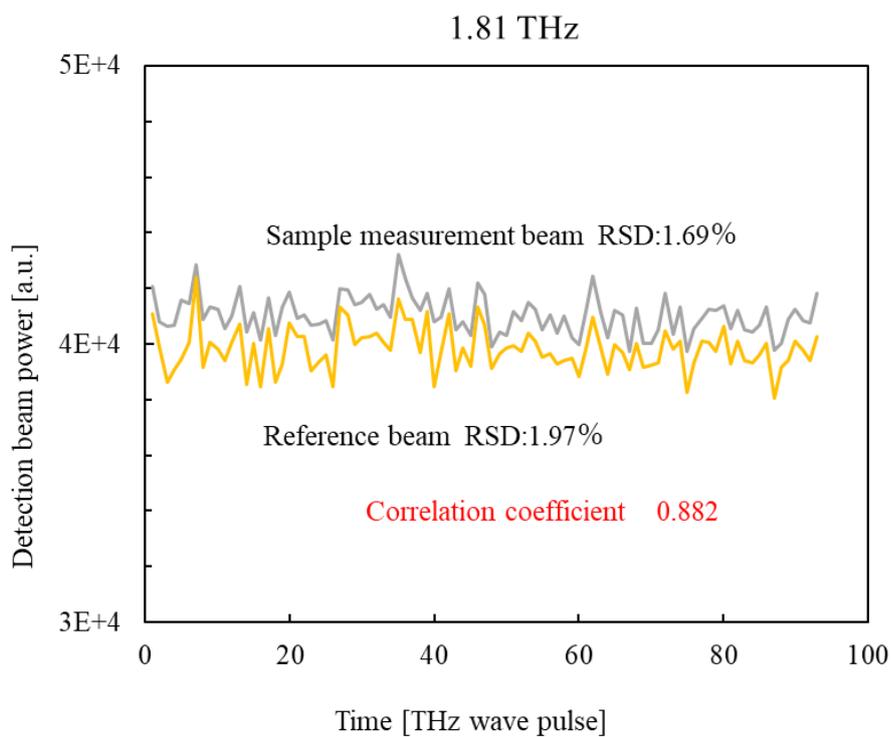
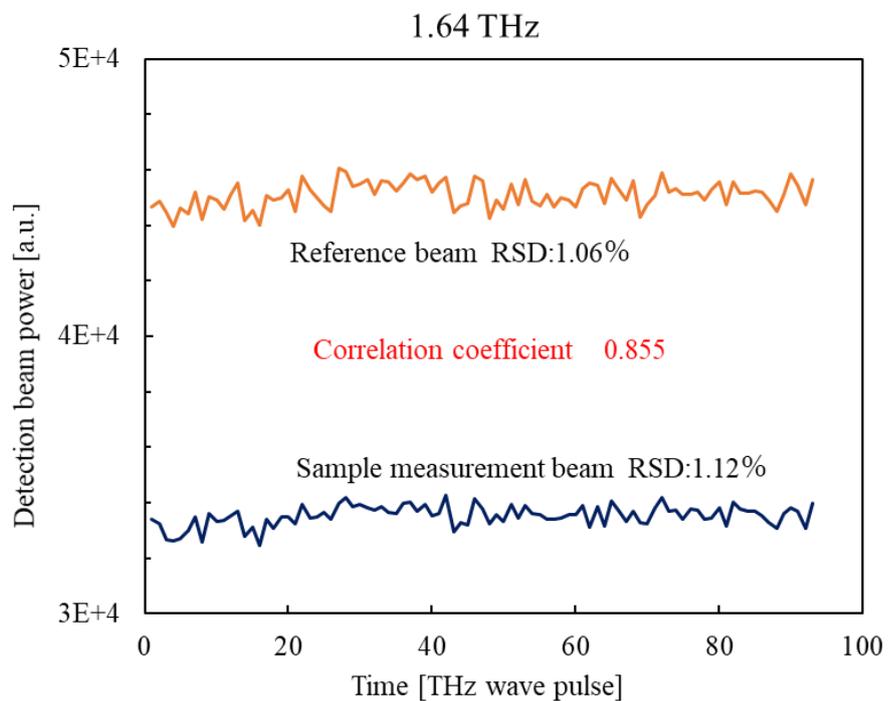
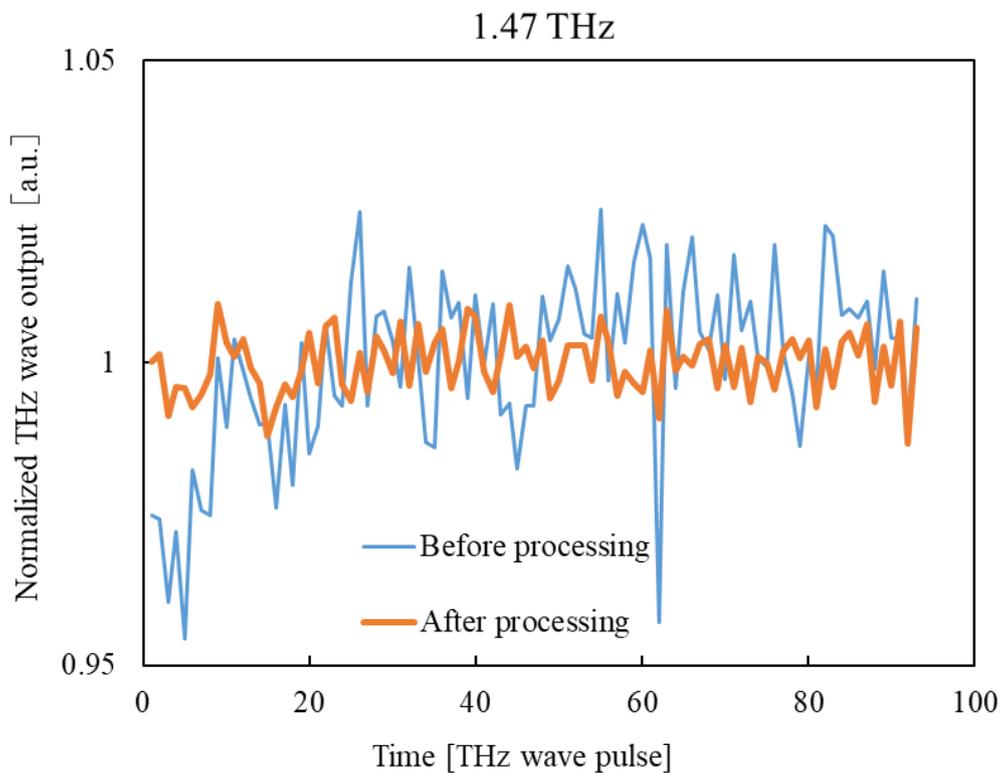


図 5.6 3 波長発生時のサンプル測定光およびレファレンス光の出力時間変化および安定性

## 5.5.2 安定化処理結果

次に本結果より安定化を図った結果を図 5.7 に示す。安定性向上前の青線は、サンプル測定光を正規化して表示し、オレンジ線の安定性向上後は、サンプル測定光をレファレンス光で除してその後正規化して表示した。この処理によりどの波長でも安定性向上が確認でき、1.47 THz では従来 1.42% だったものが 0.50% に、1.64 THz では従来 1.12% だったものが 0.59% に、1.81 THz では従来 1.97% だったものが 0.93% に、それぞれ改善した。不安定性を 1% 以下まで抑制することに成功したが、依然としてパルス間のゆらぎは多少残っており改善の余地はある。



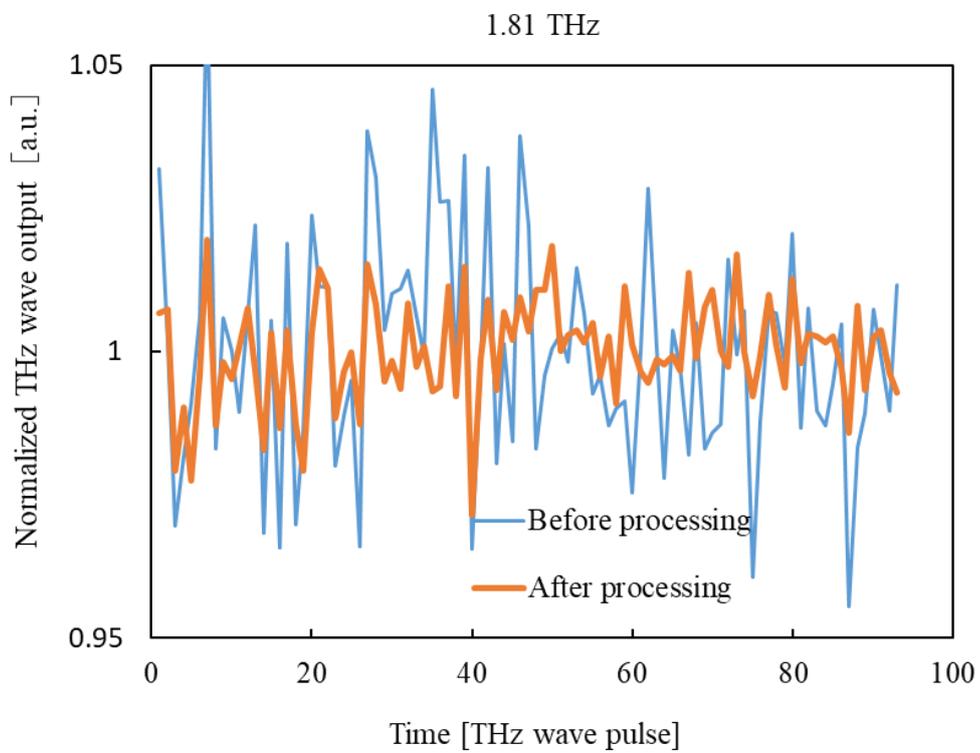
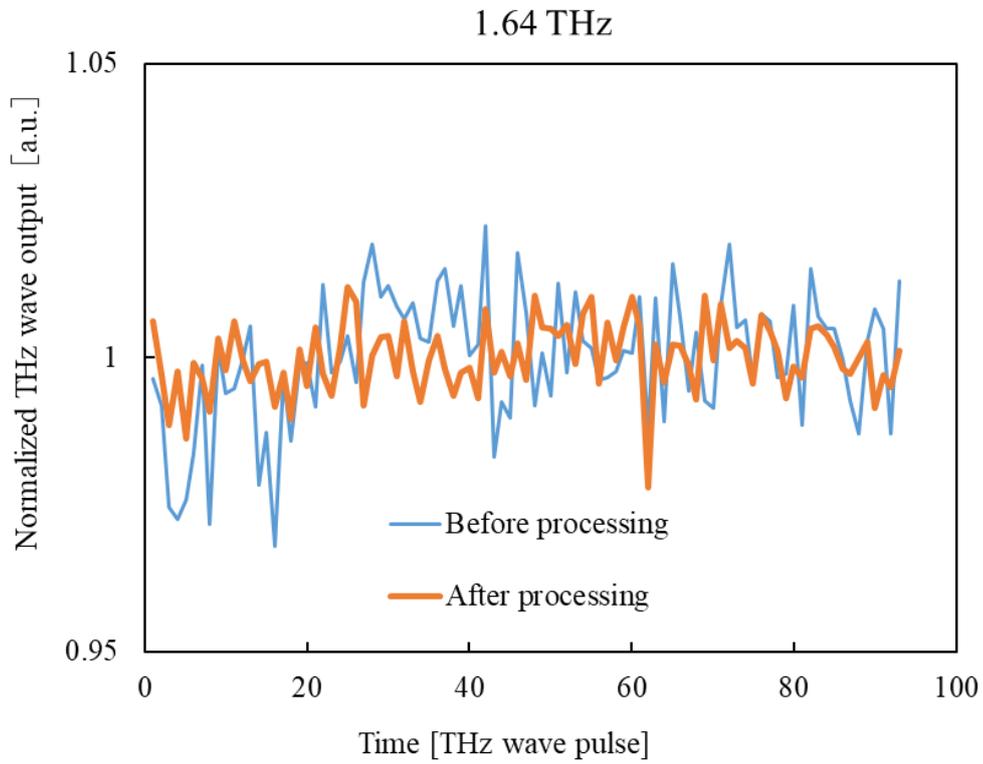


図 5.7 3 波長発生時におけるテラヘルツ波出力の安定化処理前後の比較

## 5.6 本章のまとめ

多波長発生時にテラヘルツ波発生が不安定になる要因は、励起光、注入光および空気の揺らぎ等様々が考えられるが特定できていない。そこで本章では実験系の改良によりその揺らぎをキャンセルできる装置開発を行った。テラヘルツ波ビームを2つに分割し、サンプル測定光とは別にレファレンス光を同時取得し、前者を後者で除して安定化を図った。それら2つの検出光間には比較的高い相関があり、3波長発生時においても不安定性を1%以下に抑制することに成功した。本システムは従来の分光システムやイメージングシステムでも用いることができ、例えば測定に数時間を要するテラヘルツ波CTの測定において、長時間の出力変動による影響を低減することができる。また、分光イメージングシステムにおいても、パルス間の揺らぎによるノイズを除去し、より正確な試薬同定が実現すると考えられる。

# 第6章 高利得テラヘルツ波パラメトリック

## 増幅システム

### 6.1 はじめに

これまでに is-TPG を用いた分光システム開発とその応用に関して述べた。ダイナミックレンジ 10 桁に迫る分光システム、および 1 ショット高安定分光システムを構築し、20 mm 以上の分厚い遮蔽物越しの試薬の分光イメージングなど、他の光源では難しい応用計測を実現した。他方、is-TPG の原理を用いて、テラヘルツ波の高利得パラメトリック増幅も可能である[66],[67]。テラヘルツ波光源の研究に比べて、世界的に報告例の少ないテラヘルツ波増幅技術を確立することで、極微弱テラヘルツ波の利用範囲拡大を目指した。

修士論文の研究で、1.6 THz で数十 aJ の入力に対して 60 dB 以上の増幅度を実現した[67]。しかし当時の技術では、入力に依存しない広帯域なテラヘルツ波パラメトリック発生 (TPG) がノイズとなり、利得の低い低周波の極微弱テラヘルツ波の増幅は難しかった。そこで本研究では、不要 TPG を抑えた新たな増幅システムを考案し、低周波の極微弱入力に対して、高い増幅度実現を目指した。

### 6.2 テラヘルツ波のパラメトリック増幅法

is-TPG の原理を用いてテラヘルツ波の増幅が可能である。LiNbO<sub>3</sub> 結晶に励起光を入射すると、ポラリトンを介した誘導ラマン散乱により、テラヘルツ波とアイドラー光に分割され、それぞれ広帯域に TPG が生じる。ここに注入光を入射することで、単一周波数発生が実現する。通常 of テラヘルツ波発生では、注入光として近赤外光を用いるが、テラヘルツ波増幅では図 6.1 に示すように、注入光としてテラヘルツ波を用いる。このとき、テラヘルツ波の入射により、広帯域に発生しているアイドラー光とテラヘルツ波が狭線化され、励起光とテラヘルツ波の相互作用により、テラヘルツ波が励起光からエネルギーを得て増幅される。

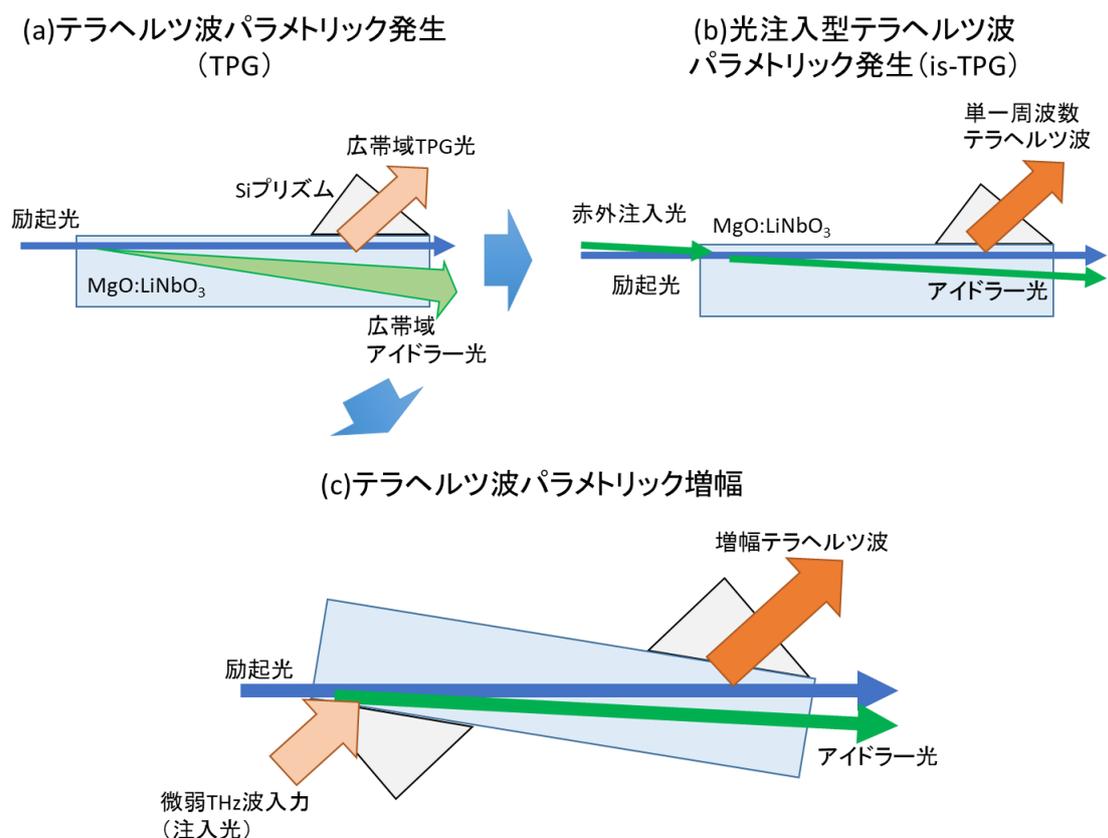


図 6.1 テラヘルツ波増幅概略図 (a) テラヘルツ波パラメトリック発生 (TPG)  
 (b) 近赤外光を注入光とした光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生器 (is-TPG)  
 (c) テラヘルツ波を注入光としたテラヘルツ波パラメトリック増幅器

## 6.3 従来手法によるテラヘルツ波のパラメトリック増幅

### 6.3.1 従来手法の実験系および実験結果

図 6.1 の原理を用いた増幅の実験系を図 6.2 に示す。励起光としてマイクロチップレーザーを増幅して 11 mJ とし、それを入力テラヘルツ波発生用 is-TPG に 8.5 mJ、増幅部に 2.5 mJ に分割して用いた。is-TPG で発生したテラヘルツ波をレンズ、ミラーで取り回し、Si プリズムカップラーを介して増幅部に入射し、LiNbO<sub>3</sub> 結晶 2 個を用いて増幅を行った。

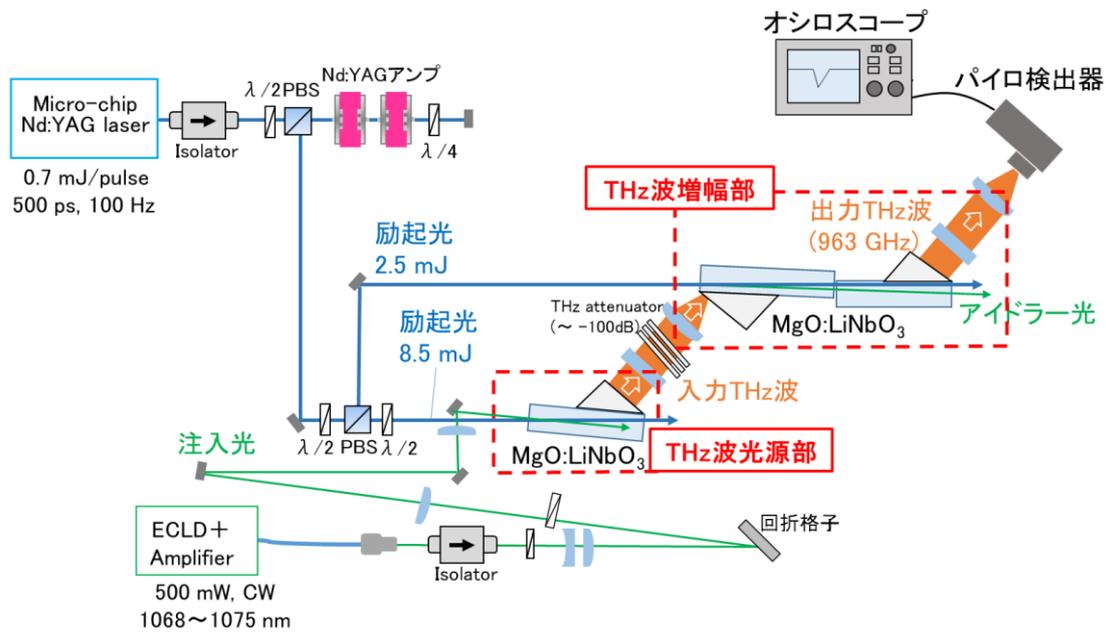


図 6.2 従来（2014 年）のテラヘルツ波パラメトリック増幅システム。入力と出力を同一箇所で行っていた。

図 6.3 (a) にパラメトリック利得の中心周波数の 1.6 THz におけるテラヘルツ波の入出力特性を示す。テラヘルツ波入力が強い場合の出力はほぼ一定となり、1 nJ 程度を示した。その一方で 100 fJ 以下になると、入力に伴ってテラヘルツ波出力も弱くなる。最低で 20 aJ の入力に対して、6.6 pJ の増幅が実現した。この結果より増幅度を計算した結果を図 6.3 (b) に示す。図 6.3 において出力が一定の領域では入力が低下するにつれ増幅度は上昇し、その一方で出力が変化する領域では増幅度は一定になった。最小入力 20aJ に対して、40 万倍（55 dB）の増幅が実現した。

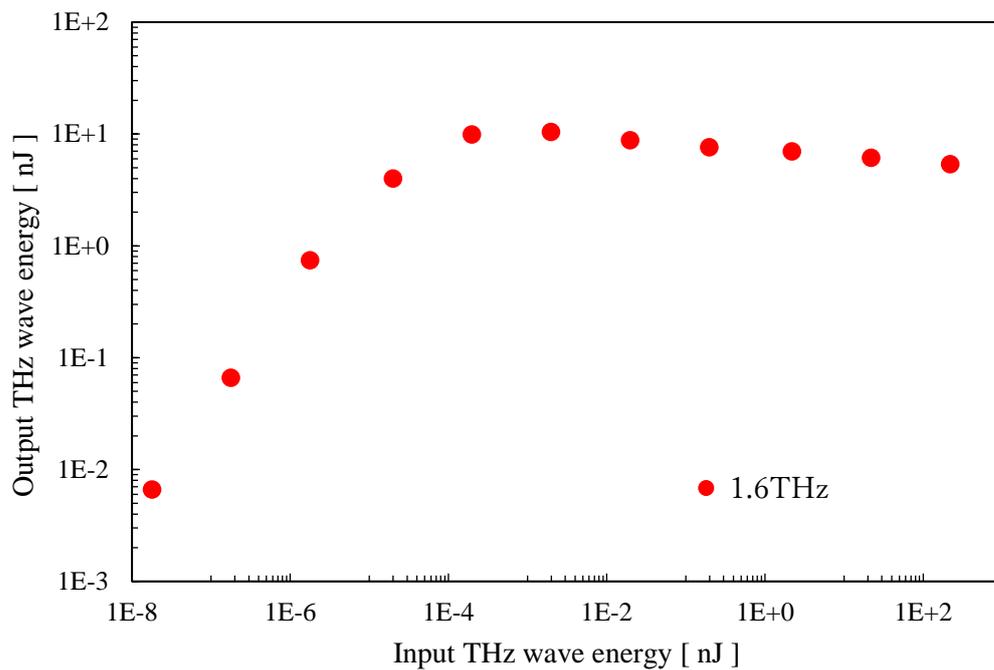


図 6.3 (a) 2014 年（修士課程）の増幅器の入出力特性

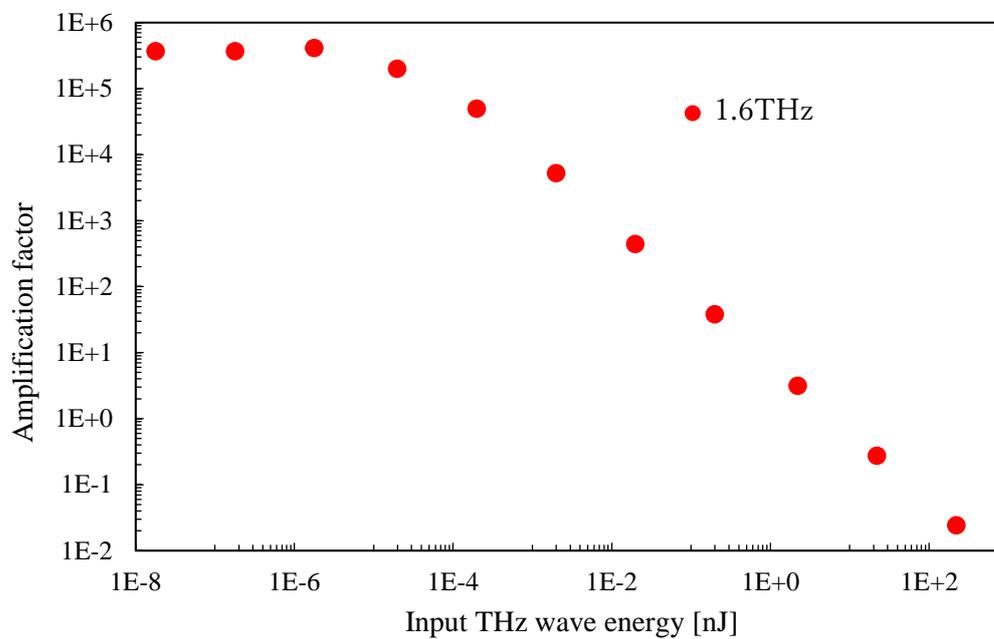


図 6.3 (b) 2014 年（修士課程）の増幅器の増幅度の入力テラヘルツ波エネルギー依存性

### 6.3.2 従来の問題点

次に、従来の実験系を用いた中心周波数以外の周波数域における増幅について述べる。図 6.4 (a) は各周波数における入出力特性を、図 6.4 (b) はその時の増幅度、図 6.4 (c) は最大増幅度の周波数依存性を示す。パラメトリック利得の中心周波数の 1.6 THz では高い増幅度が得られた一方で、他の周波数域では中心周波数ほどの増幅度が得られなかった。また、最低入力も中心周波数に比べて大きく、極微弱光の増幅が難しかった。

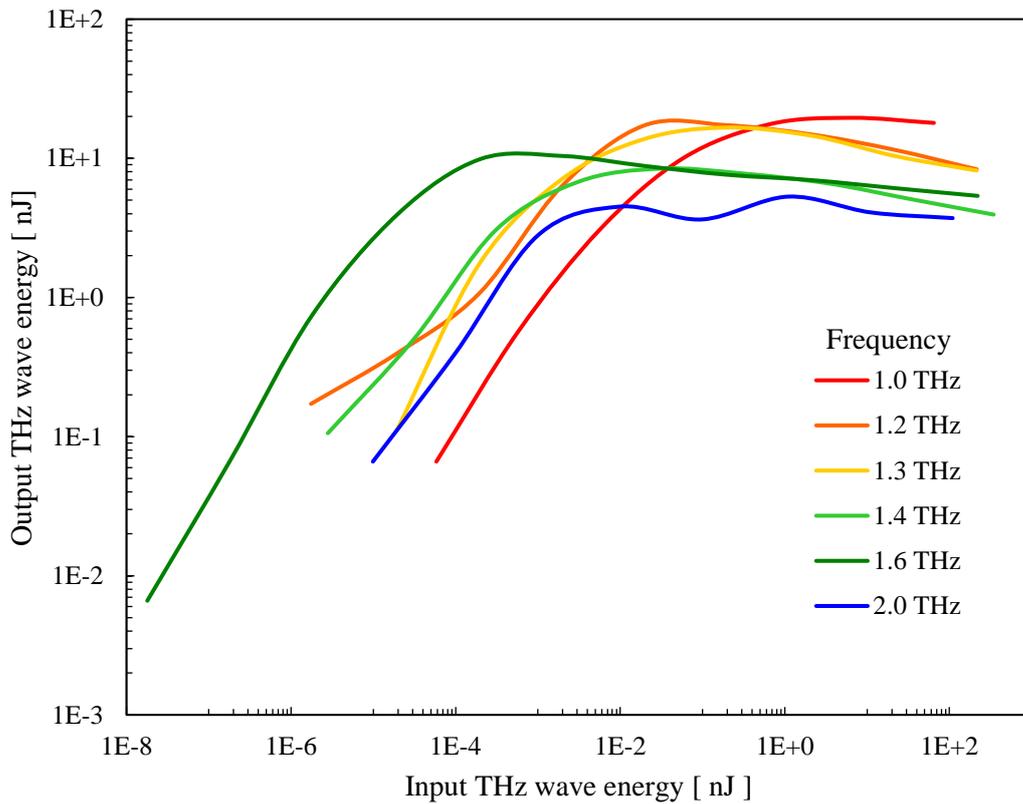


図 6.4 (a) 従来型増幅器の入出力特性の周波数依存性

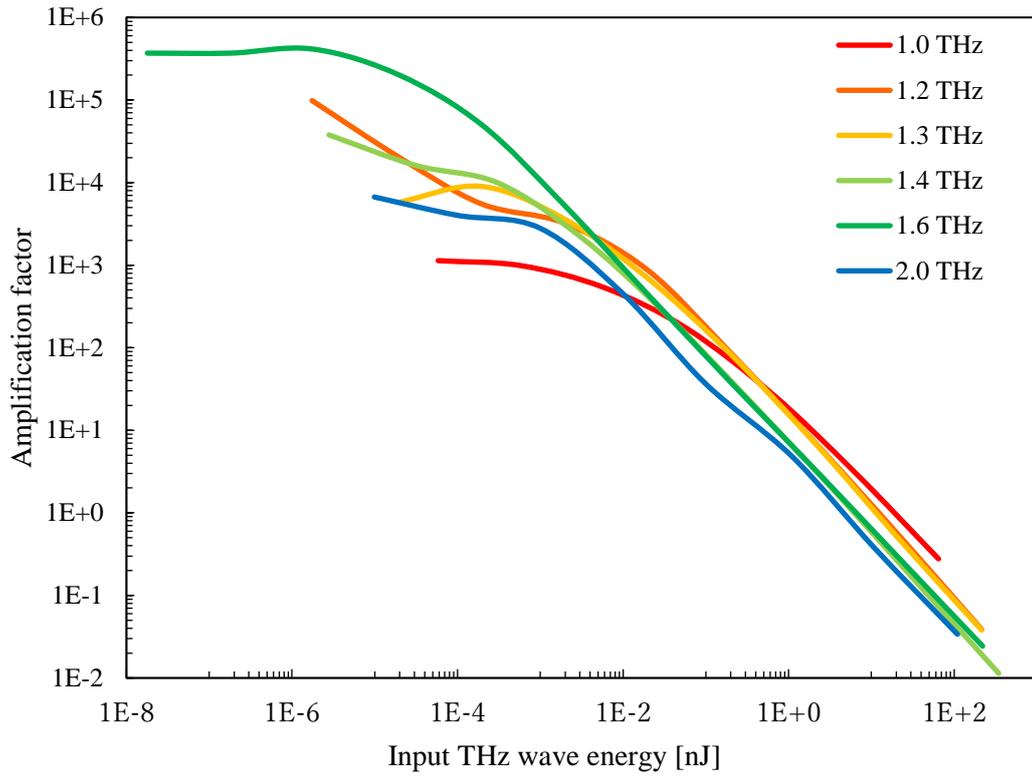


図 6.4 (b) 従来型増幅器の増幅度の周波数依存性

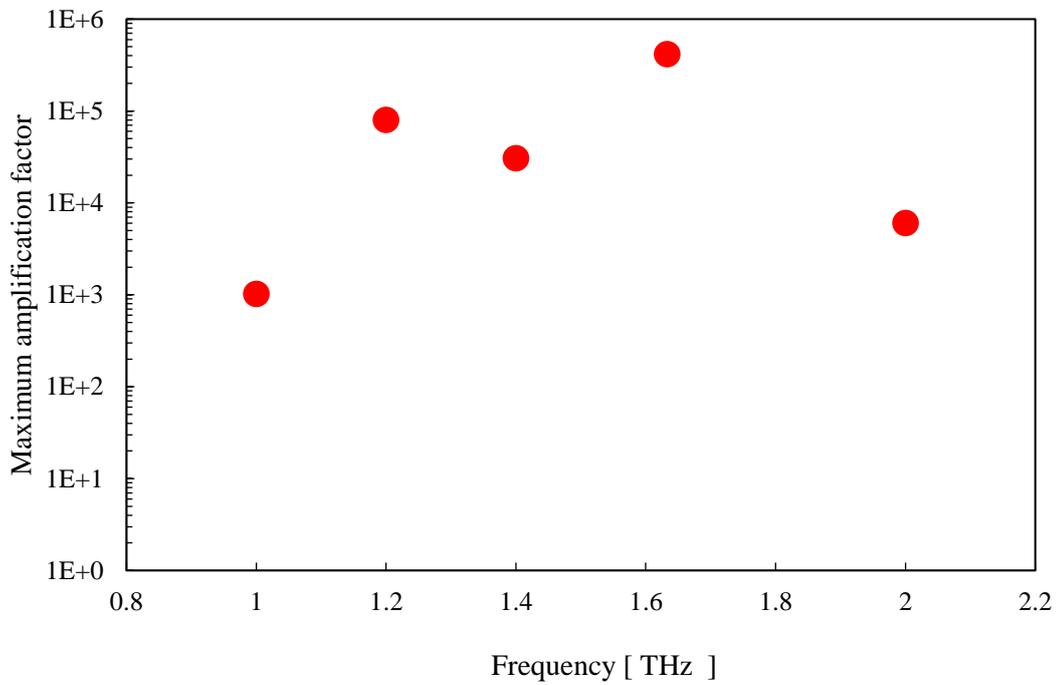


図 6.4 (c) 従来型増幅器の最大増幅度の周波数依存性

これらの傾向はパラメトリック利得が中心周波数に比べて他の周波数域で低下することが要因として考えられる。特に低周波域ではその影響は顕著で、1 THz において、最小入力は 600 fJ に留まり、最大増幅度は 1000 倍程度しか得られなかった。低周波の極微弱光の増幅を行うために、パラメトリック利得を向上させる必要がある。パラメトリック利得は以下の式 (2-15) で記載される。

$$g_T = \frac{\alpha_T}{2} \left[ \sqrt{1 + 16 \cos \phi \left( \frac{g_0}{\alpha_T} \right)^2} - 1 \right] \quad (2-15)$$

ここで、 $\phi$  は励起光と THz 波の間の位相整合角、 $g_0$  は低ロス限界でのパラメトリック利得、 $\alpha_T$  は THz 波帯の吸収係数で以下の式で表される。ただし、 $n_T$ 、 $n_i$ 、 $n_p$  はそれぞれ、THz 波、アイトラー光、励起光の屈折率、 $I_p$  は励起光強度を表わす。

$$g_0 = \sqrt{\frac{\pi \omega_p \omega_i I_p}{2c^3 n_T n_i n_p}} \chi_p \propto \sqrt{\omega_i \omega_T I_p} \quad (2-16)$$

$$\alpha_T = \frac{2\omega}{c} |\text{Im}(\sqrt{\epsilon_T})| \quad (2-17)$$

この式より、パラメトリック利得の向上には、励起光強度  $I_p$  を増加させればよいことがわかる。しかし、 $I_p$  の増加により利得が向上することは、入力に依存したテラヘルツ波だけでなく、入力に依存しない広帯域な TPG も生じやすくなる。特に利得の低い低周波域の極微弱光入力時にはその影響が顕著で、図 6.5 (b) に示すように、より利得の高い高周波域の広帯域な TPG 成分によるノイズが増大し、入力に対応したテラヘルツ波が観測できなくなってしまう。そこで本研究では、利得を向上させつつも、TPG 発生を抑制し、入力されたテラヘルツ波のみを増幅可能な、新たな増幅方式を考案した。

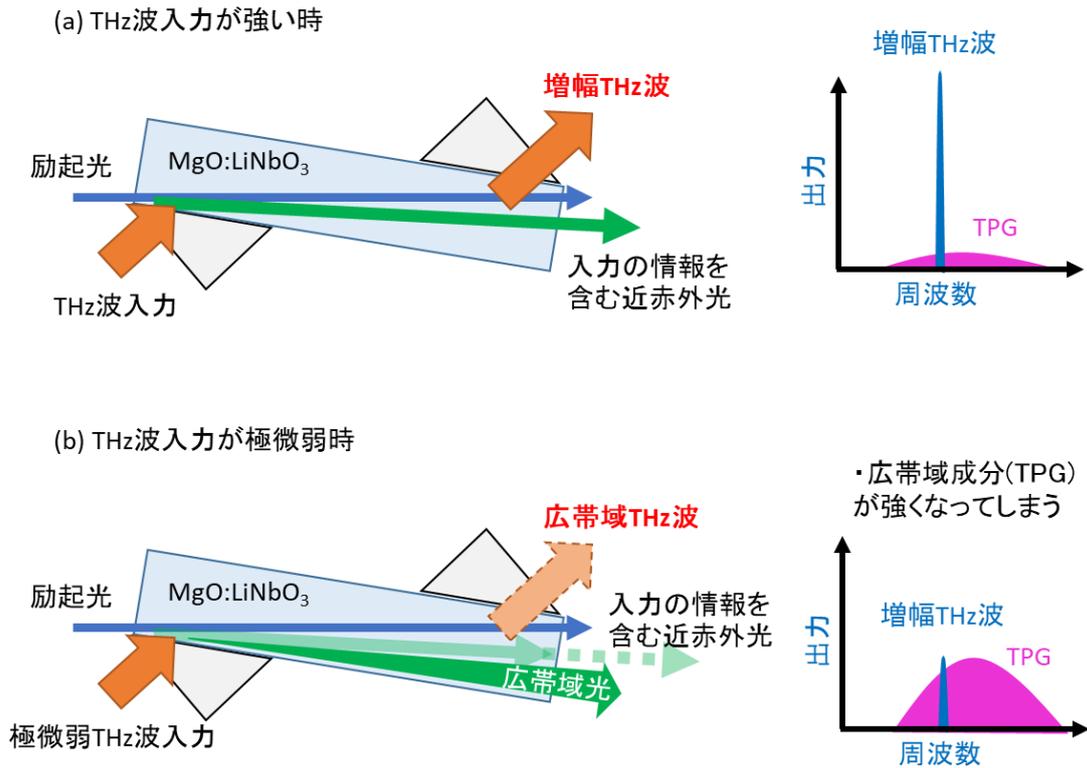


図 6.5 低周波の微弱テラヘルツ波入力時における問題 (a) テラヘルツ波入力  
力が十分にある場合 (b) テラヘルツ波入力が極微弱時

## 6.4 新型増幅器による高利得テラヘルツ波

### パラメトリック増幅

#### 6.4.1 新たな増幅手法の導入

図 6.6 (a) に示すように従来は入力と出力を同一の位置で行っていたが、本研究では図 6.6 (b) に示すようにプリアンプとメインアンプの2箇所に分割した。プリアンプでは入力されたテラヘルツ波を一旦近赤外光（アイドラー光と呼ぶ）に変換し、メインアンプでは変換されたアイドラー光から再度テラヘルツ波を発生し、増幅を行う。この時変換されたアイドラー光は角度位相整合条件のため、波長ごとに発生角が異なる。低周波に対応するアイドラー光は励起光に対して浅い角度で、高周波に対応するアイドラー光は励起光に対して大きな角度で出力される。そのため、広帯域アイドラー光と、入力テラヘルツ波に対応するアイドラー光成分を空間的に分離することが可能となる。そこ

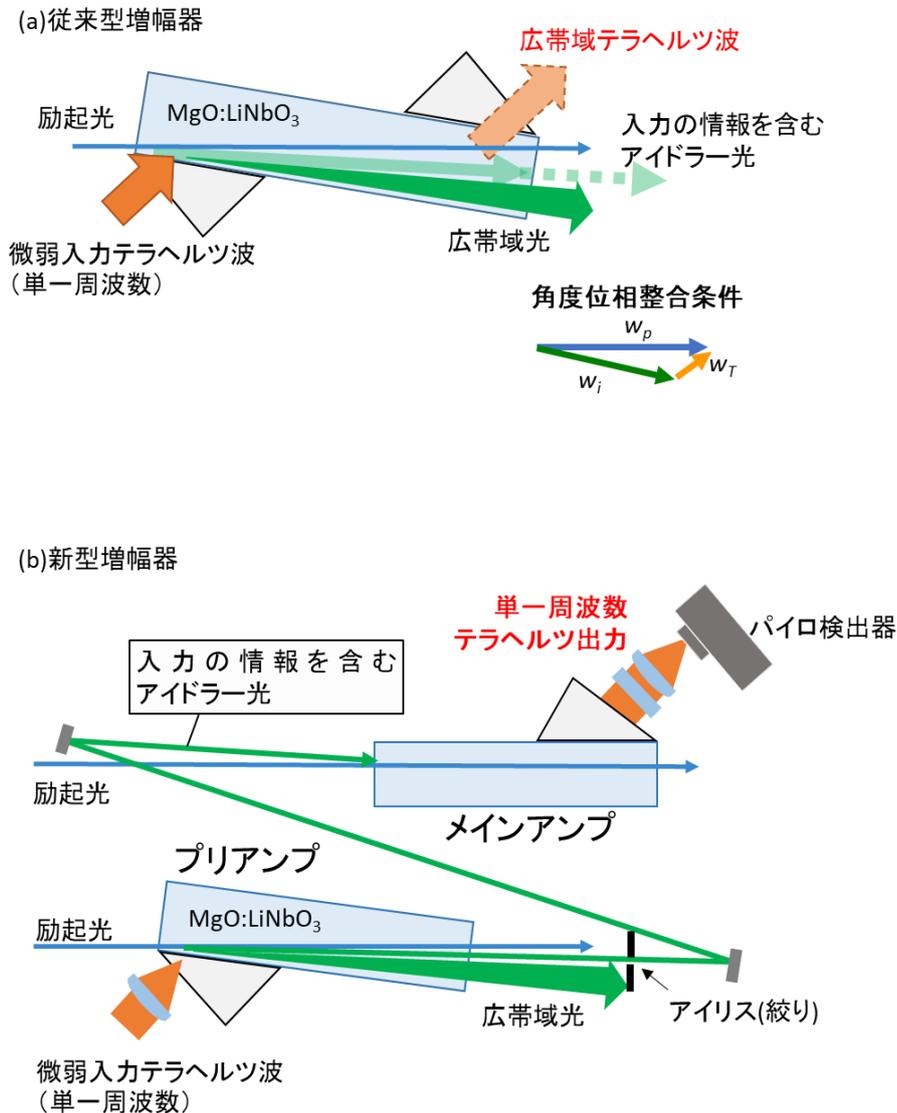


図 6.6 (a) 従来型増幅器：入力と出力を同一箇所で行っており、極微弱光増幅が困難であった (b) 新型増幅器：入力と出力を分け、テラヘルツ波を一旦近赤外光に波長変換し、その状態で広帯域光を除去することで極微弱光の増幅を実現

でアイドラー光の光路中にアイリスを挿入し、入力に対応した周波数成分のみを空間的に取り出した。その単一周波数のアイドラー光を、メインアンプの結晶に角度位相整合条件を満たすよう入力し、テラヘルツ波を発生させる。この発生したテラヘルツ波は入力テラヘルツ波の周波数を保持しており、かつ励起光とのパラメトリック相互作用により増幅される。

従来の図 6.6 (a) の実験系では入力と出力に同一の励起光を用いていたため、パラメトリック利得増大のために励起光強度を上げると、広帯域な TPG 発生にエネルギー

が流れていた。一方で図 6.6 (b) の本実験系では入力と出力の結晶それぞれに任意の励起光強度を設定可能である。ここでは、プリアンプでは励起光強度を抑え、TPG 発生を抑えつつ入力に対応した近赤外アイドラー光発生および増幅を行い、メインアンプでは励起光強度を高め、アイリスにより抜き出された単一周波数のアイドラー光と共に入力することで、パラメトリック利得を向上させつつ、ノイズの発生を抑えることに成功した。本実験系を用いることで、利得の低い低周波の極微弱入力でも高い増幅度を得ることが可能となった。

## 6.4.2 新型増幅器実験系

本増幅器を用いて、図 6.7 に示すように is-TPG を入力テラヘルツ波光源として、その出力の増幅を行った。励起光源としてマイクロチップ Nd : YAG レーザーを Nd : YAG 増幅器で増幅し、入力テラヘルツ波発生用 is-TPG および増幅部のプリアンプ用と、メインアンプ用の 2 つに分割した。その後入力テラヘルツ波発生用 is-TPG と増幅部のプリアンプ用励起光をさらに増幅し 21 mJ とし、それぞれに分割して用いた。この時分割比を  $\lambda/2$  波長板で任意に設定できるようにし、プリアンプに入射する励起光強度の最適化が行えるようにした。入力テラヘルツ波発生用 is-TPG では、励起光と共に外部共振器型半導体レーザーからの光を 400 mW に増幅した注入光 (1068.1 nm) を LiNbO<sub>3</sub> 結晶に入力することで、963 GHz のテラヘルツ波を発生した。発生したテラヘルツ波を、レンズで取り回し、増幅部のプリアンプに Si プリズムカップラーを介して入力した。この時テラヘルツ波入力を任意の値に設定できるように、テラヘルツ波光路中にテラヘルツ波用減衰器を設置した。増幅部のプリアンプでは 2 つの結晶を直列に並べて用い、一つ目の結晶 (結晶長 50 mm) で近赤外アイドラー光を発生し、二つ目の結晶 (60 mm) でその近赤外アイドラー光を増幅した。プリアンプから出力されたアイドラー光は、入力の 963 GHz に対応した 1068.1 nm と、1.5~2.3 THz 付近の広帯域な TPG の雑音成分に対応した 1070 nm~1072 nm が含まれる。これら二種類のアイドラー光は角度位相整合条件により発生角が異なるため、空間的に分離可能である[28]。そこで、アイドラー光の光路中に直径 1 mm のアイリスを挿入し、空間的に 1068.1 nm のみを抜き出した。その単一周波数のアイドラー光を、10.1 mJ の励起光と共に角度位相整合条件を満たすようメインアンプに入力し、再度テラヘルツ波に波長変換を行い、増幅テラヘルツ波を取り出した。増幅テラヘルツ波の検出には DTGS を用いた焦電検出器を用い、オシロスコープで測定した。

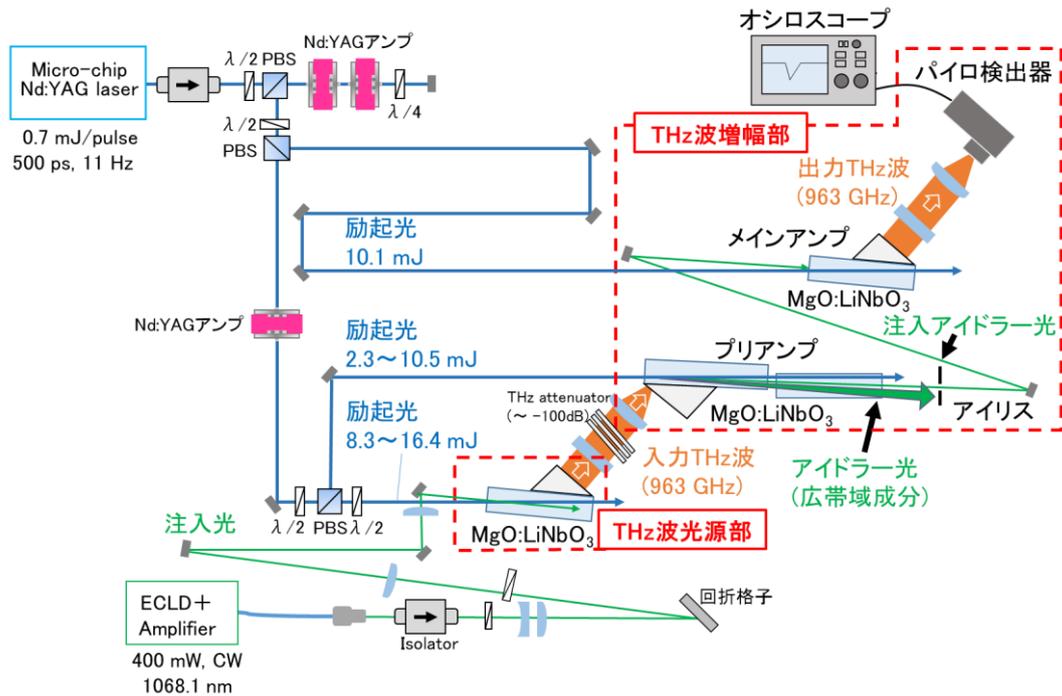


図 6.7 新型テラヘルツ波増幅器の実験系。is-TPG からのテラヘルツ波を入力光として用いた。

### 6.4.3 新型増幅器を用いた増幅結果

本増幅器の入出力特性を図 6.8 (a) に、増幅度を図 6.8 (b) に示す。プリアンプの入力励起光を 2.3~10.5 mJ まで変化させた場合の入出力特性および増幅度を示した。テラヘルツ波入力にはテラヘルツ波減衰器を用いて変化させ、その各入力におけるテラヘルツ波出力を測定した。入力が強いときは増幅出力が飽和するため、入力の減少に伴って増幅度は上昇する。一定の入力以下では増幅出力は入力に応じて変化するため、増幅度に変換するとほぼ一定の値が得られた。また励起光強度が上がるにつれ出力および増幅度が増大するが、強くなりすぎると逆に出力や増幅度が低下した。これは、以前の増幅器の問題で説明したように、励起光強度が増大するにつれ、パラメトリック利得が増大し出力が向上する一方で、利得が高くなりすぎると、入力に依存しない広帯域な TPG 発生にエネルギーが用いられてしまうためである。この場合、プリアンプでテラヘルツ波を一旦近赤外光へと波長変換しているが、ここで広帯域なアイドラー光が強く発生してしまった。よってプリアンプへの励起光は最適な値を選択する必要があり、4.26 mJ に設定して以降の測定を行った。

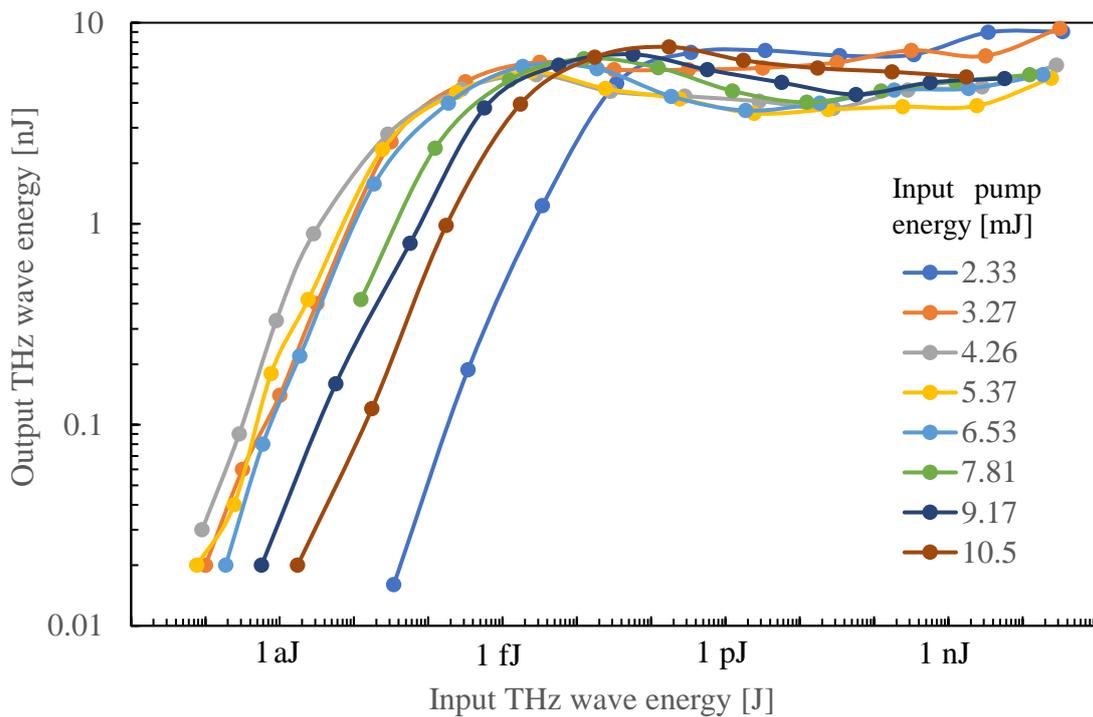


図 6.8 (a) 各励起光入力時の増幅器の入出力特性

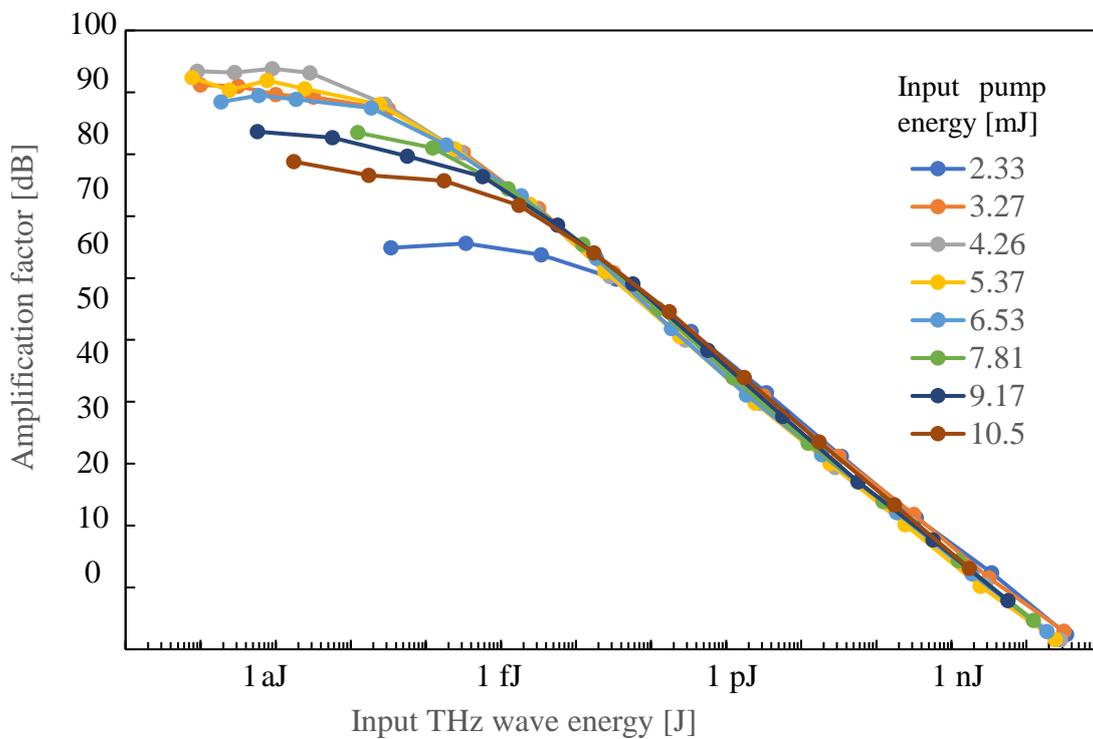


図 6.8 (b) 各励起光入力時の増幅器の増幅度

図 6.9 (a) には、プリアンプ励起光エネルギーを 4.26 mJ に設定した場合の 963 GHz における入出力特性と、以前の実験系を用いた場合の 1 THz における入出力特性、および 1.6 THz における入出力特性を記載する。赤点が新型増幅器による 963 GHz における増幅結果で、オレンジ点および青点は旧型増幅器によるそれぞれ 1.0 THz、1.6 THz における増幅結果である。1 THz での増幅度を比べると、旧型増幅器では最小で 58 fJ の入力まで増幅できたのに対し、新型増幅器では、さらに 6 桁も小さい、90 zJ ( $=9 \times 10^{-20}$  J) という極微弱入力に対しても増幅が確認でき、200 pJ の増幅後出力を得た。旧型増幅器による 1.6 THz の増幅結果と比べても、2 桁以上弱い入力に対して増幅が確認できた。次に入出力特性から増幅度を計算した結果を図 6.9 (b) に示す。旧型増幅器では 1 THz で最大増幅度が 30 dB であったのに対し、新型増幅器では最小入力の 90 zJ 時に最大増幅度 94 dB を達成しており、6 桁弱い入力に対して 6 桁以上高い増幅度を得た。さらに 1.6 THz 時と比べても、2.5 桁弱い入力に対して 4 桁高い増幅度が得られた。すなわち、テラヘルツ波を一旦近赤外光に変換し、近赤外光で空間的にノイズ成分を除去することにより、従来の問題であった広帯域 TPG ノイズを大幅に抑制することに成功し、同一周波数において従来比 60 dB もの増幅度の改善を実現した。

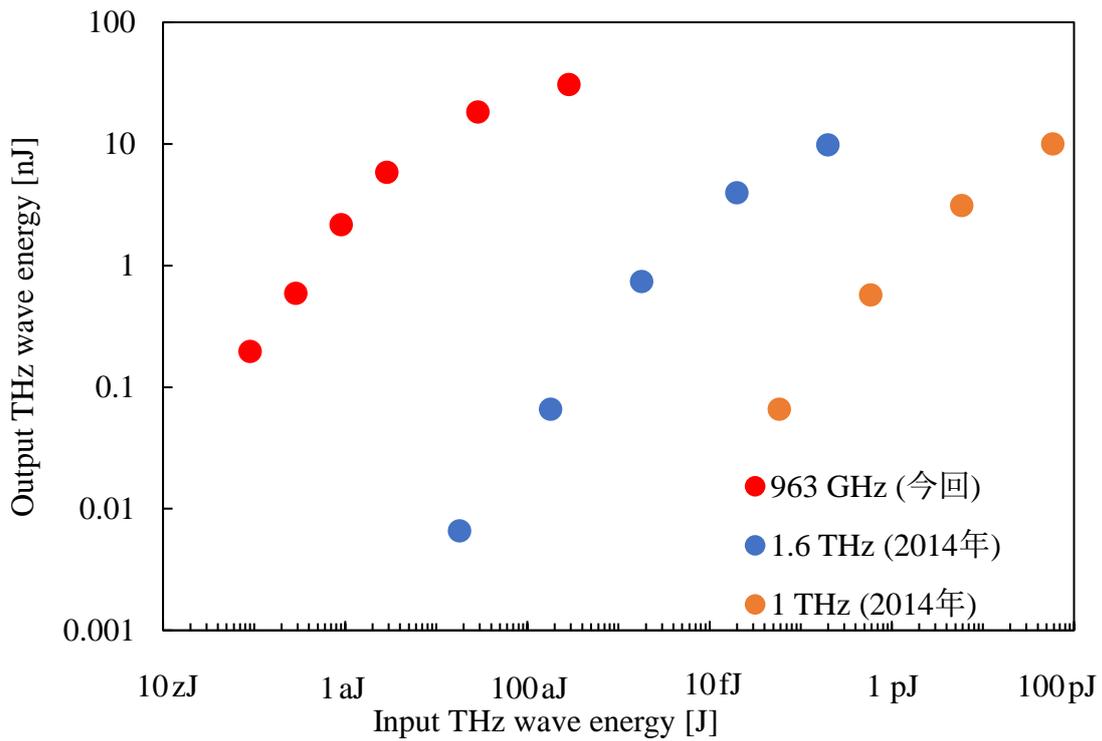


図 6.9 (a) 新型および旧型増幅器の入出力特性の比較

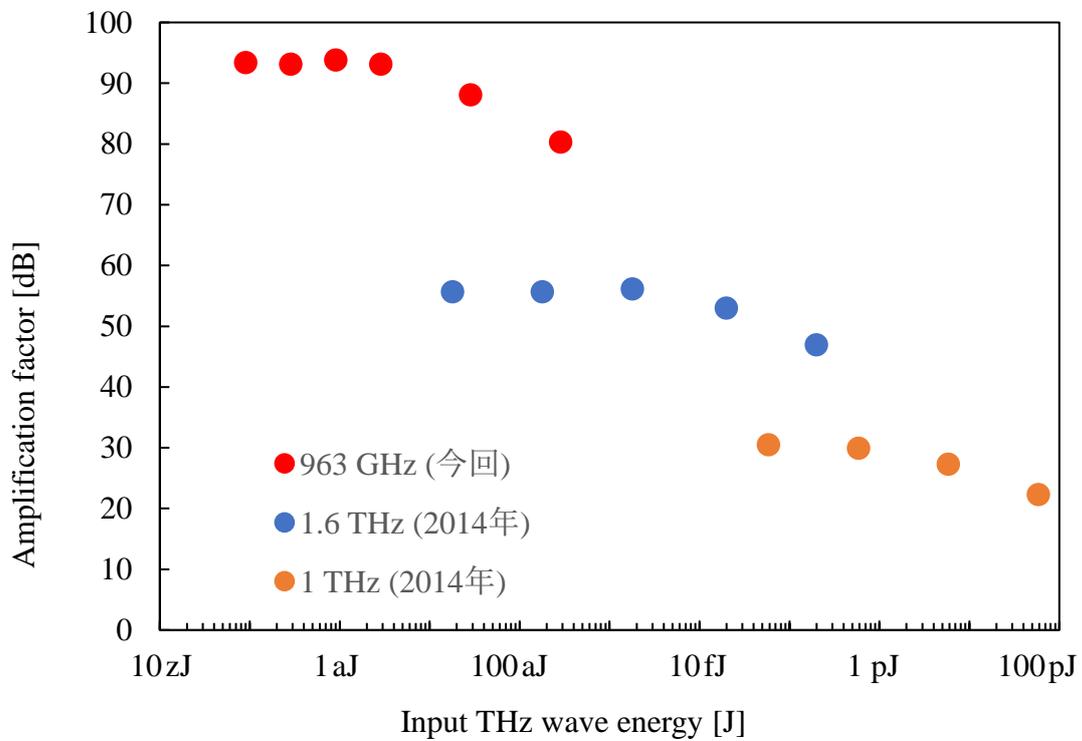


図 6.9 (b) 新型および旧型増幅器の増幅度の比較

#### 6.4.4 スキャンニング・ファブリペローエタロンによる

##### 増幅テラヘルツ波の波長測定

次に増幅されたテラヘルツ波の波長を確認するため、増幅されたテラヘルツ波光路中にメタルメッシュを用いたスキャンニング・ファブリペローエタロンを挿入した[25]。ここでスキャンニング・ファブリペローエタロンとは二枚の高反射ミラー間の距離を変化させ干渉波形を取得し、その波形から波長や線幅の測定を行う手法である。エタロン間隔が半波長の整数倍になった時に透過強度が強くなるため、干渉波形の山2つ分がテラヘルツ波の1波長に相当する。図 6.10 に示すような干渉波形が得られ、山2つ分の距離は  $311\ \mu\text{m}$  であり、周波数に変換すると  $963\ \text{GHz}$  と入力と同様の値が得られ、正しく増幅されていることが確認できた。

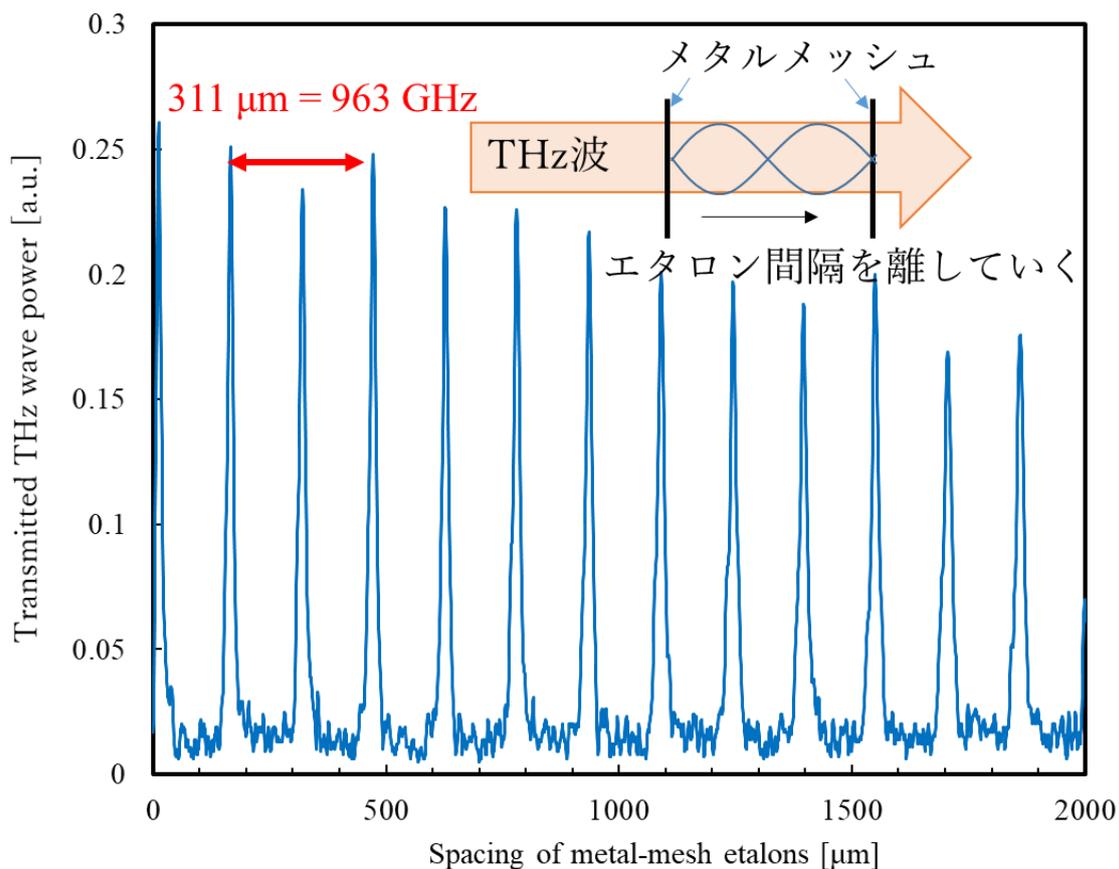


図 6.10 メタルメッシュエタロンによる増幅テラヘルツ波波長測定結果

## 6.5 連続波テラヘルツ波光源のパルス増幅

次に、図 6.11 に示すように入力を単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD) [68], [69] に変え、同様にパルス増幅を行った。UTC-PD は連続波テラヘルツ波光源であり、出力は  $1\ \mu\text{W}$  と前節で用いた is-TPG の尖頭値出力の  $1\ \text{kW}$  に比べると 9 桁ほど弱い。さらに周波数が高くなるにつれ出力が急に低下し、パラメトリック増幅の利得が高い  $1\ \text{THz}$  以上では  $1\ \mu\text{W}$  以下と弱くなるため、旧型増幅器では増幅できなかった。一方で、新型増幅器では、前述の is-TPG の結果のように、最小  $90\ \text{zJ} \approx 200\ \text{pW}$  (尖頭値) の増幅が実現しており、UTC-PD の増幅も可能と考えた。UTC-PD は連続波光源であり、通常エネルギーでの表示は出来ないが、増幅器の励起光パルス幅は  $500\ \text{ps}$  であるため、UTC-PD の連続波入力のうち  $500\ \text{ps}$  のみが寄与するとして  $1\ \mu\text{W} \times 500\ \text{ps} = 500\ \text{aJ}$  の式を用いて入力エネルギーを換算した。

UTC-PD の周波数  $963\ \text{GHz}$ 、出力  $1\ \mu\text{W}$  に設定し新型増幅器に入力した入出力特性および増幅度を図 6.12 に示す。UTC-PD 入力  $500\ \text{zJ}$  に対して  $87\ \text{nJ}$  のパルス増幅、および  $88\ \text{dB}$  の増幅度が得られた。is-TPG 入力時とほぼ同様の増幅度であり、新型増幅器が is-TPG 入力だけでなく異なる光源のパルス増幅器として機能することを示している。また、入力を  $30\ \text{dB}$  減衰した場合でも増幅が得られており、感度の低い常温動作の DTGS 焦電検出器でも検出できた。言い換えると UTC-PD を光源として  $30\ \text{dB}$  の常温動作の分光システムを実現できたともいえる。

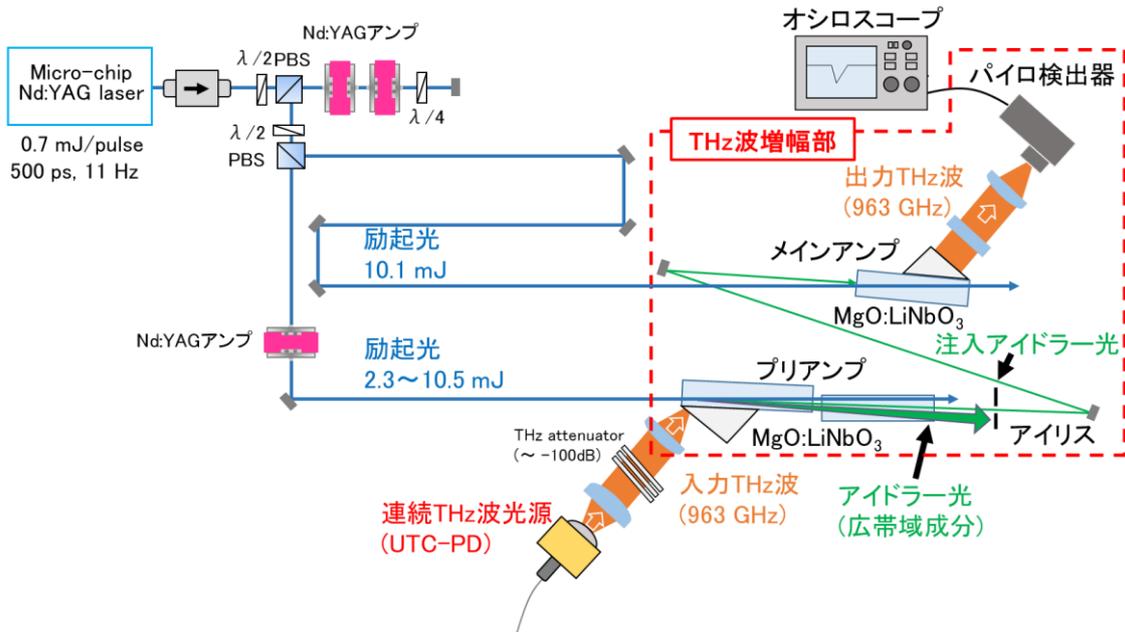


図 6.11 UTC-PD を入力光源とした増幅実験系

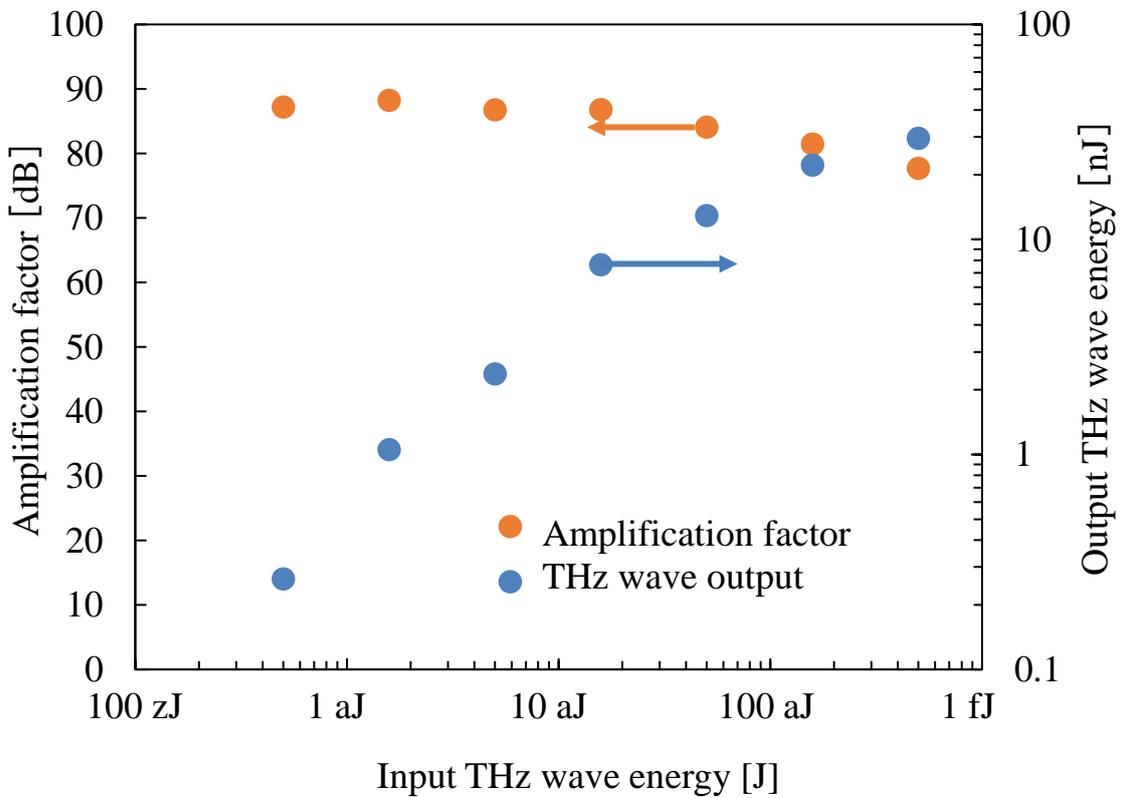


図 6.12 UTC-PD 入力時の増幅器入出力特性および

## 6.6 本章のまとめ

本結果をまとめる。従来のテラヘルツ波パラメトリック増幅器では微弱入力および低周波域の増幅を行うために励起光強度や結晶長の増大により利得を増大すると、広帯域 TPG ノイズが増大し、信号光の増幅が行えないという問題があった。そこで本研究では増幅器をプリアンプとメインアンプの2つに分離した。プリアンプでテラヘルツ波を一旦近赤外光に波長変換し、その状態で広帯域 TPG ノイズの空間的除去を行った。次いでメインアンプで再度テラヘルツ波に変換することにより、広帯域 TPG ノイズの発生を抑えつつ励起光強度を増大し、利得を向上することが可能となった。この新型増幅器により、従来では難しい 1 THz 以下かつ微弱な入力に対して 90 dB 以上の極めて高い増幅度が得られた。さらに、連続波テラヘルツ波光源である UTC-PD のパルス増幅にも成功した。異なるテラヘルツ波光源であっても、is-TPG 入力時と同様の高い増幅度が得られた。新型増幅器の原理は、テラヘルツ波の増幅に限らず、超高感度検出にも利用可能である。本稿では増幅されたテラヘルツ波を観測したが、増幅されたアイドラー光を近赤外検出器で測定すれば、テラヘルツ波の超高感度検出器として機能し、今後の応用研究への利用が期待される。

## 第7章 結論

本研究ではテラヘルツ波の産業応用を目指して、is-TPG を用いた分光システム開発およびパラメトリック増幅システム開発を主な目的として研究を行った。is-TPG は、現在広く用いられるテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) と比較して、多くの試薬類が指紋スペクトルを有する 1~2 THz で高いダイナミックレンジが得られること、および検出エリアの数  $\text{mm}^2$  と比較的広いことからテラヘルツ波の散乱等の影響を受け難く、テラヘルツ波に期待される封筒内違法薬物検査や処方薬検査応用等に最適であると考えた。

まず is-TPG を用いたテラヘルツ波分光システム開発を行った。検出結晶励起光として、従来は発生側結晶の透過光を再利用していたが、ノイズレベルが高くダイナミックレンジ 4 桁程度しか得られなかった。そこで、透過光の再利用をやめ、励起光を分離して検出結晶にも乱れのない励起光を入射したところ、ノイズレベルが低下し 7 桁以上もの高いダイナミックレンジを実現した。さらに、光源が開発されてからこれまで 15 年ほど改善されていない周波数帯域の拡大を行った。結晶を僅かに傾け、励起光をテラヘルツ波発生面で浅く全反射させることで、結晶のテラヘルツ波吸収を抑えることができ、従来の 0.6~3.0 THz から、0.6~5.0 THz と大幅な帯域拡大に成功した。この分光システムを用いることで、実際の測定物を模した厚さ 2 cm 以上の遮蔽物下でも 3 種類の糖類を識別することが出来た。

次にリアルタイム分光システム開発を行った。is-TPG は波長可変光源ゆえに 1 パルスで 1 波長しか出力できず、分光測定に時間を要していた。そこで本研究では、多波長テラヘルツ波発生を行うことで波長を変える必要を無くし、1 ショット分光を実現した。糖類をテラヘルツ波光路中に挿入した場合でも、その吸収スペクトルが瞬時に得られ、リアルタイムで試薬識別を行うことができた。

次にこのリアルタイム分光の高安定化を行った。テラヘルツ波が多波長化されると、単一波長発生時に比べて安定性が低下する。この不安定性の要因の特定できないため、本研究ではテラヘルツ波を 2 つに分割し、サンプル測定光とは別にレファレンス光も同時取得することにより安定性向上を図った。サンプル測定光とレファレンス光の間には相関がみられ、サンプル測定光をレファレンス光で規格化することで、3 波長発生時において安定性を 1% 以下まで抑制することに成功した。

最後に高利得テラヘルツ波パラメトリック増幅を行った。従来、テラヘルツ波の入力

と出力を同一の結晶で行っており、テラヘルツ波入力弱いときにノイズとなる広帯域 TPG 発生を抑えることが難しかった。一方本研究では、増幅用結晶としてプリアンプとメインアンプの2つを用意し、プリアンプで一旦近赤外光に波長変換しその状態で広帯域光ノイズを除去し、メインアンプで再度テラヘルツ波に変換し取り出すことで、ノイズの抑制と利得の大幅な向上に成功した。最小 90 zJ の入力に対して 90 dB 以上の極めて高い増幅度が得られた。また、入力として連続波光源である単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD) を用いた場合でも、90 dB に迫る高利得パルス増幅を実現した。

以上のように高ダイナミックレンジ分光システムの開発とそのリアルタイム化、さらにはテラヘルツ波増幅装置開発まで行った。これらシステムを用いることで、従来では測定が困難であった厚さ 2 cm 以上もの遮蔽物下の試薬測定も実現し、テラヘルツ波の産業応用可能性を示すことが出来た。さらに測定のリアルタイム化により、従来では困難であった製薬ラインを流れる試薬の全数検査等も可能となる。テラヘルツ波の増幅手法により、極めて弱いテラヘルツ波検出も可能となった。今後も引き続き研究を進め、テラヘルツ波産業の発展につなげたい。

## 参考資料

- [1] 伊藤弘昌, 南出泰重, “高速広帯域周波数制御テラヘルツ波光源とその応用(ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システム)”, *電子情報通信学会技術研究報告 ED 電子デバイス*, vol. 105, no. 630, pp. 7–12 (2006).
- [2] M. Tonouchi, “Cutting-edge terahertz technology”, *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 2, pp. 97–105 (2007).
- [3] T. Kampfrath, K. Tanaka, and K. A. Nelson, “Resonant and nonresonant control over matter and light by intense terahertz transients”, *Nat. Photonics*, vol. 7, no. 9, p. 680 (2013).
- [4] E. Linfield, “Terahertz applications: A source of fresh hope”, *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 5, pp. 257–258 (2007).
- [5] K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, “Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints”, *Opt. Express*, vol. 11, no. 20, pp. 2549–2554 (2003).
- [6] P. C. Ashworth, E. Pickwell-MacPherson, E. Provenzano, S. E. Pinder, A. D. Purushotham, M. Pepper, and V. P. Wallace, “Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer”, *Opt. Express*, vol. 17, no. 15, p. 12444 (2009).
- [7] S. Nakajima, H. Hoshina, M. Yamashita, C. Otani, and N. Miyoshi, “Terahertz imaging diagnostics of cancer tissues with a chemometrics technique”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 4, p. 041102 (2007).
- [8] M. Kato, S. R. Tripathi, K. Murate, K. Imayama, and K. Kawase, “Non-destructive drug inspection in covering materials using a terahertz spectral imaging system with injection-seeded terahertz parametric generation and detection”, *Opt. Express*, vol. 24, no. 6, p. 6425 (2016).
- [9] M. Sherwin, “Applied physics: Terahertz power”, *Nature*, vol. 420, no. 6912, pp. 131–133 (2002).
- [10] J. M. Chamberlain, “Where optics meets electronics: recent progress in decreasing the terahertz gap”, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 362, no. 1815, pp. 199–213 (2004).
- [11] S. Suzuki, M. Asada, A. Teranishi, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, “Fundamental oscillation of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 24, p. 242102 (2010).
- [12] T. W. Crowe, B. Foley, S. Durant, K. Hui, Y. Duan, and J. L. Hesler, “VNA frequency extenders to 1.1 THz”, in *2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and*

*Terahertz Waves* (2011).

- [13] K. Vijayraghavan, Y. Jiang, M. Jang, A. Jiang, K. Choutagunta, A. Vizbaras, F. Demmerle, G. Boehm, M. C. Amann, and M. A. Belkin, “Broadly tunable terahertz generation in mid-infrared quantum cascade lasers”, *Nat. Commun.*, vol. 4, 2021 (2013).
- [14] G. Ramian, “The new UCSB free-electron lasers”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, vol. 318, no. 1, pp. 225–229 (1992).
- [15] J. Hebling, K.-L. Yeh, M. C. Hoffmann, B. Bartal, and K. A. Nelson, “Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities”, *JOSA B*, vol. 25, no. 7, pp. B6–B19 (2008).
- [16] S. R. Tripathi, K. Murate, H. Uchida, K. Takeya, and K. Kawase, “A Fiber-Laser Pumped, High-Power Terahertz Wave Source Based on Optical Rectification of Femtosecond Pulses in 4-Dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium Tosylate Crystal”, *Appl. Phys. Express*, vol. 6, no. 7, p. 072703 (2013).
- [17] J. Hebling, K.-L. Yeh, M. C. Hoffmann, B. Bartal, and K. A. Nelson, “Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities”, *JOSA B*, vol. 25, no. 7, pp. B6–B19 (2008).
- [18] H. Hirori, A. Doi, F. Blanchard, and K. Tanaka, “Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO<sub>3</sub>”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 9, p. 091106 (2011).
- [19] “Terahertz pulse generation from bulk GaAs by a tilted-pulse-front excitation at 1.8  $\mu\text{m}$ ”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 24, p. 241106 (2014).
- [20] D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter, and C. Fattinger, “Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors”, *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 7, no. 10, pp. 2006–2015 (1990).
- [21] D. M. Mittleman, S. Hunsche, L. Boivin, and M. C. Nuss, “T-ray tomography”, *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 12, pp. 904–906 (1997).
- [22] J. Takayanagi, H. Jinno, S. Ichino, K. Suizu, M. Yamashita, T. Ouchi, S. Kasai, H. Ohtake, H. Uchida, N. Nishizawa, and K. Kawase, “High-resolution time-of-flight terahertz tomography using a femtosecond fiber laser”, *Opt. Express*, vol. 17, no. 9, pp. 7533–7539 (2009).
- [23] K. Kawase, H. Hoshina, A. Iwasaki, Y. Sasaki, and T. Shibuya, “Mail screening applications of terahertz radiation”, *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 26, pp. s66–s68 (2010).
- [24] K. Kawase, M. Sato, T. Taniuchi, and H. Ito, “Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO<sub>3</sub> with monolithic grating coupler”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 18, p. 2483 (1996).
- [25] K. Kawase, J. Shikata, and H. Ito, “Terahertz wave parametric source”, *J. Phys. Appl.*

- Phys.*, vol. 35, no. 3, p. R1 (2002).
- [26] K. Kawase, H. Minamide, K. Imai, J. Shikata, and H. Ito, “Injection-seeded terahertz-wave parametric generator with wide tunability”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 2, p. 195 (2002).
- [27] S. Hayashi, “Injection-seeded THz wave parametric generator using microchip Nd: YAG laser”, in *IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2008. (LEOS 2008)*, pp. 790–791 (2008).
- [28] S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, K. Kawase, and H. Minamide, “Ultrabright continuously tunable terahertz-wave generation at room temperature”, *Sci. Rep.*, vol. 4, p. 5045 (2014).
- [29] J. M. Yarborough, S. S. Sussman, H. E. Puthoff, R. H. Pantell, and B. C. Johnson, “EFFICIENT, TUNABLE OPTICAL EMISSION FROM  $\text{LiNbO}_3$  WITHOUT A RESONATOR”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 15, no. 3, pp. 102–105 (1969).
- [30] B. C. Johnson, H. E. Puthoff, J. SooHoo, and S. S. Sussman, “POWER AND LINEWIDTH OF TUNABLE STIMULATED FAR-INFRARED EMISSION IN  $\text{LiNbO}_3$ ”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 18, no. 5, pp. 181–183 (1971).
- [31] 林伸一郎, 縄田耕二, 南出泰亜, 川瀬晃道, “パラメトリック波長変換による高出力・連続波長可変テラヘルツ光の発生と高感度検出”, *光アライアンス*, vol. 26, no. 1, pp. 28-32 (2015).
- [32] レーザー学会, “レーザーハンドブック.” オーム社 (2005).
- [33] A. Yariv, “Quantum electronics”, John Wiley and Sons, New York (1989).
- [34] 四方潤一, 川瀬晃道, 佐藤学, 谷内哲夫, 伊藤弘昌, “ $\text{LiNbO}_3$  を用いた光パラメトリック発振によるコヒーレント THz 波発生の基礎特性”, *電子情報通信学会論文誌 C- エレクトロニクス -光・波動*, vol. 81, no. 5, pp. 267–273 (1998).
- [35] J. Shikata, K. Kawase, M. Sato, T. Taniuchi, and H. Ito, “Characteristics of coherent terahertz wave generation from  $\text{LiNbO}_3$  optical parametric oscillator”, *Electron. Commun. Jpn. Part II Electron.*, vol. 82, no. 5, pp. 46–53 (1999).
- [36] Y. R. Shen, “The principles of nonlinear optics” John Wiley and Sons, New York pp. 169-172 (1977).
- [37] Y. R. Shen, “Nonlinear Infrared Generation”, Springer Science & Business Media, Berlin, pp. 7-12 (1984).
- [38] S. S. Sussman, “Tunable Light Scattering from Transverse Optical Modes in Lithium Niobate”, STANFORD UNIV CA MICROWAVE LAB, STANFORD UNIV CA MICROWAVE LAB, SU-MLR-1851 (1970).
- [39] C. H. Henry and C. G. B. Garrett, “Theory of Parametric Gain near a Lattice Resonance”, *Phys. Rev.*, vol. 171, no. 3, pp. 1058–1064, (1968).

- [40] K. Imai, K. Kawase, H. Minamide, and H. Ito, “Achromatically injection-seeded terahertz-wave parametric generator”, *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 24, pp. 2173–2175 (2002).
- [41] G. P. Agrawal, “Nonlinear Fiber Optics”, Academic Press, Chapter 8 (1995).
- [42] V. G. Dmitriev, G. G. Gurzadyan, and D. N. Nikogosyan, “Handbook of Nonlinear Optical Crystals 3rd rev. ed.”, Springer (1999).
- [43] V. Hinkov, M. Barth, and K. Dransfeld, “Acoustic properties of proton exchanged LiNbO<sub>3</sub> investigated by Brillouin scattering”, *Appl. Phys. A*, vol. 38, no. 4, pp. 269–273 (1985).
- [44] A. de Bernabé, C. Prieto, and A. de Andrés, “Effect of stoichiometry on the dynamic mechanical properties of LiNbO<sub>3</sub>”, *J. Appl. Phys.*, vol. 79, no. 1, pp. 143–148 (1996).
- [45] G. W. Faris, L. E. Jusinski, and A. P. Hickman, “High-resolution stimulated Brillouin gain spectroscopy in glasses and crystals”, *JOSA B*, vol. 10, no. 4, pp. 587–599 (1993).
- [46] K. Nawata, S. Hayashi, H. Ishizuki, K. Murate, K. Imayama, Y. Takida, V. Yahia, T. Taira, K. Kawase, and H. Minamide, “Effective Terahertz Wave Parametric Generation Depending on the Pump Pulse Width Using a LiNbO<sub>3</sub> Crystal”, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 7, no. 5, pp. 617 - 620 (2017).
- [47] Y. Shimony, Z. Burshtein, and Y. Kalisky, “Cr<sup>4+</sup>:YAG as passive Q-switch and Brewster plate in a pulsed Nd:YAG laser”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, no. 10, pp. 1738–1741 (1995).
- [48] S. Hayashi, K. Nawata, H. Sakai, T. Taira, H. Minamide, and K. Kawase, “High-power, single-longitudinal-mode terahertz-wave generation pumped by a microchip Nd: YAG laser [Invited]”, *Opt. Express*, vol. 20, no. 3, pp. 2881–2886 (2012).
- [49] R. Guo, S. Ohno, H. Minamide, T. Ikari, and H. Ito, “Highly sensitive coherent detection of terahertz waves at room temperature using a parametric process”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, no. 2, p. 021106 (2008).
- [50] H. Minamide, S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, and K. Kawase, “Kilowatt-peak Terahertz-wave Generation and Sub-femtojoule Terahertz-wave Pulse Detection Based on Nonlinear Optical Wavelength-conversion at Room Temperature”, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, vol. 35, no. 1, pp. 25–37 (2014).
- [51] K. Kawase, M. Sato, K. Nakamura, T. Taniuchi, and H. Ito, “Unidirectional radiation of widely tunable THz wave using a prism coupler under noncollinear phase matching condition”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, no. 6, pp. 753–755 (1997).
- [52] K. Kawase, J. Shikata, H. Minamide, K. Imai, and H. Ito, “Arrayed silicon prism coupler for a terahertz-wave parametric oscillator”, *Appl. Opt.*, vol. 40, no. 9, pp. 1423–1426 (2001).
- [53] 拓範平等, “マイクロチップ固体レーザー”, *レーザー研究*, vol. 26, no. 12, pp. 847–854 (1998).

- [54] H. Sakai, H. Kan, and T. Taira, "> 1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched Nd<sup>3+</sup>:YAG microchip laser", *Opt. Express*, vol. 16, no. 24, pp. 19891–19899 (2008).
- [55] T. Taira, "Domain-controlled laser ceramics toward Giant Micro-photonics [Invited]", *Opt. Mater. Express*, vol. 1, no. 5, pp. 1040–1050 (2011).
- [56] H. Minamide, S. Hayashi, K. Nawata, T. Taira, J. Shikata, and K. Kawase, "Kilowatt-peak Terahertz-wave Generation and Sub-femtojoule Terahertz-wave Pulse Detection Based on Nonlinear Optical Wavelength-conversion at Room Temperature", *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, vol. 35, no. 1, pp. 25–37 (2014).
- [57] E. D. Palik, "Handbook of Optical Constants of Solids", Academic Press, p.568 (1998).
- [58] L. Pálfalvi, J. Hebling, J. Kuhl, Á. Péter, and K. Polgár, "Temperature dependence of the absorption and refraction of Mg-doped congruent and stoichiometric LiNbO<sub>3</sub> in the THz range", *J. Appl. Phys.*, vol. 97, no. 12, p. 123505 (2005).
- [59] K. Muro, T. Endo, A. Terayama, Y. Wakabayashi, K. Kitahara, Y. Shimada, and D. Fukuoka., "ASE-Free Continuously Tunable Diode Laser with a Novel Configuration", in *Conference on Lasers and Electro-Optics 2012*, CTu3N.3 (2012).
- [60] H. M. Pickett, R. L. Poynter, E. A. Cohen, M. L. Delitsky, J. C. Peason, and H. S. P. Müller, "Submillimeter, millimeter, and microwave spectral line catalog", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 60, no. 5, p. 883 (1998).
- [61] S. Kawata, K. Sasaki, and S. Minami, "Component analysis of spatial and spectral patterns in multispectral images. I. Basis", *JOSA A*, vol. 4, no. 11, pp. 2101–2106 (1987).
- [62] RIKEN and NICT, "THz-database." [Online]. Available: <http://thzdb.org/>. (Accesed 2017/12/17)
- [63] S. Hayashi, K. Nawata, Y. Takida, Y. Tokizane, K. Kawase, and H. Minamide, "High-Brightness Continuously Tunable Narrowband Subterahertz Wave Generation", *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 6, no. 6, pp. 858–861 (2016).
- [64] K. Murate, S. Hayashi, K. Kawase, "Two-wavelength Generation from Injection-seeded Terahertz-wave Parametric Generator", Proceedings of The 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, M4E.2 (2016).
- [65] S. Diez, C. Schmidt, R. Ludwig, H. G. Weber, K. Obermann, S. Kindt, I. Koltchanov, and K. Petermann, "Four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers for frequency conversion and fast optical switching", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 3, no. 5, pp. 1131–1145 (1997).
- [66] S. R. Tripathi, Y. Taira, S. Hayashi, K. Nawata, K. Murate, H. Minamide, and K. Kawase, "Terahertz wave parametric amplifier", *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 6, pp. 1649–1652 (2014).
- [67] Y. Taira, S. R. Tripathi, K. Murate, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, and K. Kawase,

- “A Terahertz Wave Parametric Amplifier With a Gain of 55 dB”, *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 4, no. 6, pp. 753–755 (2014).
- [68] H. Ito, T. Furuta, S. Kodama, and T. Ishibashi, “InP/InGaAs uni-travelling-carrier photodiode with 310 GHz bandwidth”, *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 21, pp. 1809–1810 (2000).
- [69] 若月温, 村本好史, 石橋忠夫, “UTC-PD を用いたテラヘルツフォトミキサモジュールの開発 (特集 安心・安全のためのイメージング・センシング技術)”, *NTT 技術ジャーナル*, vol. 23, no. 12, pp. 29–33 (2011).

# 発表リスト

## 学術論文

1. S. R. Tripathi, K. Murate, H. Uchida, K. Takeya, and K. Kawase "A Fiber-Laser Pumped, High-Power Terahertz Wave Source Based on Optical Rectification of Femtosecond Pulses in 4-Dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium Tosylate Crystal", *Applied Physics Express*, vol. 6, 072703 (2013).
2. S. R. Tripathi, Y. Taira, S. Hayashi, K. Nawata, K. Murate, H. Minamide and K. Kawase "Terahertz wave parametric amplifier", *Optics Letters*, vol. 39, No. 6, pp. 1649-1652 (2014).
3. K. Murate, Y. Taira, S. R. Tripathi, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, K. Kawase, "A high dynamic range and spectrally flat terahertz spectrometer based on optical parametric processes in LiNbO<sub>3</sub>", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 4, No. 4, pp. 523-526 (2014).
4. Yusuke Taira, S. R. Tripathi, K. Murate, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide and K. Kawase, "A terahertz wave parametric amplifier with a gain of 55dB", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 4, No. 6, pp. 753-755 (2014).
5. S. R. Tripathi, K. Murate and K. Kawase, "High power terahertz wave generation via non-linear optical processes", *Asian Journal of Physics*, vol. 24, no. 3, pp. 363-368 (2015).
6. K. Murate, S. Hayashi, K. Kawase "Expansion of the tuning range of injection-seeded terahertz-wave parametric generator up to 5 THz", *Applied Physics Express*, vol. 9, No. 8, 082401 (2016).
7. S. R. Tripathi, Y. Sugiyama, K. Murate, K. Imayama and K. Kawase "Terahertz wave three-dimensional computed tomography based on injection-seeded terahertz wave parametric emitter and detector", *Optics Express*, vol. 24, Issue 6, pp. 6433-6440 (2016).
8. M. Kato, S. R. Tripathi, K. Murate, K. Imayama and K. Kawase "Non-destructive drug inspection in covering materials using a terahertz spectral imaging system with injection-seeded terahertz parametric generation and detection", *Optics Express*, vol. 24, Issue 6, pp. 6425-6432 (2016).
9. K. Murate, M. Kato, and K. Kawase, "THz Spectroscopic Imaging of Chemicals Using IS-TPG", *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, vol. 25, No. 03n04, 1640016 (2016).
10. K. Murate, S. Hayashi, K. Kawase, "Multiwavelength terahertz-wave parametric generator for one-pulse spectroscopy", *Applied Physics Express*, vol. 10, No. 3, 032401 (2017).
11. K. Nawata, S. Hayashi, H. Ishizuki, K. Murate, K. Imayama, Y. Takida, V. Yahia, T. Taira, K. Kawase, and H. Minamide., "Effective Terahertz Wave Parametric Generation Depending on the Pump Pulse Width Using a LiNbO<sub>3</sub> Crystal", *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 7, Issue 5, pp. 617-620 (2017).

## 国際会議

### 第一著者

1. K. Murate, Y. Taira, S. R. Tripathi, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, K. Kawase, "Improvement of dynamic range in THz wave measurement system", The 5th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2014(IW-FIRT 2014), P-8, Fukui, Japan (Mar. 5-7, 2014).
2. K. Murate, S. Hayashi, H. Minamide and K. Kawase, "Terahertz Wave Parametric Amplifier", International Workshop on Terahertz Technology (IWOTT 2014), Yamagata-Zao, Japan (Mar. 7-10, 2014).
3. K. Murate, Y. Taira, S. R. Tripathi, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, K. Kawase, "Development of high dynamic range THz wave measurement system using nonlinear optical wavelength conversion in Lithium Niobate crystal", 6th International Workshop on Terahertz Technology and Applications, No.15, Kaiserslautern, Germany (Mar. 11-12, 2014).
4. K. Murate, Y. Taira, S. R. Tripathi, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, Takunori Taira, K. Kawase, "High dynamic range THz wave spectroscopic system using microchip Nd:YAG laser", The 2nd Laser Ignition Conference 2014 (LIC'14), LICp-3, Yokohama, Japan (Apr. 22-24, 2014).
5. K. Murate, Y. Taira, S. R. Tripathi, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, K. Kawase, "Frequency tunable, high dynamic range THz spectrometer using parametric processes in Lithium Niobate crystal", Conference on Lasers and Electro-Optics 2014 (CLEO:2014), SF2F.6, San Jose, USA (Jun. 8-13, 2014).
6. K. Murate, S. R. Tripathi, Y. Taira, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, K. Kawase, "A Terahertz Wave Parametric Amplifier With 55dB Gain", The 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2014), R4/E-34.8, Arizona, USA (Sept. 14-19, 2014).
7. K. Murate, K. Imayama, S. Hayashi, K. Kawase, "Improvement of THz-wave parametric source with a broad tunable range", The 4th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'15), p14-15, Yokohama, Japan (Apr. 22-24, 2015).
8. K. Murate, K. Imayama, S. Hayashi, K. Kawase, "Development of widely tunable THz parametric source", Joint Symposium of The 3rd International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2015) and The 6th International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 6), P2-5, Okinawa Institute of Science and Technology, Okinawa, Japan (Jun. 30 – Jul. 4, 2015).
9. K. Murate, K. Imayama, S. Hayashi, K. Kawase, "Wider tunability of an injection-seeded THz parametric generator", Nonlinear Optics 2015 (NLO 2015), Tu1B.2, Kaua'i Marriott Resort on Kalapaki Beach, Hawaii, USA (Jul. 26-31, 2015).

10. K. Murate, K. Imayama, S. Hayashi, K. Kawase, "Tunability Enhancement Of Injection-seeded THz Parametric Generator", The 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2015), H2E-2, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China (Aug. 23 - 28 2015).
11. K. Murate, S. Hayashi, K. Kawase, "Two-wavelength Generation From Injection-seeded Terahertz-wave Parametric Generator", The 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), M4E.2, Copenhagen, Denmark (Sept. 25-30, 2016).
12. K. Murate, K. Maeda, S. Hayashi, K. Kawase, "Simultaneous Generation and Detection of Multi-wavelength Terahertz Waves by Parametric Wavelength Conversion", The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'17), ALPS16-2, Yokohama, Japan (Apr. 18-21, 2017).
13. K. Murate, K. Maeda, K. Kawase, "High dynamic range spectroscopic system using terahertz parametric generator", Terahertz Science and Technology The Mansion Meeting, 8, Vanderbilt Grace Hotel, Newport, USA (May 22-25, 2017).
14. K. Murate, K. Maeda, S. Hayashi, K. Kawase, "Multiwavelength THz Wave Generation From THz Parametric Generator", Nonlinear Optics 2017 (NLO 2017), NW3A.4, Waikoloa, Hawaii, USA (Jul. 17-21, 2017).
15. K. Murate, K. Maeda, S. Hayashi, K. Kawase, "One Pulse Spectroscopic System Using Multiwavelength is-TPG", The 42st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017), WB2.1, Cancún, México (Aug. 27- Sept. 1, 2017).

#### 第一著者以外

16. S. R. Tripathi, K. Murate, H. Uchida, K. Takeya, K. Kawase, "High Average Power and Broadband THz Wave Generation Scheme Via Optical Rectification in 4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium-tosylate Crystal", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2013), WPC-17, Kyoto, Japan (Jun. 30 – Jul. 4, 2013).
17. S. R. Tripathi, Takashi Sugiyama, K. Murate, Kei Takeya, K. Kawase, "Broadband and high power THz wave generation using femtosecond fiber laser in 4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate crystal", The 2nd Advanced Lasers and Photon Sources conference (ALPS '13), ALPS4-4, pp. 53-54, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan (Apr. 23-25, 2013).
18. Y. Taira, K. Murate, S. R. Tripathi, S. Hayashi, K. Nawata, H. Minamide, K. Kawase, "Amplification of terahertz wave in Lithium Niobate Crystal", 6th International Workshop on Terahertz Technology and Applications, No.14, Kaiserslautern, Germany (Mar.11-12, 2014).
19. R. Yamazaki, K. Murate, K. Imayama, I. N. Smirnova, S. R. Tripathi, K. Kawase, "Transmission spectroscopy of chemicals concealed in shielding materials using injection-seeded terahertz wave parametric generator", International Symposium on Frontier of Terahertz Science, Session 2-15, Okinawa Institute of Science and Technology, Okinawa, Japan (Aug. 4-6, 2014).

20. R. Yamazaki, M. Kato, K. Murate, K. Imayama, K. Kawase, "Non-destructive Inspection Of Chemicals In Mail Envelopes Using An Injection-seeded Terahertz-wave Parametric Generator", The 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2015), H3C-4, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China (Aug. 23 – 28, 2015).
21. Y. Sugiyama, S. R. Tripathi, K. Murate., K. Imayama, K. Kawase, "Development of 3D tomographic system using terahertz wave parametric source", The Second International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT2015), Pos2.29st, Actcity, Hamamatsu, Shizuoka, Japan (Aug. 30 – Sept. 2).
22. K. Imayama, K. Murate, S. Hayashi, H. Minamide, K. Kawase, "Development of wide dynamic range terahertz-wave spectrometer based on optical parametric process in lithium niobate crystal", The International Chemical Congress Of Pacific Basin Societies 2015 (Pacifichem 2015), ANYL989, Hawaii Convention Center on Waikiki Beach, Hawaii, USA (Dec. 15-20, 2015).
23. M. Kato, R. Yamazaki, K. Murate, K. Imayama, S. R. Tripathi, K. Kawase, "Recognition of chemicals concealed under covering substances using terahertz spectroscopy based on injection-seeded terahertz parametric source", The International Chemical Congress Of Pacific Basin Societies 2015 (Pacifichem 2015), ANYL991, Hawaii Convention Center on Waikiki Beach, Hawaii, USA (Dec. 15-20, 2015).
24. S. Hayashi, K. Nawata, H. Ishizuki, K. Murate, K. Imayama, Y. Takida, Y. Tokizane, T. Taira, K. Kawase, H. Minamide, "Study on Parametric Gain of Nonlinear Wavelength Conversion in a LiNbO<sub>3</sub>", The 5th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'16), ALPSp14-33, Yokohama, Japan (Apr. 17-20, 2016).
25. M. Mohara, K. Shimura, K. Aiko, N. Shiramizu, K. Murate, K. Kawase, "Pharmaceutical Tablet Inspection With Injection-seeded Terahertz Parametric Generation Technique", The 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), M5P.04.08, Copenhagen, Denmark (Sept. 25-30, 2016).
26. M. Kato, K. Murate, K. Kawase, "THz Spectroscopic Imaging Of Concealed Chemicals Using Is-TPG", The 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), T5P.09.02, Copenhagen, Denmark (Sept. 25-30, 2016).
27. S. Yoneda, M. Kato, K. Murate, K. Kawase, "Nondestructive Inspection of Reagents under High Attenuated Cardboard Box Using is-TPG", 19th International Conference on Microwave and Terahertz Technology(ICMTT2017), Amari Watergate Bangkok, Thailand (Aug. 30 - 31, 2017).
28. Y. Guo, K. Murate, K. Maeda, K. Kawase, "High-gain pulse amplification of weak terahertz waves from a uni-traveling carrier photodiode", The 4th Microwave/THz Science and Applications, P-30, Okayama Convention Center, Okayama, Japan (Nov. 19 - 23, 2017).
29. S. Yoneda, K. Murate, K. Kawase, "Identification of Reagents Under High Attenuated Cardbord Box Using is-TPG spectroscopic imaging system", The 4th Microwave/THz Science and Applications, P-7, Okayama Convention Center, Okayama, Japan (Nov. 19 - 23, 2017).

## 招待講演

30. K. Murate, K. Imayama, S. Hayashi, K. Kawase, "High efficiency THz generation using MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal (invited)", Energy, Materials and Nanotechnology Meeting on Optoelectronics 2016, A16, Phuket, Thailand (Apr. 12-15, 2016).
31. K. Murate, R. Yamazaki, M. Kato, K. Kawase, "THz spectroscopic imaging of chemicals hidden in thick envelopes (Invited)", Energy, Materials and Nanotechnology Meeting on Terahertz 2016, C45, San Sebastian, Spain (May.14-18, 2016).
32. K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, H. Minamide, "Parametric generation and amplification of THz-waves (Invited)", 5th workshop on Terahertz Science and Technology, Elba island, Italy (Jul. 6-10, 2014).
33. K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, H. Minamide, "THz parametric amplifier using LiNbO<sub>3</sub> crystal (Invited)", OSA Optics and Photonics Congress on Advanced Photonics (SENSORS), SeTh4B.2, Crowne Plaza Barcelona Fira Center, Barcelona, Spain (Jul. 27-31, 2014).
34. K. Kawase, K. Murate, S. R. Tripathi, "Novel Techniques for THz-wave measurement (Invited)", Advances in Live Cell Thermal Imaging and Manipulation (ALSCTIM2014), OIST, Okinawa (Nov. 10-13, 2014).
35. K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, H. Minamide, "THz-wave parametric amplifier (Invited)", The Fifth International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano V), Martinique, France (Dec. 1-5, 2014).
36. K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, S.R. Tripathi, "Terahertz wave parametric amplifier(Invited)", Optical Terahertz Science & Technology Conference - San Diego, USA (Mar. 8 - 13, 2015).
37. K. Kawase, K. Murate, K. Imayama, S. Hayashi, "THz-wave parametric amplifier using LiNbO<sub>3</sub> crystal (Invited)", SPIE DSS Conference on Terahertz Physics Devices and Systems (ST104), Baltimore, USA (Apr. 20-25, 2015).
38. K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, " Nonlinear optical THz-wave generation using LiNbO<sub>3</sub> (Invited)", Joint Symposium of The 3rd International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2015) and The 6th International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 6), A2-8 Okinawa Institute of Science and Technology, Okinawa, Japan (Jun. 30 – Jul. 4, 2015).
39. K. Kawase, R. Yamazaki, K. Imayama, K. Murate, "Evolved Injection Seeded THz-wave Spectrometer For Mail Inspection (Keynote speech)", The 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2015), M2C-1, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China (Aug. 23 - 28 2015).
40. K. Kawase, K. Murate, M. Kato S. Hayashi, "Injection seeded THz spectrometer for mail inspection (Invited)", JSAP-OSA Joint Symposia 2015, 15a-2E-1, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan (Sept. 13-16, 2015).
41. K. Kawase, K. Murate, S.R. Tripathi, "THz parametric generation and applications(invited)", The 2015 Vacuum Electronics Meeting, T21, Las Vegas, USA (Nov. 21-24, 2015).

42. K. Kawase, K. Murate, M. Kato, R. Yamazaki, "Nonlinear optical THz-wave generation and applications (invited)", The EMN Hong Kong Meeting 2015 (Energy, Materials and Nanotechnology Meeting), C-01, Eaton Hotel, Hong Kong (Dec. 9-12, 2015).
43. K. Kawase, K. Murate, M. Kato, "Generation and detection of THz waves using nonlinear optical devices and applications to spectroscopic sensing and imaging (Invited)", Spain-Japan workshop on Millimeter-wave and Terahertz, Universidad Carlos III de Madrid, Puerta de Toledo Campus, Madrid, Spain (Mar. 17-18, 2016).
44. K. Kawase, M. Kato, R. Yamazaki, K. Murate, "THz spectroscopic imaging of chemicals through thicker obstacles (Invited)", SPIE DCS Conference Terahertz Physics, Devices, and Systems X, Paper No. 9856-2, Baltimore, USA (Apr. 17-21, 2016).
45. K. Kawase, K. Murate, S. Hayashi, "THz spectrometer using is-TPG (Invited)", 10th Asia-Pacific Laser Symposium (APLS 2016), Fri-R1-3, KAL Hotel, Jeju, Korea (May 10-14, 2016).
46. K. Kawase, M. Kato, K. Murate, "Non-destructive THz imaging of chemicals using is-TPG (Invited)", 5th EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST 2016), Hotel Palatinus, Pecs, Hungary (May 8-11, 2016).
47. K. Kawase, M. Kato, K. Murate, "THz spectroscopic imaging of chemicals using is-TPG (Invited)", 5th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE TeraTech-2016), We2-1, Sakura Hall, Tohoku University, Japan (Oct. 31-Nov. 4, 2016).
48. K. Kawase, K. Murate, K. Takeya, "Nonlinear optical THz generations and applications (Tutorial)", The seventh international conference on Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2017), P.20, University College London, London, UK (Apr. 2-7, 2017).
49. K. Kawase, K. Murate, "Injection-seeded THz parametric generator/amplifier (Invited)", CLEO Science & Innovations, SM1J5, San Jose Convention Center, San Jose, USA (May 14-19, 2017).
50. K. Kawase, K. Murate, "NDI using injection-seeded THz parametric generators (Invited)", Terahertz Science and Technology The Mansion Meeting, Vanderbilt Grace Hotel, Newport, USA (May 22-25, 2017).
51. K. Kawase, K. Murate, "Sensing of hidden drugs using is-TPG", OSA Advanced Photonics Congress, SeTh1E.2, Astor Crowne Plaza, New Orleans, United States (Jul. 24 - 27, 2017).
52. S. Yoneda, M. Kato, K. Murate, K. Kawase, "THz Spectroscopic Imaging of Reagents Hidden in a 56 dB Attenuated Cardboard Box Using is-TPG (Keynote speech)", The 42st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017), Cancún, México (Aug. 27-Sept. 1, 2017).
53. K. Kawase, K. Murate, "THz parametric source and its applications (Invited)", International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'17), ThB-III-5, Hanwha Resorts Haeundae Tivoli, Busan, Korea (Sept. 10-15, 2017).
54. K. Kawase, K. Murate, "THz spectroscopic imaging using optical parametric generator (Invited)", 7th Nano and Giga Forum (NGC/CTRP 2017), Tomsk State University, Tomsk, Russia (Sept. 18-22, 2017).

55. K. Kawase, K. Murate, "Injection-seeded THz parametric generator and its applications (Invited)", Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE 2017), Rensselaer Polytechnic Institute, Troy NY, USA (Oct. 1-5, 2017).

## 国内学会

### 第一著者

1. 村手宏輔, 杉山宗, トリパティ サロジ, 竹家啓, 川瀬晃道, "DAST 結晶を用いたフェムト秒レーザ励起による高出力テラヘルツ波発生", 2013 年 春季 第 60 回応用物理学会学術講演会, 28p-D1-12, 神奈川工科大学 (Mar.27-30, 2013).
2. 村手宏輔, 林伸一郎, 南出泰亜, 縄田耕二, 平祐介, 川瀬晃道, "LiNbO<sub>3</sub> 結晶を用いた THz 波検出器の最適化", テラヘルツ秋の学校 2013, P1, ペンションレインボーヒルズ, 蔵王 (Nov.21-22, 2013).
3. 村手宏輔, 林伸一郎, 南出泰亜, 縄田耕二, 平祐介, 川瀬晃道, "非線形光学結晶を用いた THz 波検出における励起光分離による高性能化", 応用物理学会 東海 SC 学術講演会 2013(JSAP SCTS 2013), P28, 名古屋大学 (Nov.16, 2013).
4. 村手宏輔, 林伸一郎, 南出泰亜, 縄田耕二, 平祐介, 川瀬晃道, "LiNbO<sub>3</sub> 結晶を用いた THz 波検出における励起光分離による高感度化", レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会, E321aVI02, 北九州国際会議場 (Jan.20-22, 2014).
5. 村手宏輔, 今山和樹, 平祐介, 林伸一郎, 縄田耕二, 南出泰亜, 川瀬晃道, "パラメトリック過程を用いたテラヘルツ波の高利得増幅", 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-E17-10, 青山学院大学相模原キャンパス (Mar. 17-20, 2014).
6. 村手宏輔, 平祐介, 林伸一郎, 縄田耕二, 南出泰亜, 川瀬晃道, "THz 波パラメトリック光源を用いた高ダイナミックレンジ分光器", 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 18p-E17-6, 青山学院大学相模原キャンパス (Mar. 17-20, 2014).
7. 村手宏輔, "高出力テラヘルツ波光源の開発とその応用", 日本学術会議主催「第 4 回先端フォトンクスシンポジウム」, 42, 日本学術会議講堂, 東京 (Aug. 8, 2014).
8. 村手宏輔, 今山和樹, 林伸一郎, 縄田耕二, 南出泰亜, 川瀬晃道, "高出力波長可変 THz 波光源の開発 とその応用", テラヘルツ秋の学校 2014, ヴィレッジ安曇野, 安曇野 (Nov.13-14, 2014).

9. 村手 宏輔, 今山 和樹, 林 伸一郎, 川瀬 晃道, "光注入型 THz 波パラメトリック光源の広帯域化", 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 12p-A14-1, 東海大学湘南キャンパス (Mar. 11-14, 2015).
10. 村手宏輔, 今山和樹, 林伸一郎, 川瀬晃道, "結晶傾斜による THz 波パラメトリック光源の広帯域化", 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 16a-2J-9, 名古屋国際会議場 (Sept. 13-16, 2015).
11. 村手宏輔, 今山和樹, 林伸一郎, 川瀬晃道, "テラヘルツパラメトリック発生器の周波数可変域の拡大 (依頼講演)", 応用物理学会・テラヘルツ電磁波技術研究会 第 1 回研究討論会 /テラヘルツテクノロジーフォーラム 第 1 回テラテク技術セミナー「テラヘルツ領域の計測・標準と産業応用可能性」, 徳島大学, 徳島 (Oct. 6-7, 2015).
12. 村手宏輔, 今山和樹, 林伸一郎, 川瀬晃道, "励起光の端面反射によるテラヘルツ波パラメトリック光源の帯域拡大", 二期第 3 回 (第 16 回)「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」研究会, 宮古島マリンターミナル, 宮古島 (Nov.6-7, 2015).
13. 村手宏輔, 今山和樹, 林伸一郎, 川瀬晃道, "光注入型 THz パラメトリック発生器の周波数可変上限の拡大", 電子情報通信学会電子デバイス研究会「ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システム」, 東北大学, 仙台(Dec. 21-22, 2015).
14. 村手 宏輔, 今山 和樹, 林 伸一郎, 川瀬 晃道, "広帯域波長可変光注入型 THz 波パラメトリック光源の開発", B109pII04, レーザー学会学術講演会 第 36 回年次大会, 名城大学 (Jan.9-11, 2016).
15. 村手 宏輔, 今山 和樹, 林 伸一郎, 川瀬 晃道, "光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生器の 2 波長発生", 20p-H135-10, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 東京 (March.19-22, 2016).
16. 村手 宏輔, 林 伸一郎, 川瀬 晃道, "2波長発振テラヘルツ波パラメトリック光源の開発", P-A1, 第 34 回レーザーセンシングシンポジウム, 野沢温泉スパリーナ, 長野 (Sept. 8-9, 2016).
17. 村手宏輔, 林伸一郎, 川瀬晃道, "テラヘルツ波パラメトリック光源の多波長発振における不安定性", 二期第 7 回 (第 20 回)「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」研究会, 官公労共済会八重山会館, 沖縄 (Nov. 21-22).

18. 村手宏輔, 林伸一郎, 川瀬晃道, “2 波長発振テラヘルツ波パラメトリック光源の開発”, レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, 徳島大学常三島キャンパス, 徳島 (Jan. 7-9, 2017).
19. 村手宏輔, 林伸一郎, 川瀬晃道, “多波長同時テラヘルツ波パラメトリック波長変換による 1 パルス分光システム”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15a-211-3, パシフィコ横浜, 神奈川 (Mar. 14-17, 2017).

## 第一著者以外

20. 白水信弘, 平祐介, 村手宏輔, 川瀬晃道, "医薬品検査に向けた高出力テラヘルツ分光方式による成分濃度評価の検討", 日本薬学会第 134 年会, 30amL-094, 熊本大学 (Mar. 27-30, 2014).
21. 加藤三樹矢, Irina Smirnova, 山崎良, 村手宏輔, 今山和樹, 川瀬晃道, “パラメトリック光源を用いたテラヘルツ分光イメージング”, テラヘルツ秋の学校 2014, ヴィレッジ安曇野, 安曇野 (Nov.13-14, 2014).
22. 杉山裕也, サロジ・トリパティ, 村手宏輔, 今山和樹, 川瀬晃道, "Is-TPG を用いたテラヘルツ波ヘテロダイン CT の構築", テラヘルツ秋の学校 2014, ヴィレッジ安曇野, 安曇野 (Nov.13-14, 2014).
23. 今山和樹, 村手宏輔, 林伸一郎, 縄田耕二, 南出泰亜, 川瀬晃道, “パラメトリック過程を用いた高ダイナミックレンジテラヘルツ波分光器の開発”, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 12p-A14-2, 東海大学湘南キャンパス (Mar. 11-14, 2015).
24. 山崎良, 加藤三樹矢, 村手宏輔, 今山和樹, 川瀬晃道, “光注入型 THz 波パラメトリック発生器を用いた遮蔽物内試薬の透過分光”, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13p-A14-8, 東海大学湘南キャンパス (Mar. 11-14, 2015).
25. 吉川尚孝, 村手宏輔, 白神慧一郎, 小川雄一, 川瀬晃道, 田中耕一郎, “光注入型パラメトリック発生器を用いた固体のテラヘルツ非線形分光”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京 (Mar. 21-24, 2015).
26. 山崎良, 加藤三樹也, 村手宏輔, 川瀬晃道, “is-TPG を用いた遮蔽物越しの試薬の分光 (依頼講演)”, 応用物理学会・テラヘルツ電磁波技術研究会 第 1 回研究討論会 / テラヘルツテクノロジーフォーラム 第 1 回テラテク技術セミナー「テラヘルツ領域の計測・標準と産業応用可能性」, 徳島大学, 徳島 (Oct. 6-7, 2015).

27. 今山 樹, 村手宏輔, 林伸一郎, 南出泰亜, 川瀬晃道, "光注入型 THz パラメトリック検出による高 DNR 分光システム", E511aV02, レーザー学会学術講演会 第 36 回年次大会, 名城大学 (Jan. 9-11, 2016).
28. 杉山裕也, トリパティサロジ, 村手宏輔, 今山和樹, 川瀬晃道, "光注入型パラメトリック発生及び検出を用いた 3D-CT システムの構築", E511aV03, レーザー学会学術講演会 第 36 回年次大会, 名城大学 (Jan. 9-11, 2016).
29. 加藤三樹矢, 村手宏輔, 今山和樹, トリパティサロジ, 川瀬晃道, "光注入型 THz 波パラメトリック発生/検知器を用いた遮蔽物越しの分光イメージング", E511aV04, レーザー学会学術講演会 第 36 回年次大会, 名城大学 (Jan. 9-11, 2016).
30. 加藤三樹矢, 村手宏輔, 今山和樹, トリパティサロジ, 川瀬晃道, "光注入型 THz 波パラメトリック発生 / 検出を用いた遮蔽物越しの分光イメージング", 22a-H135-5, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学 (Mar. 19-22, 2016).
31. 杉山裕也, トリパティサロジ, 村手宏輔, 今山和樹, 川瀬晃道, "is-TPG を用いた THz-CT によるプラスチック部品の計測", 22a-H135-4, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学 (Mar. 19-22, 2016).
32. 加藤三樹矢, 村手宏輔, 川瀬晃道, "is-TPG を用いた遮蔽物内試薬の分光イメージング", B-5, 第 34 回レーザセンシングシンポジウム, 野沢温泉スパリーナ (Sept. 8-9, 2016).
33. 杉山裕也, 日比教智, 村手宏輔, トリパティサロジ, 川瀬晃道, "is-TPG を用いた 3D-CT による樹脂製品の計測", P-B9, 第 34 回レーザセンシングシンポジウム, 野沢温泉スパリーナ (Sept. 8-9, 2016).
34. 北澤利幸, 村手宏輔, 川瀬晃道, "テラヘルツ分光によるタグの識別イメージング," シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端III」, 三国観光ホテル, 福井 (Nov. 23-25, 2016).
35. 小長谷圭志, 白神慧一郎, 吉川尚孝, 田中耕一郎, 村手宏輔, 川瀬晃道, 南出泰亜, 小川雄一, "トリプシン酵素活性に対する THz 波非熱的効果の検証," シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端III」, 三国観光ホテル, 福井 (Nov. 23-25, 2016).
36. 北澤利幸, 村手宏輔, 川瀬晃道, "テラヘルツ分光イメージングシステムを用いたタグの識別," レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, 徳島大学常三島キャンパス, 徳島 (Jan. 7-9, 2017).

37. 日比教智, 杉山裕也, トリパティサロジ, 村手宏輔, 川瀬晃道, "is-TPG を用いた 3D-CT によるプラスチック製品の観察", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15a-211-4, パシフィコ横浜, 神奈川 (Mar.14-17, 2017).
38. 米田真, 加藤三樹矢, 村手宏輔, 川瀬 晃道, "is-TPG を用いたテラヘルツ分光による医薬品識別", 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15a-211-5, パシフィコ横浜, 神奈川 (Mar. 14-17, 2017).
39. 前田一樹, 村手宏輔, 林伸一郎, 川瀬晃道, "極微弱テラヘルツ波の高利得パルス増幅", 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 8a-A405-3, 福岡国際会議場, 福岡 (Sept. 5-8, 2017).
40. 小木曾豊, 村手宏輔, 川瀬晃道, "テラヘルツ波パラメトリック検出における励起ビーム径 および結晶長依存性", 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 8a-A405-4, 福岡国際会議場, 福岡 (Sept. 5-8, 2017).

## 招待講演

41. 川瀬晃道, 村手宏輔, 林伸一郎, "非線形光学効果による高効率テラヘルツ波発生・増幅 (招待講演)," テラヘルツテクノロジーフォーラム技術セミナー, 大阪産業大学梅田サテライトキャンパス, 大阪 (Dec. 15, 2014).
42. 川瀬晃道, 村手宏輔, 岡野紘世, "新型テラヘルツシステムの性能評価 (招待講演)," テラヘルツ応用技術講演会, 名古屋市工業研究所 (Dec. 19, 2014).
43. 川瀬晃道, 村手宏輔, 林伸一郎, "非線形光学効果が拓くテラヘルツ新技術(招待講演)," 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, フォトニクス分科会発足記念シンポジウム「フォトニクスの夢」, 名古屋国際会議場 (Sept. 13-16, 2015).
44. 川瀬晃道, 加藤三樹矢, S.R. Tripathi, 村手宏輔, "テラヘルツ分光イメージングシステム (招待講演)," URSI-C 委員会 第 23 期(IEICE 第 3 期)第 3 回公開研究会, 日立中央研究所, 国分寺 (Oct. 19,2015).
45. 川瀬 晃道, 村手 宏輔, S.R.Tripathi, " is-TPG システムによる分光およびイメージング(招待講演)", S411pVIII01, レーザー学会学術講演会 第 36 回年次大会, 名城大学 (Jan. 9-11, 2016).
46. 川瀬晃道, 村手宏輔, 加藤三樹矢, 林伸一郎, "THz パラメトリック光源を用いた分光イメージング (招待講演)," 強光子場科学研究懇談会, 名古屋大学野依物質科学国際研究センター, 名古屋 (Jan. 28, 2016).

47. 川瀬晃道, 村手宏輔, "光注入型 THz パラメトリック発生／検出とその応用(招待講演)," 電気学会パワー光源産業技術調査専門委員会, 自動車会館, 東京 (Oct. 28, 2016).
48. 川瀬晃道, 村手宏輔, "光注入型 THz パラメトリック発生／検出とその応用(招待講演)," 光・エネルギー研究センターシンポジウム「光科学が生み出す新しい世界」, 山口大学常磐キャンパス (Dec. 14, 2016).
49. 川瀬晃道, 村手宏輔, "テラヘルツ波の非破壊検査応用(招待講演)," 電子情報通信学会関西支部専門講習会「高周波技術の応用展開と技術動向」, 中央電気倶楽部, 大阪 (Oct. 27, 2017).

## 著書・解説等

1. 村手宏輔, 林伸一郎, 縄田耕二, 南出泰亜, 川瀬晃道, “光注入型テラヘルツ波パラメトリック光源の開発とその応用”, フォトニクスニュース, 応用物理学会フォトニクス分科会, 第1巻, 2号, pp. 33-38 (2015).
2. 山崎良, 加藤三樹矢, 村手 宏輔, 今山和樹, 川瀬 晃道, “テラヘルツ波による分光イメージング”, 色材協会誌, 色材協会, Vol. 88, No.12, pp. 428-433 (2015).
3. 山崎良, 加藤三樹矢, 村手 宏輔, 今山和樹, 川瀬 晃道, “郵便物内の違法薬物の非破壊検査”, 精密工学会誌, 精密工学会, Vol. 82, No. 3, pp. 217-220 (2016).
4. K. Murate, M. Kato, K. Kawase, "THz Spectroscopic Imaging of Chemicals Using IS-TPG," Fundamental and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies, edited by M. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, pp. 51-58, ISBN 978-981-3223-27-1, World Scientific Publishing, Singapore (2017).
5. 村手宏輔, 加藤三樹矢, 川瀬晃道, “テラヘルツ波分光イメージングの応用可能性”, 日本赤外線学会誌, 日本赤外線学会, Vol. 27, pp. 23-28 (2017).

## 受賞歴

1. 村手宏輔, 優秀賞, 名古屋大学大学院修士論文中間発表会 (Dec. 2013)  
受賞論文題目 “光注入型テラヘルツ波パラメトリック発生・検出システムの開発”
2. K. Murate, Best Poster Award, Joint Symposium of The 3rd International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2015) and The 6th International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNano 6), Okinawa Institute of Science and Technology, Okinawa, Japan (Jun. 30 – Jul. 4, 2015)  
受賞題目 “Development of widely tunable THz parametric source”
3. 村手宏輔, 学生発表奨励賞, 電子情報通信学会電子デバイス研究会「ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システム」, 東北大学, 仙台(Dec. 21-22, 2015)  
受賞論文題目 “光注入型 THz パラメトリック発生器の周波数可変上限の拡大”
4. K. Murate, 2016 年 IEEE 名古屋支部国際会議研究発表賞, The 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2015), The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China (August 23 - 28 2015)  
受賞論文題目 “Tunability Enhancement Of Injection-seeded THz Parametric Generator”,
5. 村手宏輔, 名古屋大学学術奨励賞 (Jul. 6, 2016)  
受賞題目 “高ダイナミックレンジ テラヘルツ波分光システムの開発”
6. K. Murate, The Best Student Oral Paper Award, The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'17), ALPS16-2, Yokohama, Japan (Apr. 21, 2017)  
受賞論文題目 “Simultaneous Generation and Detection of Multi-wavelength Terahertz Waves by Parametric Wavelength Conversion”
7. K. Murate, Second Place of Outstanding Student Paper, The 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2017), Cancun, Mexico (Aug. 30, 2017)  
受賞論文題目 “One Pulse Spectroscopic System Using Multiwavelength Is-TPG”

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方々の御協力・御支援を頂きました。ここに心より感謝の意を表わしたいと思います。

本研究を進めるにあたって、この上なく最良な研究環境を与えて頂いただけでなく、数多くの御指導、御教示を賜りました名古屋大学大学院工学研究科 川瀬晃道教授に深甚なる感謝の意と敬意を表します。ご多忙の中、本論文を審査していただくと共に熱心な御討論・御助言を頂きました、名古屋大学大学院工学研究科 天野浩教授、佐藤健一教授、京都大学大学院理学研究科 田中耕一郎教授に心より感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、多くの御助言、励ましを賜りました名古屋大学大学院工学研究科 竹家啓講師、静岡大学大学院工学研究科 Saroj R. Tripathi 准教授に心から感謝致します。本研究を進めるにあたり、適切な御助言と御協力を賜りました情報通信研究機構 林伸一郎博士、理化学研究所テラヘルツ光源研究チーム チームリーダー 南出泰亜博士、同研究員 縄田耕二博士、瀧田佑馬博士、分子科学研究所 平等拓範准教授に心より御礼申し上げます。本研究に関連して共同研究を行い、的確な御助言、御議論を頂いた株式会社日立制作所 中央研究所 通信エレクトロニクス研究部 研究員 白水信弘氏、アークレイ株式会社 京都研究所 研究開発部第4チーム 志智直人氏、澁谷工業株式会社 開発部 佐々木基博士、土谷暁人博士に深く感謝致します。博士論文作成、印刷においてご協力を賜りました三重県工業研究所 新島聖治氏に深く感謝いたします。

半年間のカナダ、モントリオールでの研究インターンにおいて、御指導、多くの御助言を賜り、研究以外にも様々な点で大変お世話になりましたカナダ、ケベック大学、École de technologie supérieure、François Blanchard 教授、Xavier Ropagnol 博士、研究室の皆様に深く感謝いたします。

事務処理や、日々の生活の中で大変お世話になりました伊藤千佳子さんに心から感謝致します。同研究テーマとして、研究面から生活面まで様々な御助言をいただき、実験の基礎から御指導していただいた名古屋大学大学院、杉山宗氏、平祐介氏に深く感謝致します。同じ研究グループに所属し、実験に協力して頂いた同大学院の今山和樹氏、加藤三樹矢氏、杉山裕也氏、小木曾豊氏、日比教智氏、米田真氏、前田一樹氏、郭昶倬氏に心より感謝致します。研究室生活において川瀬研究室の皆様に心から感謝致します。

最後に、修士過程を終えるにあたり、常に励まして頂き、終始支えとなりました家族および友人に心より感謝申し上げます。