

2021年08月11日

「ジャイアント・マイクロフォトンクスによる高出力極限固体レーザ」
プロジェクトセミナー

QPM-PowerChipによるTHz波への 極限波長変換法の開発

竹家啓

◇ 「QPM-PowerChipによるTHz波への極限波長変換法の開発(項目⑬⑭⑮⑯)」

⑬ 高品位の非線形材料開発

LIDTにおいて非線形材料の品質を評価するための手法の考察を行う。

⑭ QPM特性の評価

MgLN/MgLTや水晶に造り込んだQPM特性を評価するための手法の考察を行う。

⑮ THz波への極限波長変換素子の開発

実施項目⑬及び⑭を通してTHz波への極限波長変換素子であるQPM-PowerChip構成の検討を行う。

⑯ 波長1.5mmの極限波長に出力10mJまでの変換

実施項目①～④を通して開発した非線形光学デバイスを用いて効率的に波長1.5mmの極限波長に出力10mJまでの変換、さらに、THz-DLA基礎研究に展開するための全体構成の考察を行う

⑰ THzレーザシステムのためのセラミックス材の評価

レーザセラミックス材の評価 ?

非線形材料(LN、水晶)の
作成と**評価@THz**

非線形材料を用いて
レーザ励起の**THz波発生**

実施項目

テラヘルツ領域の評価系作成

THz-TDSを用いた光学特性評価

+温度、圧力条件変化可のシステム

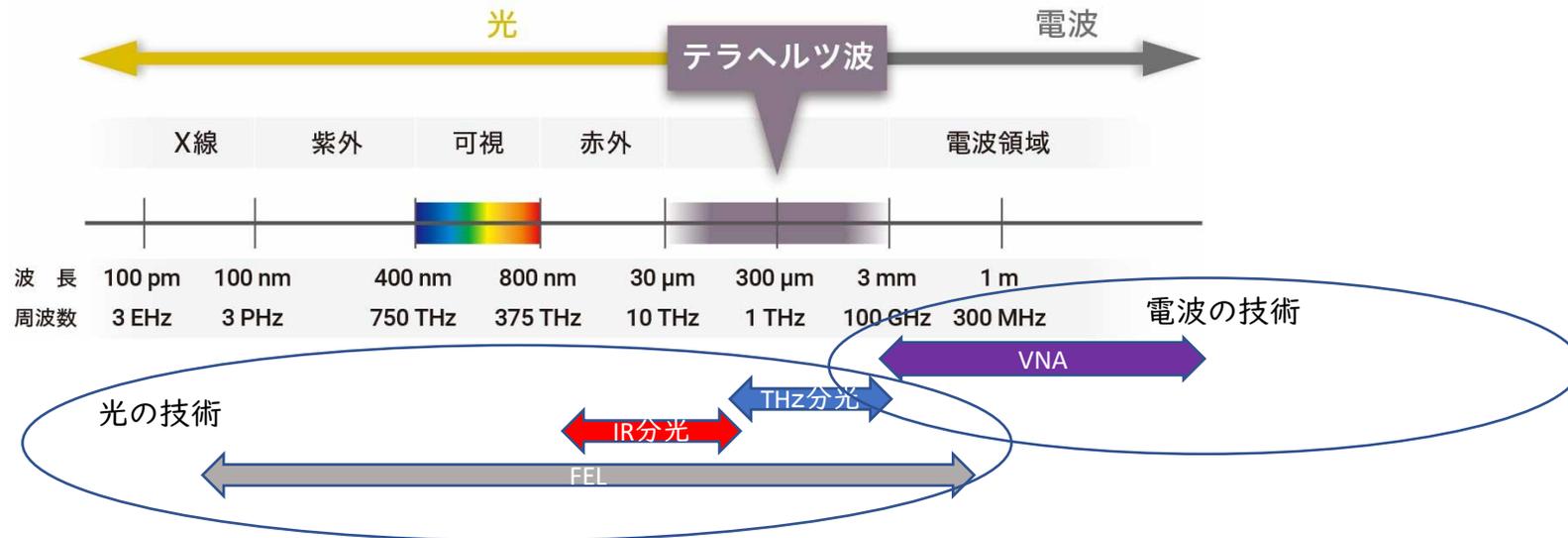
テラヘルツ分光の確からしさ向上に向けて+FTIR、TPG、UVSOR、他との比較(どこまでするか?)

テラヘルツ波波長変換

波長変換素子を開発して、1mJの出力を達成

合わせて、小型かつ常温動作可能なものを作成

テラヘルツ波周辺の評価システム



帯域ごとの測定システム

テラヘルツ用のデバイス設計のためのテラヘルツ特性を測定する。

そのために、テラヘルツ領域の評価系構築

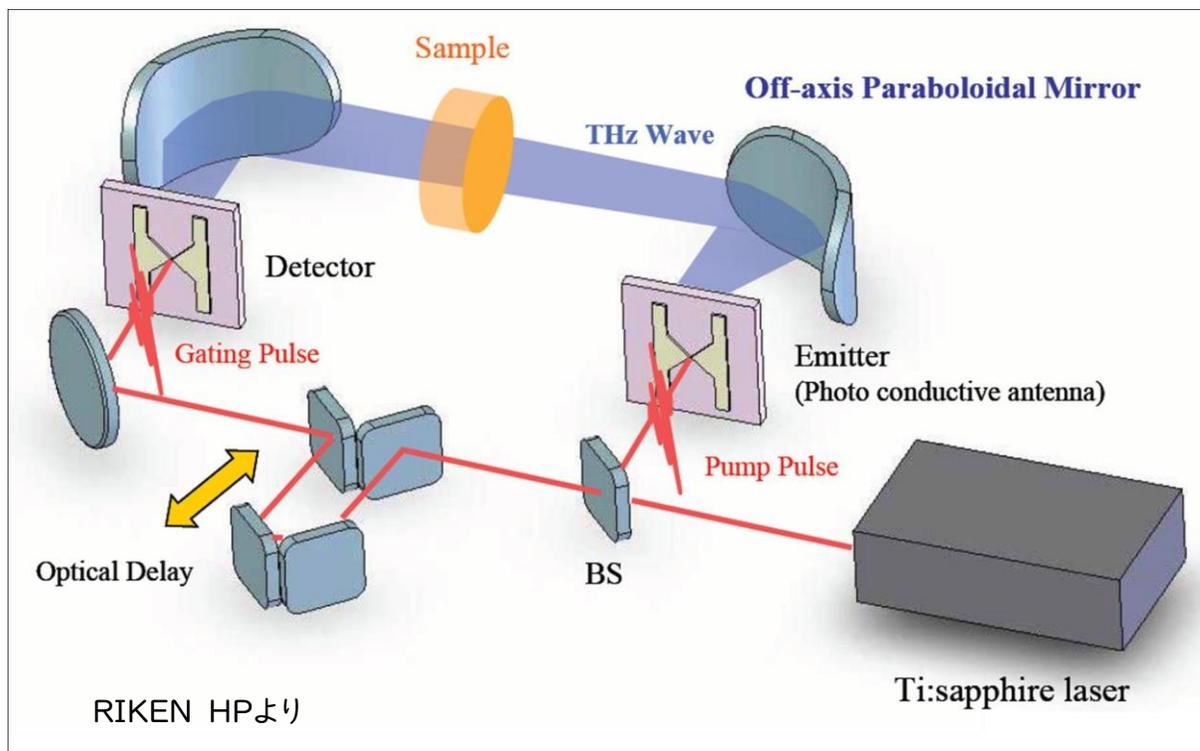
THz-TDSを用いた光学特性評価

+温度、圧力条件変化可のシステム

テラヘルツ分光の確からしさ向上に向けて

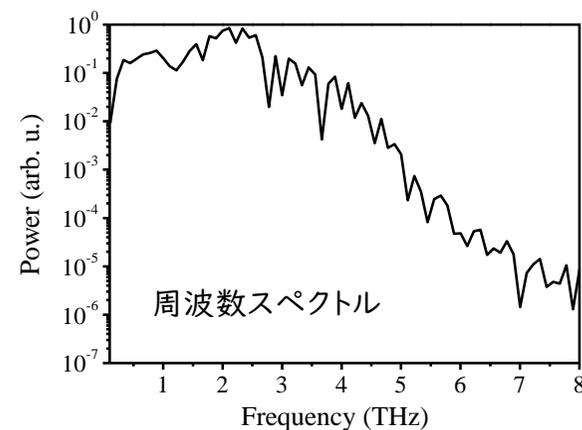
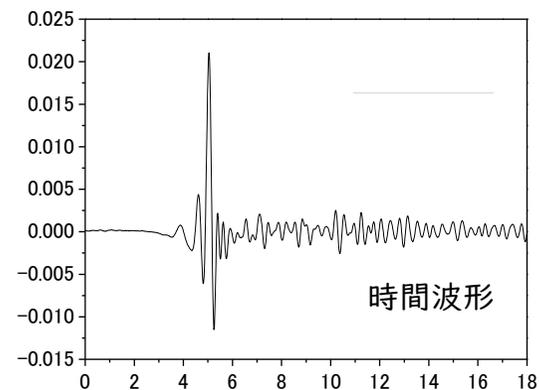
+FTIR、TPG、UVSOR、他測定方法との比較

テラヘルツ時間領域分光法

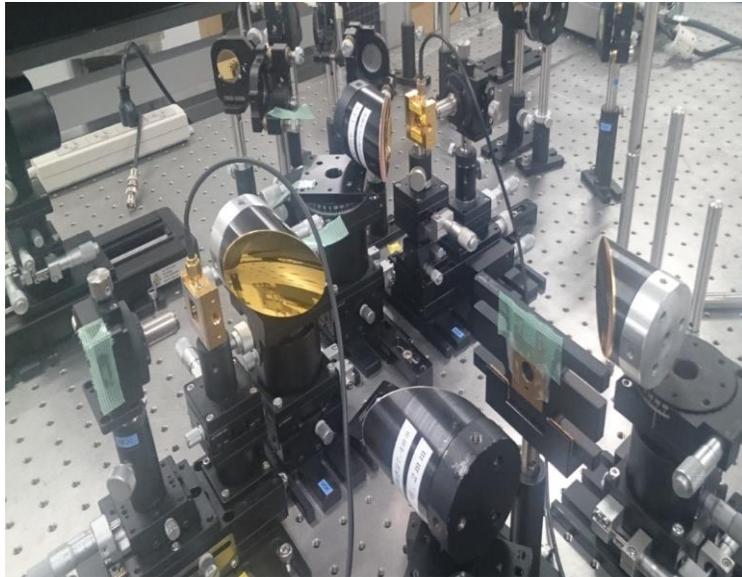


一般的なテラヘルツ時間領域分光システム

フェムト秒パルスをもつ2つに分け、1つは発生、もうひとつを検出に用いる。
片方の光路長をずらすことで、発生したパルスの形状を観測する。

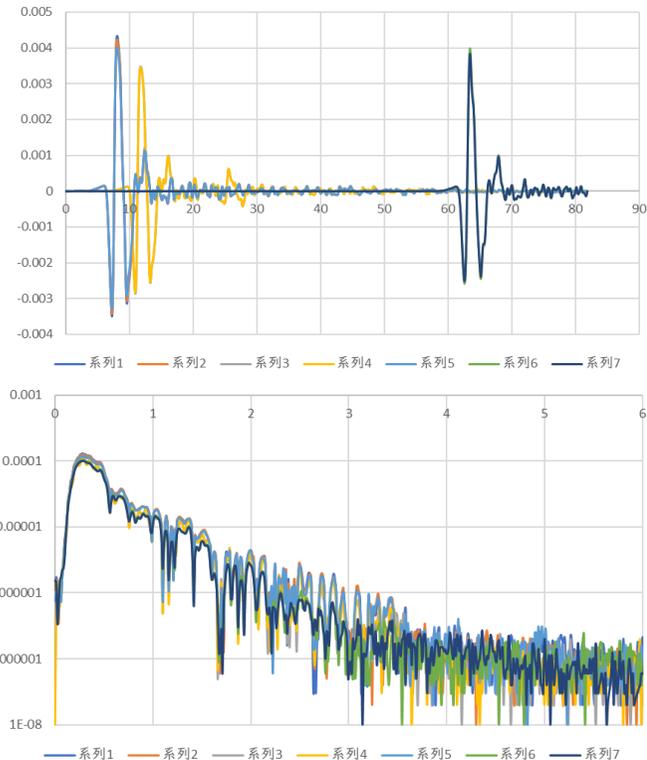


TDS測定系の構築



THz-TDS@D棟 201-202

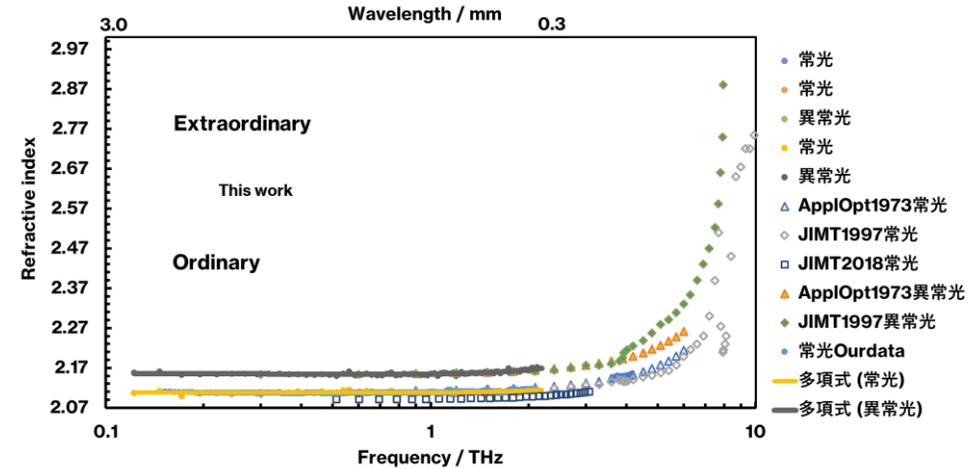
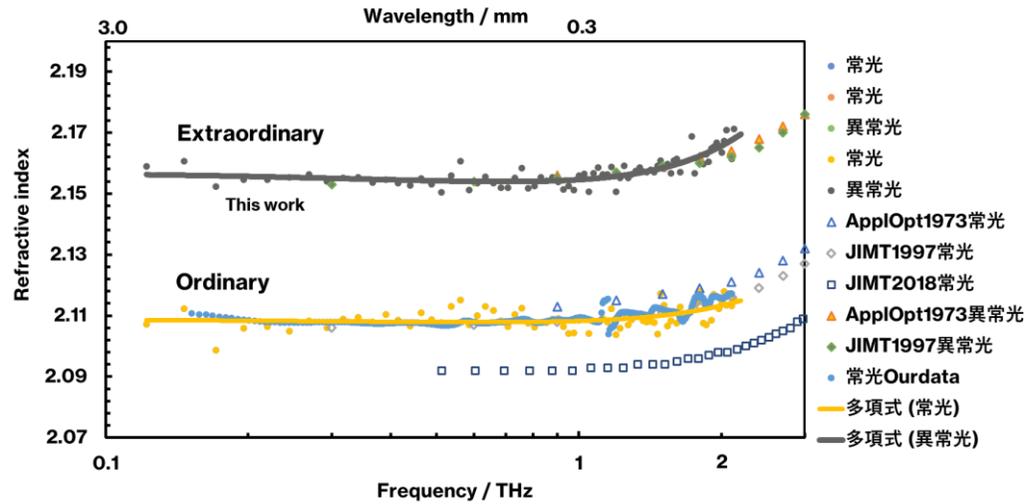
一般的なTDSシステム、
フェムト秒レーザー (<100fs、800nm、30mW)
PCA発生、PCA検出



(上) 時間波形 (下) 周波数スペクトル
~4THz、60dBの測定系

➡ 非線形光学材料を測定

水晶の測定結果

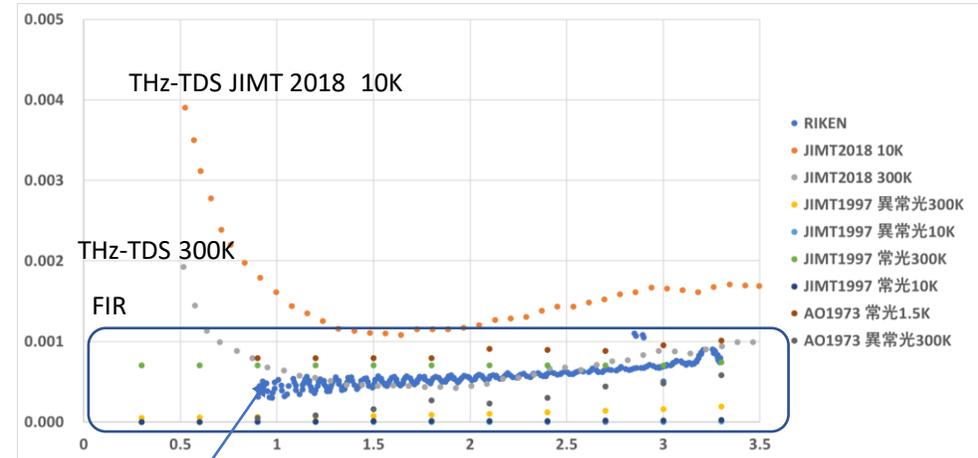
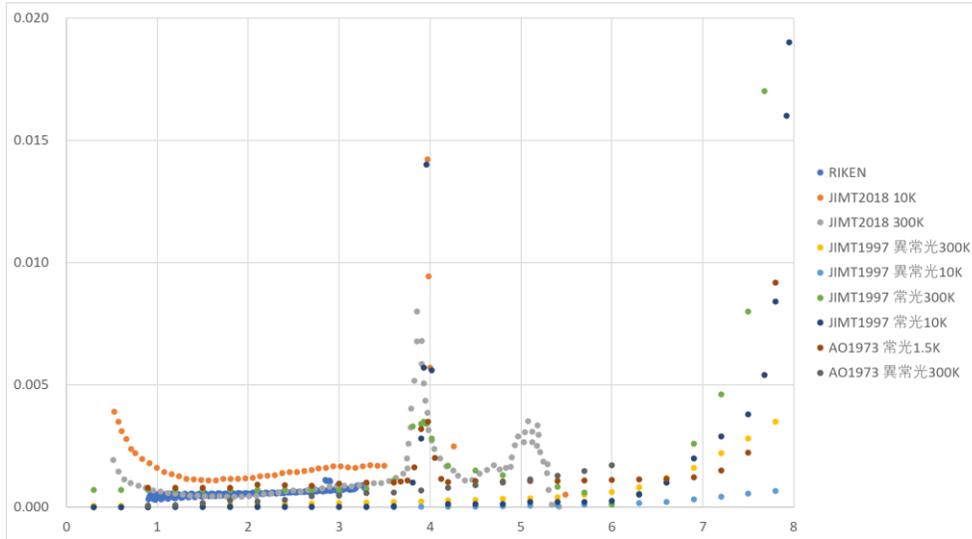


水晶複屈折の周波数依存性

概ね過去の文献と一致するデータ

なぜか、2018のTHz-TDSの結果(JIMT 2018)が0.02ほどずれている。

水晶の吸収について

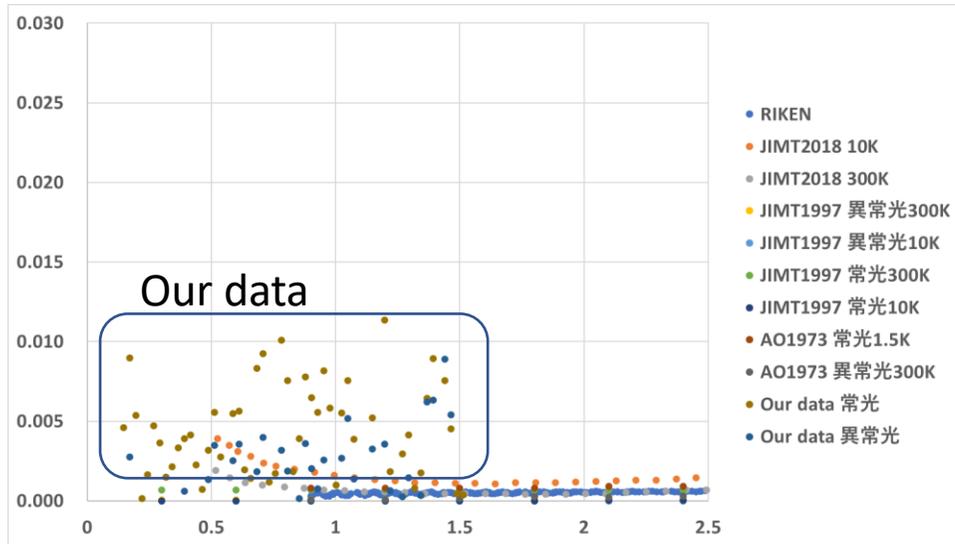


RIKENデータ

水晶の消衰係数k 文献値まとめ

THz-TDSの結果は大きい値になっている。
全ての論文において、不純物濃度は議論されていない。シリカもしくは
QuartzもしくはFused quartzだけと書かれている。

水晶の吸収について

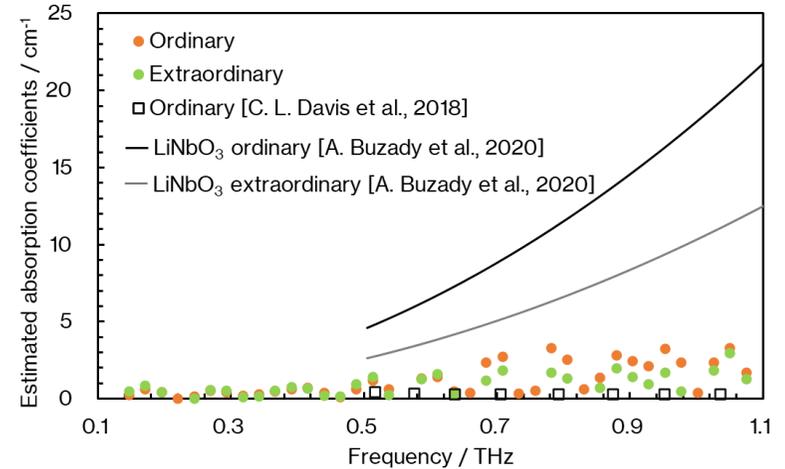


消衰係数一覧 + Our data

注:論文データ用の薄い試料
且つ 集光点、非平行光+温調ありでの測定

TDSデータのばらつきがみられる(薄いサンプルを集光点で測定)
→データ計算の改善が必要

ただし、水晶はモノによって吸光度が異なる。



吸収係数の周波数依存性

LNに比べて吸光度が低い。
なお、温度依存性も取得しており、ほぼ温度無依存であることは測定済み

準備状況と今後の予定について

テラヘルツ帯でのパラメータを測定できるシステムを構築 (0.1~4THz)
これに冷凍機を組み込むことで温度依存性も測定できる。

予定 (どこまで行う?) 赤字は購入予定品、詳細は後で

窒素パージ、もしくは水蒸気除去のシステム

LNなども測定 : 非線形光学結晶

文献値の話参照

温度特性も計測できるように冷凍機を再度光学系に取り入れる。
(新しい光学系を作成)

帯域、強度を高性能化できるシステムを構築。 : フェムト秒レーザー、光学部品、検出器
(光源、検出器、フェムト秒レーザー)

水晶の種類によってはパラメータが異なるので、それらを計測 : 水晶
(メーカーの異なる材料、不純物濃度の異なる試料の準備)

測定誤差を検証するために、他の測定手法との比較検討を行う。 : FTIR?
(FTIR、UVSOR、TPG、ネットワークアナライザなどとの比較)

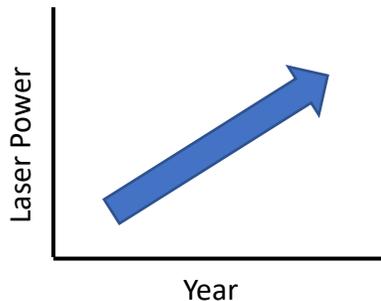
テラヘルツ波波長変換

- ⑭ QPM特性の評価
- ⑮ THz波への極限波長変換素子の開発
- ⑯ 波長1.5mmの極限波長に出力10mJまでの変換



テラヘルツ波への波長変換イメージ(差周波)

大雑把に言うと、光の技術を使ったテラヘルツ波発生は多くがレーザー励起の差周波発生(フェムト秒励起、DFG、TPG、QCLなど。)そこで、最適な波長と強度の光を利用して差周波テラヘルツ波発生を行う。



レーザーの性能(パワー)は右肩上がりで大きくなっているので、レーザーの高度化に付き合えるテラヘルツ波への波長変換デバイスの開発が重要(テラヘルツ波独自の方法があればいいが、...)

1mJ 発生可能なデバイス

- ⑭ QPM特性の評価
- ⑮ THz波への極限波長変換素子の開発
- ⑯ 波長1.5mmの極限波長に出力10mJまでの変換



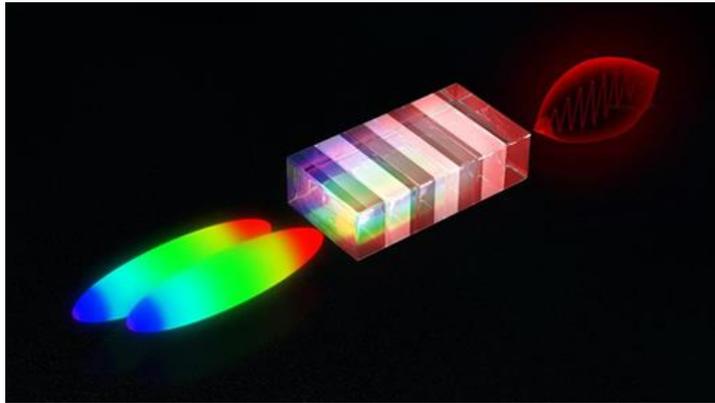
サブJ~J級のレーザーがあるので、1mJを達成するためには、
変換効率が約0.1%~1%あればOK。

あとは、レーザー入射に耐えられるように工夫して
非線形光学デバイスを作成。

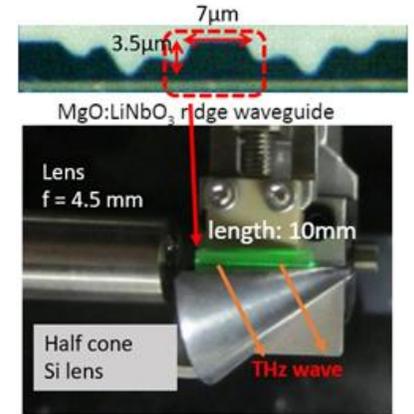
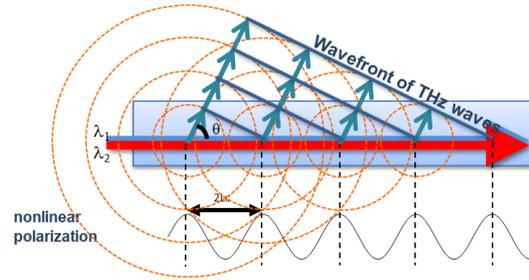
要は、高い変換効率+損傷閾値の高い発生法があればいい。

そこで、まずは変換効率を確保する。そのあとでレーザーの高強度化を行う。

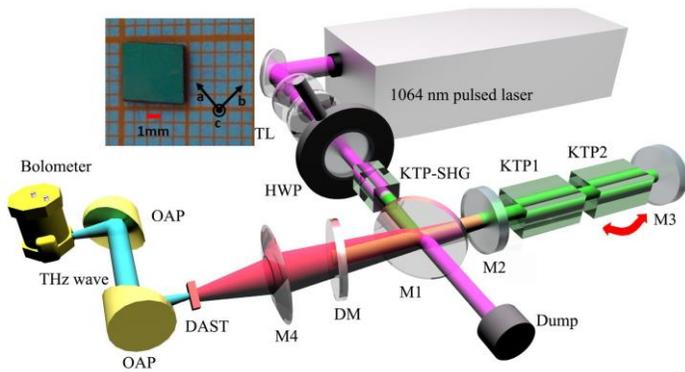
デバイス候補



PPLNを用いたテラヘルツ波波長変換 0.6mJ



チェレンコフ位相整合を利用した波長変換 変換効率約0.1%

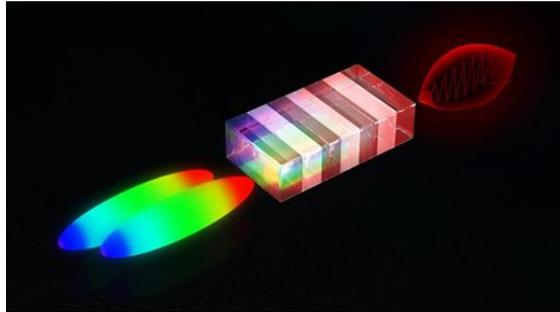


非線形光学結晶DASTからの差周波テラヘルツ波発生 0.0131%の変換効率

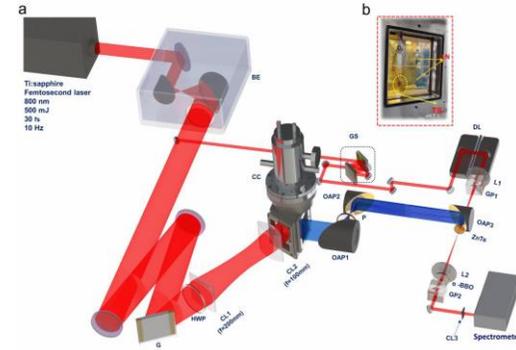
	メリット	デメリット
PPLNコリニア	ビーム形状がきれい	LNの吸収、要冷却
チェレンコフ位相整合	結晶の吸収を軽減、位相整合が楽	ビーム形状
有機結晶	非線形光学効率は高い(はず)	結晶サイズ、レーザー耐性

➡ 最終的には水晶QPMが最適?

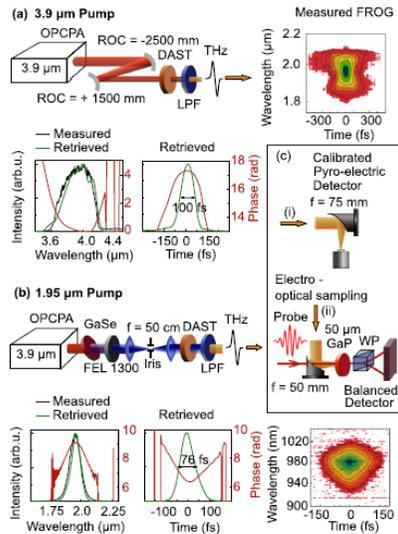
参考：高出力を達成しているTHz波発生



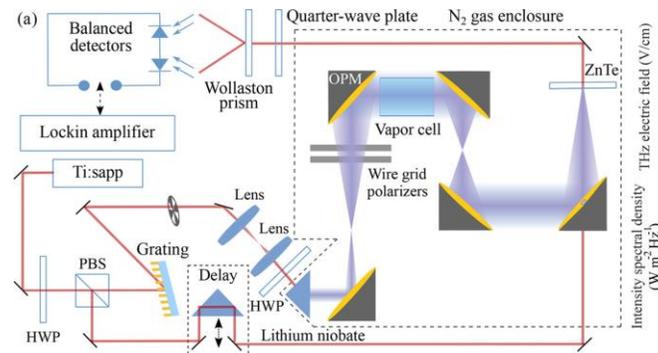
Spectral phase control of interfering chirped pulses for high-energy narrowband terahertz generation
Nature Commun. 2019



1.4-mJ High Energy Terahertz Radiation from Lithium Niobates
~ 0.7% (Laser & Photonics Reviews 2021)



Highly efficient THz generation by optical rectification of mid-IR pulses in DAST ~6% (APL Photon. 2021)

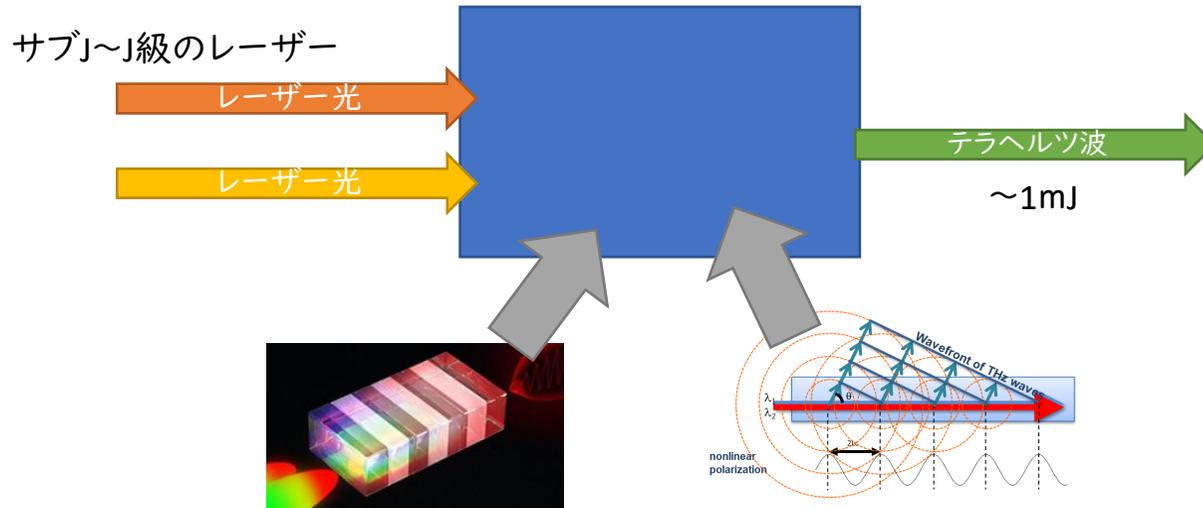


Terahertz Nonlinear Spectroscopy of Water Vapor 2.7 kV/cm
(ACS Photonics 2021)

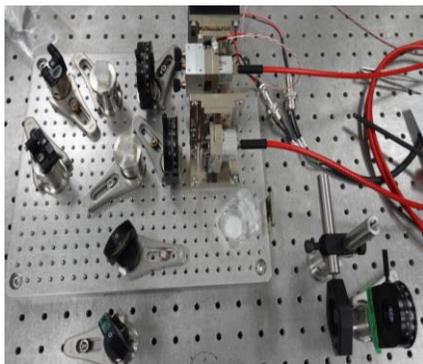
Tilted pulseがほぼほぼ主流、
DFG、コリニアは少ない(技術的な問題?)

逆に検討できる項目は実は多数ある、
例えば励起波長の選択や材料の選定など。

準備状況



To do: 励起レーザーを確保して、非線形デバイスを置いて、波長変換を行う。



励起用レーザー

現状、レーザーから数mJの出力は確認
THz検出器、フィルター、一部結晶、光学部品は入手済み

波長変換の方法と、光学デバイスを検討

予定

実施項目

テラヘルツ領域の評価系作成

測定精度向上：パラメータのばらつきを抑える、他の方法との比較(どこまでするか?)
低温測定をできるようにする。(新しいシステムを組む?)

テラヘルツ波波長変換

励起用の2波長への波長変換

QPM素子を並べて波長変換(並列or直列)、効率のいい波長変換を行う。
最適な波長は後程探す。

例1500~1510 1.3THz、1500~1505 0.67THz、1500~1502 0.27THz

結晶を置いていくつかの方法でテラヘルツ波発生を実証。

テラヘルツ波発生と検出の実証を行ってから、変換効率を上げていく。

ステージゲートについて?

購入予定品について

ATLAでの計画、購入予定品

THzカメラ (Swiss THz) 1,300,000~11,470,000円



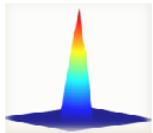
非冷却・高感度テラヘルツ検出器

「RIGI-THz」

- ・ ビームプロファイリング
- ・ 非破壊・非接触性能検査
- ・ 産業用プロセス制御
- ・ ライフサイエンス分野
- ・ セキュリティ分野
- ・ 高感度 NEP: $< 1.5 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ (at 4.6THz)



Coin size!!



THz-QCL光源イメージデータ

- ・ 帯域: 4.6 THz
- ・ レーザーパワー: 0.6 μW
- ・ 露光時間: 50 μs
- ・ データ取得: シングルショット

・ V01 CW source



V01
Vigas Global, Inc.



sub-mW 480 GHz

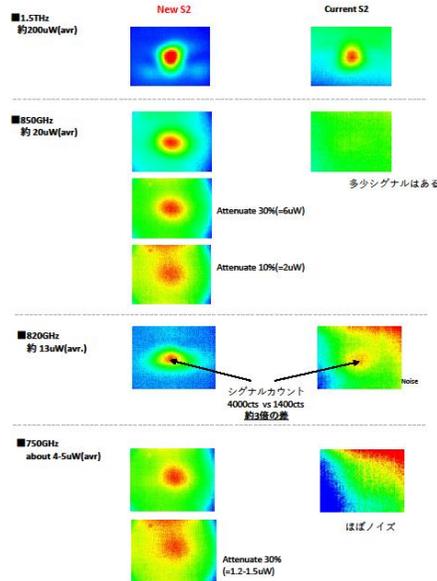
【仕様】

Model	S2	S3	M4	M1	M2	L2	XL1
	S2-Ex				M2-Ex		
Pixel size	25 μm	17 μm	17 μm	25 μm	17 μm	15 μm	15 μm
Number of pixel	160 × 120	160 × 120	240 × 180	384 × 288	640 × 480	1024 × 768	1280 × 1024
Active area(mm)	4 × 3	2.7 × 2.04	4.08 × 3.06	9.6 × 7.2	10.88 × 8.16	15.36 × 11.52	19.2 × 15.36
Dynamic range	14 bit	14 bit	10 bit	14 bit	14 bit	14 bit	14 bit
Frame rate	9 Hz	9 Hz	25 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
NEP	$< 1.5 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ (at 4.6THz)						
Shutter	Integrated for automatic background correction						
Sensitivity	$< 1 \text{ THz} \sim 18 \text{ THz}$						
Power supply	USB- powered						
Weight	$< 70 \text{g}$		$< 100 \text{g}$				
Dimensions(cm)	W3.2×H3.2×D4			W4×H4×D5.5			
Window	Si						
Adapter	none , Filter mount etc (optional)						

*Exモデルは $< 1 \text{ THz}$ でベーシックモデルよりも3~4倍高感度なセンサーを搭載しています

S2モデル 現行品 vs 新製品 感度比較
Confidential
2020/10/15

THz光源: THzパメトリック光源



	素子サイズ	受光部	dynamic range	fps	納期	価格(税抜)
S2	25 μm	160*120(4mm*3mm)	14bit	9	8-10w	¥1,300,000
S2EX	25 μm	160*120(4mm*3mm)	14bit	9	12-14W	¥1,900,000
S3	17 μm	160*120(2.7mm*2.04mm)	14bit	9	8-10w	¥1,160,000
M4	17 μm	240*180(4.08mm*3.06mm)	10bit	25	8-10w	¥1,700,000
M1	25 μm	384*288(9.6mm*7.2mm)	14bit	50	8-10w	¥2,790,000
M2	17 μm	640*480(10.88mm*8.16mm)	14bit	50	8-10w	¥3,250,000
M2EX	17 μm	640*480(10.88mm*8.16mm)	14bit	50	12-14W	¥5,200,000
L2	15 μm	1024*768(15.36mm*11.52mm)	14bit	50	14-16w	¥7,400,000
XL1	15 μm	1280*1024(19.2mm*15.36mm)	14bit	50	14-16w	¥11,470,000

購入予定品について

ATLAでの計画、購入予定品

THzカメラ (INO、MICROXCAM) 6,200,000円

MICROXCAM-384i THzカメラモジュール

概算価格：約6,200,000円（税抜き）

< 付属品 >

- ・ 384 x 288 pixel focal plane array detector
- ・ 35um pixel pitch uncooled microbolometer detector
- ・ High resistivity silicon window on FPA detector
- ・ Assembly of the electronic cards of the camera
- ・ Power supply
- ・ Operating software and manuals
- ・ Assembly, integration, and characterization for turn-key operation
- ・ Gigabit Ethernet connector port
- ・ Raw data 16-bit output
- ・ Protective Casing
- ・ Microxcam software
- ・ SDK

納期：数か月

NEP characterization and analysis method for THz imaging
Marc Terroux*, Pierre Talbot, Francis Genereux, Linda Marchese, El-Hassane Oulachgar
and Alain Bergeron
INO Institut National d'Optique, 2740 Einstein, Quebec City, Quebec, Canada, G1P 4S4

ABSTRACT

Over the last decade, significant progress has been made in the development of Terahertz (THz) imagers to satisfy the growing interest for see-through devices for different market applications. The noise-equivalent power (NEP) is a widely accepted figure of merit used to compare the sensitivity performance of detectors. However, with no widely recognized standard for NEP, it is often difficult to have a fair comparison between different sensors. Having a clear understanding of the characterization method used to calculate this important metric will lead to better estimation of the performances that could be expected from an imaging device.

There is some confusion regarding whether NEP should be expressed in terms of power (W) or power by spectral density ($W/Hz^{1/2}$). The difference between the two expressions is the normalization of the first by the square root of the detector's equivalent noise bandwidth (ENBW). By properly defining the ENBW for a specific sensor, the translation between the two is then consistent.

This paper presents the NEP characterization of INO's Microxcam-384i camera over a wide frequency range. A description of the measurement setup is provided, as well as the details of the analysis method, including the estimation of the ENBW. Finally, values for the NEP using both expressions are provided for wavelengths between 70 μ m (4.5 THz) and 1.5mm (198 GHz), demonstrating the broadband sensitivity of the camera.

Keywords: Terahertz, THz, NEP, imaging, characterization, camera, INO

1. INTRODUCTION

Imaging technologies in the terahertz (THz) frequency band have become more widely available in recent years. Significant advances have been made in active imaging systems with the goal of providing innovative solutions for industrial applications such as non-destructive testing, and process control as well as homeland security applications such as body scanning. New imaging devices are being developed for the market with improved performances to satisfy the most demanding needs. The problem is that the current lack of an 'official' recognized standard to accurately evaluate the performance of these devices makes it difficult to establish a reliable comparison between the different options.

The noise-equivalent power (NEP) is by far the most accepted metric in the industry, however the characterization method must be well explained to make it meaningful. This paper will present the measurement and analysis methods used by INO to evaluate the performances of its Microxcam-384i camera. Commercialized as a broadband imager, NEP results for the Microxcam-384i will be presented for a wide section of the THz spectrum (198 GHz to 4.5THz). This figure of merit is directly linked to the noise characteristics, the responsivity and the equivalent noise bandwidth (ENBW) of the camera.

2. METHODOLOGY

2.1 Responsivity measurement

An optical setup has been specifically developed for accurate evaluation of the responsivity of different imaging detectors fabricated at INO. A schematic of the setup is shown in Figure1. The responsivity is defined as the output electrical signal of a detector for a given radiant power incident on the detector.

*marc.terroux@ino.ca; phone 1 418 657-7006; fax 1 481 657-7009; www.ino.ca

購入予定品について

ATLAでの計画、購入予定品

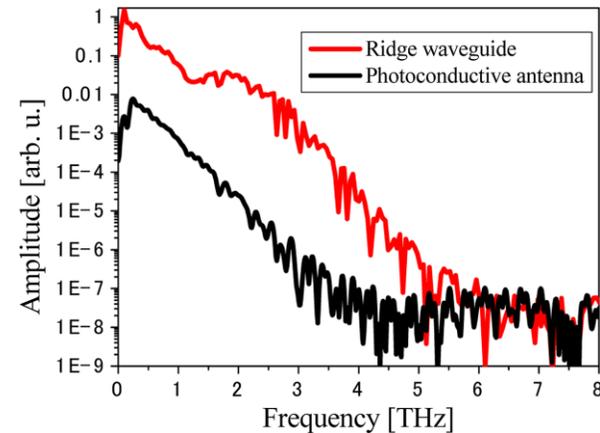
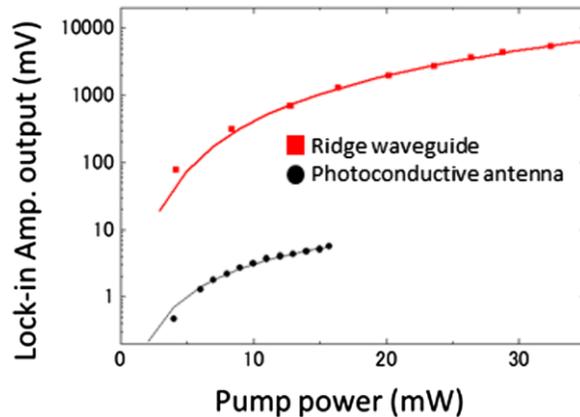
フェムト秒レーザー 6,000,000~

スペック次第で高くなる。

ハイパワー化、短パルス化、波長可変等々

TDSを組むために必要、どこまでのTDS性能を要求するか？

テラヘルツパワー、DR、帯域などを向上可能



通常のTDSと、**デバイス改善後**のTDSの比較

光源: NLO+プリズム、検出器: ボウタイアンテナ

ただし、構築なども含めると、コスパは・・・

購入予定品について

ATLAでの計画、購入予定品 FTIR

分光測定の帯域をカバー、TDSのデータを補間
前の見積もりは20,000,000円～、

↑新規購入の場合
↓別案

- ・波数は中赤外と680～30cm⁻¹に対応
- ・検出はPE窓のTGS検出器
- ・窓板やBSは、手動交換

これで、新規購入の場合でも100万以内になります。
また現在ご使用いただいているFT/IR-6300FVにも素子と検出器を増設することにより同様の波数帯域で使用可能です。
こちらのお見積書も添付いたします。

価格ダウンの最も大きい要因は、Siボロメータを外したことにあります。
Siボロメータの感度は、TGSと比較して2桁ほど高いです。
検出器をSiボロメータにする場合は、プラス1000万円ほど必要になります。
現行のFT/IR-6300にSiボロメータを増設する場合は、工場引取り改造となりますので、さらに費用が上乗せされます。
(おそらく100万円以内かと思えます)

2021年6月28日 No. 220C0182

御見積書

国立研究開発法人理化学研究所 殿
下記の通りお見積申し上げます。

シャスコサポート株式会社
名古屋営業所
所長 伊與田 憲雄
〒453-0015
愛知県名古屋市中村区博町 21-2
TEL:052-452-4031 FAX:052-452-2685

名古御営業所
所長 伊與田 憲雄
〒459-0015
愛知県名古屋市中村区博町 21-2
TEL:052-452-4031 FAX:052-452-2685

総金額 ￥9,452,025-

備考(お注文後)2ヵ月
お受取場所(見積書指定場所)
備考(お注文後)下記見積りに含む
御支払金額(税別)見積り
見積有効期間30日

型番	品名	単価	数量	金額
FT/IR-6000	日本分光 (株) 製造赤外線対応FT/IR-6000 (内訳) フーリエ変換赤外分光測定機 赤		1	7,750,000
MT-35-400BS	広帯域マイラー交換器 (800~20cm ⁻¹)		1	1,030,000
PE-4500FV	赤外線窓板 (700~20cm ⁻¹)		1	130,000
PEGS-4000	赤外線 TGS 検出器 (700~30cm ⁻¹)		1	320,000
GLD-102R	赤外線検出器用ポンプセット		1	455,000
SSH-4000	サンプリングセル		1	350,000
	搬入費 (中部・北陸 : 大型)		1	80,000
	小計			10,085,000
	お値引			▲ 1,592,250
	小計			8,592,750
	消費税			859,275
	合計			9,452,025
	※金型室対応モデル			

JASCO SUPPORT CO., LTD.

2021年6月28日 No. 22060301

御見積書

自然科学研究機構 殿
下記の通りお見積申し上げます。

シャスコサポート株式会社
名古屋営業所
所長 伊與田 憲雄
〒459-0015
愛知県名古屋市中村区博町 21-2
TEL:052-452-4031 FAX:052-452-2685

名古御営業所
所長 伊與田 憲雄
〒459-0015
愛知県名古屋市中村区博町 21-2
TEL:052-452-4031 FAX:052-452-2685

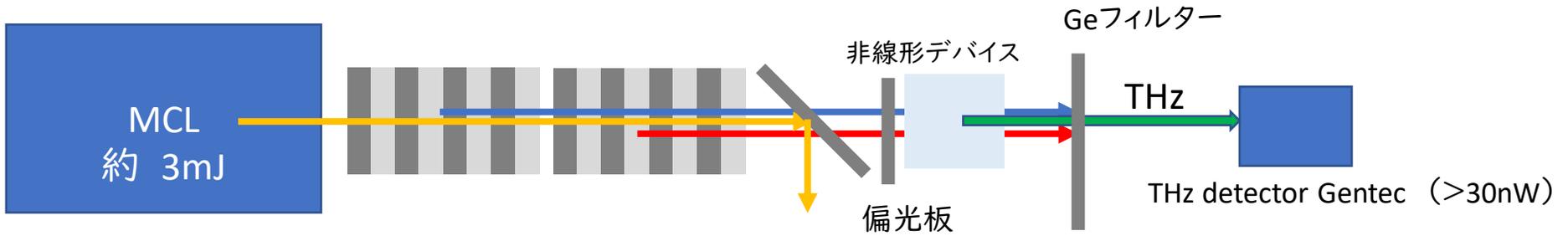
総金額 ￥1,687,400-

備考(お注文後)2ヵ月
お受取場所(見積書指定場所)
備考(お注文後)下記見積りに含む
御支払金額(税別)見積り
見積有効期間30日

型番	品名	単価	数量	金額
MT-35-400BS	広帯域マイラー交換器 (800~20cm ⁻¹) (内訳)		1	1,030,000
PE-4500FV	赤外線窓板 (700~20cm ⁻¹)		1	130,000
PEGS-4000	赤外線 TGS 検出器 (700~30cm ⁻¹)		1	320,000
	検出器材料		1	77,000
	搬入費 (中部・北陸 : 小型)		1	70,000
	小計			1,534,000
	消費税			153,400
	合計			1,687,400

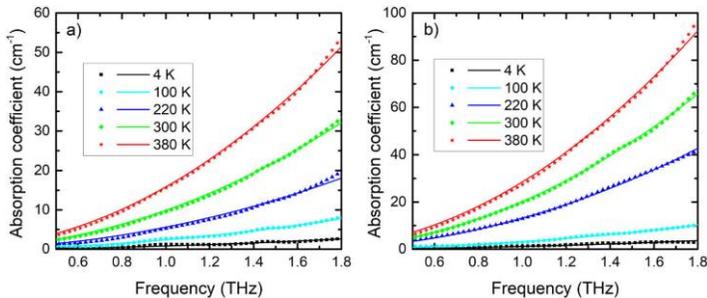
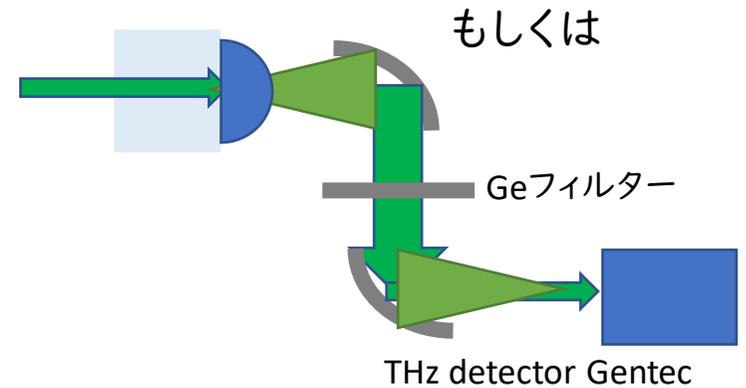
JASCO SUPPORT CO., LTD.

差周波THz波発生



LNだと吸収大
0.2THzあたりを出すためには1500,1502nmくらい

- 1500~1510 1.3THz
- 1500~1505 0.67THz
- 1500~1502 0.27THz



Optical Materials Express Vol. 10, Issue 4, pp. 998-1006 (2020)

コヒーレンス長がかなり短い
→ 単結晶では厳しいか

差周波発生:

テラヘルツ波のエネルギーに等しい差を持った2つの光を結晶に入れて、テラヘルツ波を取り出す。



FTIRの安価バージョン

ATLAでの計画、購入予定品 FTIR

分光測定の帯域をカバー、TDSのデータを補間
前の見積もりは20,000,000円～、

↑新規購入の場合
↓別案

- ・波数は中赤外と680～30cm⁻¹に対応
- ・検出はPE窓のTGS検出器
- ・窓板やBSは、手動交換

これで、新規購入の場合でも100万以内になります。
また現在ご使用いただいているFT/IR-6300FVにも素子と検出器を増設することにより同様の波数帯域で使用可能です。
こちらのお見積書も添付いたします。

価格ダウンの最も大きい要因は、Siボロメータを外したことにあります。
Siボロメータの感度は、TGSと比較して2桁ほど高いです。
検出器をSiボロメータにする場合は、プラス1000万円ほど必要になります。
現行のFT/IR-6300にSiボロメータを増設する場合は、工場引取り改造となりますので、さらに費用が上乗せされます。
(おそらく100万円以内かと思えます)

2021年6月28日 No. 22003182

御見積書

国立研究開発法人理化学研究所 殿
下記の通りお見積申し上げます。

シャスコサポート株式会社
名古屋営業所
所長 伊與田 憲雄
〒453-0015
愛知県名古屋市中村区博町 21-2
TEL:052-452-4031 FAX:052-452-2685

総金額 ￥9,452,025-

前払(現金入金) 12ヶ月
納入先 名古屋営業所
請求書 納入先指定
納入先 名古屋営業所
見積有効期間 30日

型番	品名	単価	数量	金額
FT/IR-6000	日本分光 (株) 製造 赤外線対応 FT/IR-6000 (内訳)		1	7,750,000
MT-35-400BS	フーリエ変換赤外線光源装置 赤		1	1,030,000
PE-4500FV	広帯域マイラー交換器 300~20cm ⁻¹		1	130,000
PEGS-6000	赤外線窓 TGS 検出器 100~20cm ⁻¹		1	320,000
GLD-102R	赤外線窓真空ポンプセット		1	455,000
SSH-400C	サンプリングセル		1	350,000
	搬入費 (中部・北陸 : 大型)		1	80,000
	小計			10,085,000
	消費税			▲ 1,592,250
	小計			8,592,750
	消費税			859,275
	合計			9,452,025

※金型成形モデル

JASCO SUPPORT CO., LTD.

2021年6月28日 No. 22060391

御見積書

自然科学研究機構 殿
下記の通りお見積申し上げます。

シャスコサポート株式会社
名古屋営業所
所長 伊與田 憲雄
〒453-0015
愛知県名古屋市中村区博町 21-2
TEL:052-452-4031 FAX:052-452-2685

総金額 ￥1,687,400-

前払(現金入金) 12ヶ月
納入先 名古屋営業所
請求書 納入先指定
納入先 名古屋営業所
見積有効期間 30日

型番	品名	単価	数量	金額
MT-35-400BS	広帯域マイラー交換器 300~20cm ⁻¹		1	1,030,000
PE-4500FV	赤外線窓 TGS 検出器 100~20cm ⁻¹		1	130,000
PEGS-6000	赤外線窓 TGS 検出器 100~20cm ⁻¹		1	320,000
	納品技術料		1	77,000
	搬入費 (中部・北陸 : 小型)		1	70,000
	小計			1,534,000
	消費税			153,400
	合計			1,687,400

JASCO SUPPORT CO., LTD.