

大塚プロトタイプ評価

M2 中村 翔太

1. Introduction

今まで構築してきた ASOPS-THz-TDS は、ファイバーレーザーからの出力光（波長 1550nm）を自由空間光学系によって波長変換（波長:800nm）した後、800nm の励起用の LT-GaAs-PCA を THz 発生・検出に用いていた。しかし、このような自由空間を伝搬した光学系である分光装置は実用的ではない。実際に THz 分光装置を産業分野に応用するためには、よりコンパクトで安定な分光装置が要求される。ここで、もし光ファイバー光学系を導入してレーザー光学系をオール光ファイバー化できると、装置の小型化（コンパクト）・安定化（ロバスト）・メンテナンスフリー化といった実用性を付加できる。

本研究では、波長 1550nm 帯で THz 波を発生・検出可能な LT-InGaAs-PCA を用いて、ファイバーレーザーからの出力光を直接 PCA にカップリングしたオールファイバー光学系プロトタイプ装置を大塚電子と共同開発で開発し、装置の特性評価を行ったことを報告する。

2. Theory of ASOPS-THz-TDS

ステージ走査式THz-TDSの欠点であるスペクトル分解能向上と計測時間短縮のトレードオフの関係を解消するための手段として、非同期光サンプリング式テラヘルツ時間領域分光法(Asynchronous-Optical-Sampling THz-time-domain-spectroscopy ; ASOPS-THz-TDS)では、わずかにモード同期周波数の異なる2台のパルスレーザーを用いて、ピコ秒オーダーの超高速時間波形の時間スケールをマイクロ秒オーダーまで拡大してサンプリング計測するため、機械式時間遅延走査を用いなくとも、オシロスコープで実時間計測できる、このASOPS法をTHz-TDSに適用すると、機械式時間遅延走査では達成不可能な広い測定時間窓で時間波形が高速取得できる。その結果、ASOPS-THz-TDSはスペクトル分解能を大幅に向上できる。

Fig.1 はそれぞれ ASOPS-THz-TDS の光学系とタイミングチャートを示している。THz 発生用ポンプ光、検出用プローブ光のモード同期周波数をそれぞれ f_1 、 f_2 とする。ここで f_1 と f_2 はわずかに異なるように設定し、 $\Delta f=f_1-f_2$ が一定の値を取るようにモード同期周波数を制御する。この結果、THz パルスとプローブパルスが 1 周期毎に

$$S = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} = \frac{\Delta f}{f_1 f_2} \quad (1)$$

だけ自動的にずれていく。このずれにより機械式ステージを用いることなく時間遅延を走査することができ、THz パルス全体がプローブパルスにより高速サンプリング計測される。THz パルスの 1 周期の測定時間は THz パルスとプローブパルスが再び重なるまでの $1/\Delta f$ と

なる。周期 $1/f_1$ の信号が $1/\Delta f$ で測定されるので時間スケール拡大率 m は

$$m = \frac{f_1}{\Delta f} \quad (2)$$

となる。その結果、直接測定が困難なピコ秒オーダーの超高速 THz 波形がマイクロ秒オーダーにまで時間拡大され、汎用計測装置でのリアルタイム測定が可能になる。そして、その時間拡大された時間波形を高速フーリエ変換し、さらに時間スケール拡大率でリスケールリングすることで THz 領域のスペクトルを得ることができる。

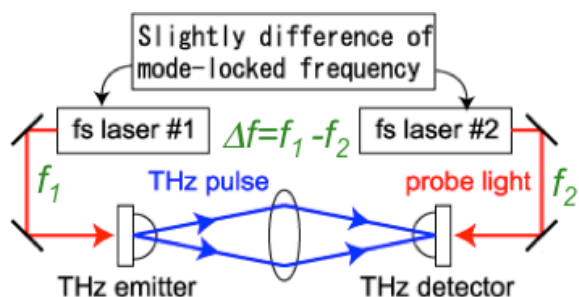


Fig.1-1 Schematic diagram of ASOPS-THz-TDS

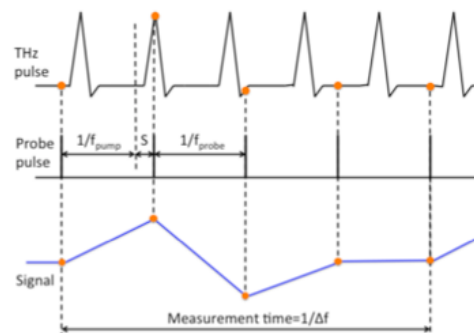


Fig.1-2 Timing chart

ASOPS-THz-TDS では、スペクトルを得る際に時間スケール拡大率式(2)に基づいてスペクトルの目盛付けを行うため、スペクトル分解能と確度は f_1 、 Δf の安定性に依存する。レーザーのモード同期周波数は Rb 原子時計（安定度 10^{-11} ）に同期させているものの、差周波 Δf は間接的に制御されているためタイミングジッターと呼ばれる揺らぎが生じている可能性がある。このタイミングジッターにより時間スケール拡大率が揺らぐと、スペクトル分解能と確度が低下してしまう。一方で、 Δf の揺らぎ自体はその絶対値に依存せず一定の揺らぎであるため、 Δf の値を高くすればするほど時間スケール拡大率の安定性が向上し、タイミングジッターの影響を受けにくくなる。よって出来る限り Δf の値を高く設定することで、タイミングジッターの影響を軽減し、スペクトル分解能と確度がより正確に得られる。

3. Evaluation of timing jitter

ASOPS-THz-TDS において問題となる要素の一つであるタイミングジッターを、高圧下における水蒸気の吸収線の線幅を用いて評価を行った。トリガーには SFG 相互相関信号と PG を用いてそれぞれにおいて差周波 50Hz の条件で評価を行う。トリガーに PG を用いることができれば、SFG 相互相関関係を構築する手間が省け、より実用的なオールファイバー型装置を開発する手助けとなる。しかし、SFG 相互相関信号と違い、実際のレーザー信号を用いていないので、レーザー揺らぎの影響を大きく受ける可能性がある。そこで、両者の比較を行った。実験装置図を Fig.2 に、測定条件を Table.1 に示す。それぞれの条件で線

幅の評価を行った。

SFG trigger and Pulse generator trigger				
No.	Total pressure [Pa]	Water vapor [Pa]	Nitrogen [Pa]	Expected line width [MHz]
1	3500	125	3375	250
2	7000	250	6750	500
3	14000	500	13500	1000
4	20000	1000	19000	1500

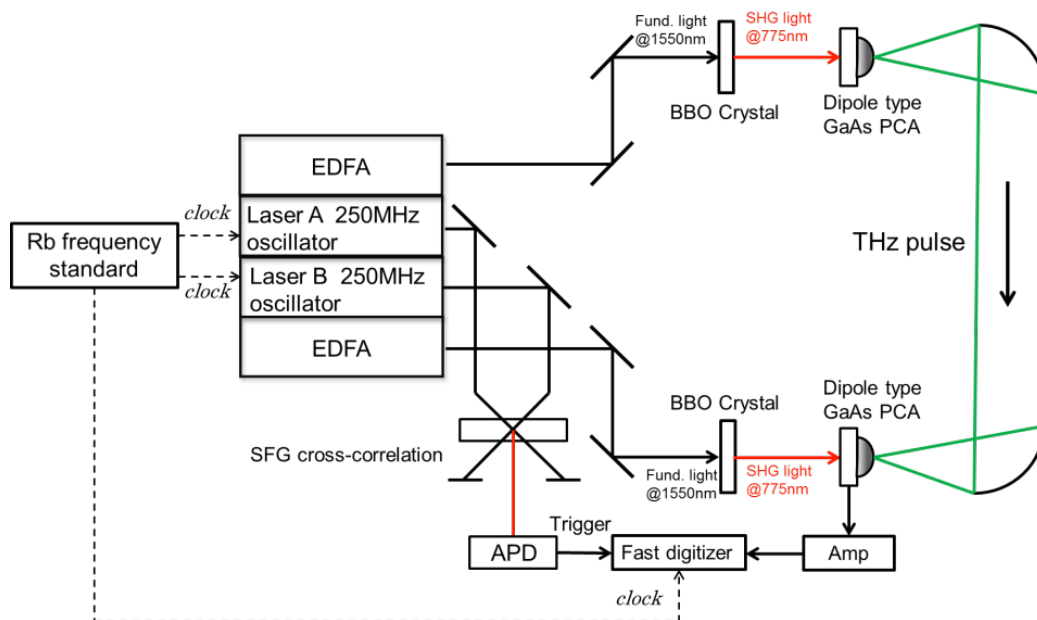


Fig.2 Experiment set up of ASOPS-THz-TDS

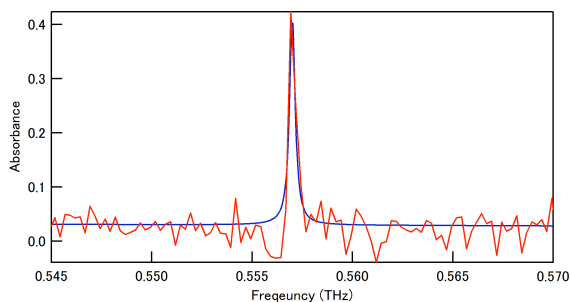


Fig. 3-1 No.1 of SFG (line width=335Pa)

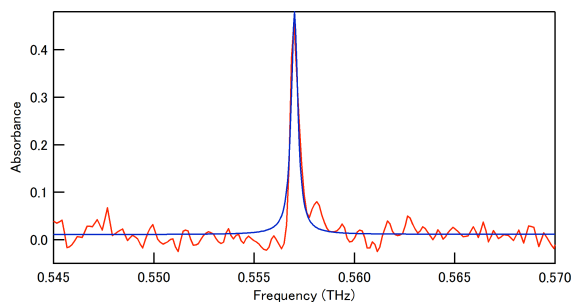


Fig. 3-2 No.1 of PG (line width=434Pa)

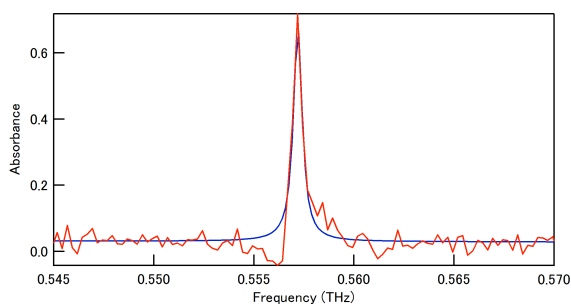


Fig.3-3 No.2 of SFG (line width=530Pa)

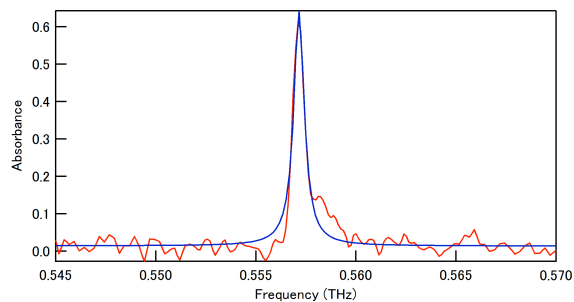


Fig.3-4 No.2 of PG (line width=639Pa)

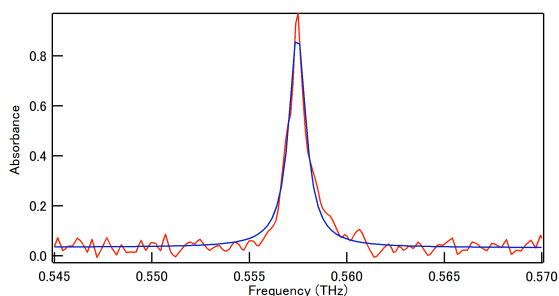


Fig.3-5 No.3 of SFG (line width=1003Pa)

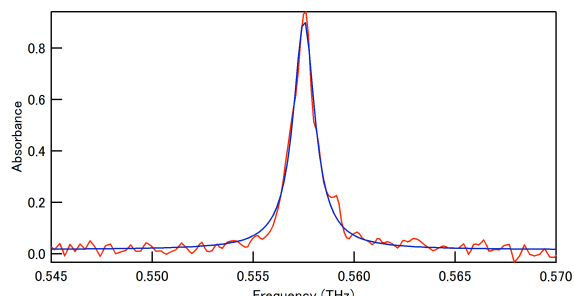


Fig.3-6 No.3 of PG (line width=1285Pa)

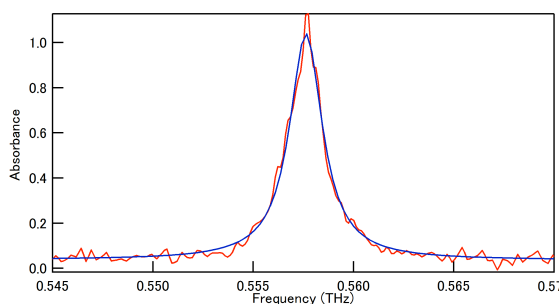


Fig.3-7 No.4 of SFG (line width=1686Pa)

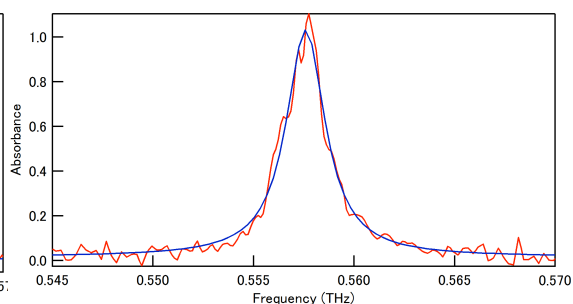


Fig.3-8 No.4 of PG (line width=1600Pa)

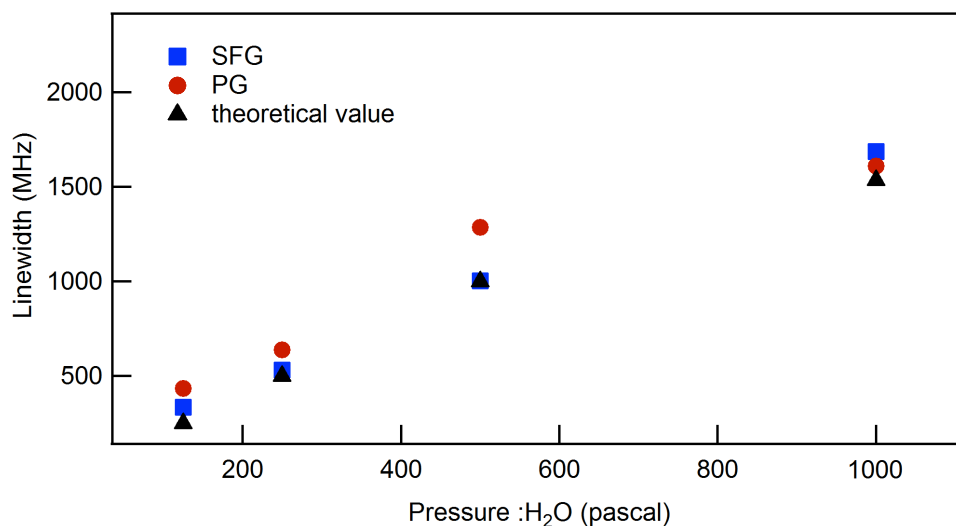


Fig.4 Relationships between expected linewidth and experimental linewidth using SFG and PG

SFGはNo.1は線幅335Pa、No.2は線幅530Pa、No.3は線幅1003Pa、No.4は線幅1686Paとなった。PGはNo.1は線幅434Pa、No.2は線幅639Pa、No.3は線幅1285Pa、No.4は線幅1600Paとなった。低圧下における線幅が狭い場合、タイミングジッターの影響によりPGはSFGに比べて線幅が太くなる。しかし、高圧下における線幅が比較的広い場合、PGとSFGの双方に大きな違いはなく、タイミングジッターの影響を無視できる。

この結果から、高い分解能を要求しない計測において、トリガーをPGで使用してもジッターの影響はSFGとほぼ同等であるため、オールファイバー化も可能であると考えられる。

4. Experiment set up of prototype

大塚プロトタイプ実験装置をFig.5に示す。共同開発したプロトタイプ装置のTHz光学系(Fig.5-1-透過配置、Fig.5-2-反射配置)の外観と光路を示している。光源にはMenloSystems社製フェムト秒ファイバーレーザーのオシレータ出力(波長1550nm、パルス幅50fs、モード同期周波数250MHz、平均パワー80mW)を、THz発生・検出素子には波長1550nm帯で動作するMenloSystems社製ファイバーカップリング型LT-InGaAs-PCAを用いた。レーザーからの出力光は光ファイバーを通して直接PCAに入射される。THz発生用ストリップライン型LT-InGaAs-PCA、THz検出用ダイポール型LT-InGaAs-PCAにはそれぞれ20mWずつ入射し、THz発生用ストリップライン型LT-InGaAs-PCAにはバイアス電圧10Vをかける。検出用PCAで検出される電流はNF社のカレントプリアンプ(Gain: 4×10^6 V/A、帯域:1MHz)で増幅され、高速デジタイザで測定する。本装置ではトリガー信号を、従来のASOPS-THz-TDSで用いていた相互相関信号と、レーザー光の自由空間光学系が一切ないPGを用いて評価を行っている。PGもレーザー等と同様にRb原子時計をタイムベースに用いている。反射配置と透過配置はPCAの位置と放物面鏡の位置を変えることによって容易に変更可能な仕様となっている。計測を行う際は、サンプルをセッティング後、密閉蓋を閉じることにより窒素パージを行う。

大塚プロトタイプの基本特性評価を行った。透過配置の電場波形と振幅波形をFig.6に、反射配置の電場波形と振幅波形をFig.7に示す。このときの測定条件は、差周波50Hz、測定時間100s、取得帯域5THz、サンプリング間隔0.8fs、デジタイザサンプリングレート2M、測定時間窓4ns(1周期)である。この結果から、トリガーをSFGとPGにする場合において、ジッターによる周波数軸のズレは見られない。また、得られた電場波形から積算回数と透過・反射配置におけるダイナミックレンジの関係をFig.8に示す。Fig.8より、透過・反射配置ともにダイナミックレンジにほとんど差はない。従って、透過・反射におけるSFG・PGに大きな差はないことが確認された。

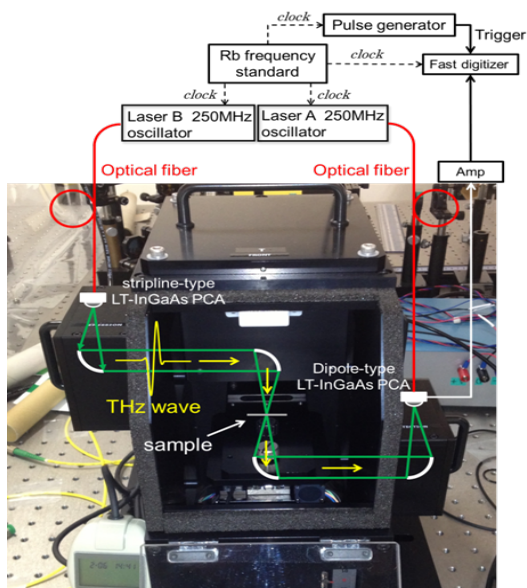


Fig.5-1 透過配置 Optical path
(Transmission configuration)

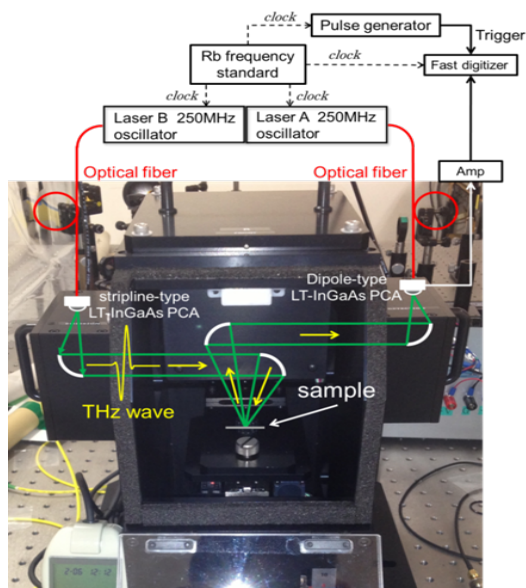


Fig.5-2 Optical path
(Reflection configuration)

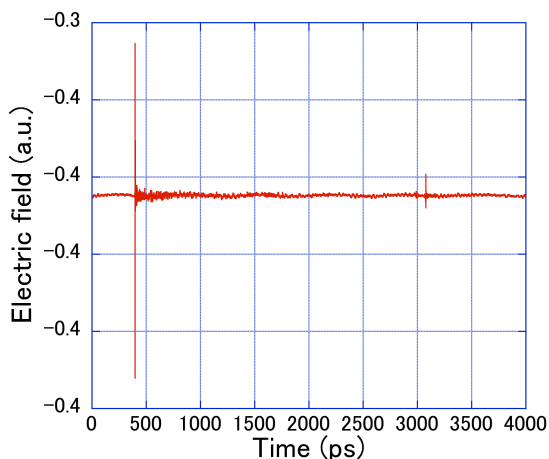


Fig.6-1 Electric field of SFG (Transmission)

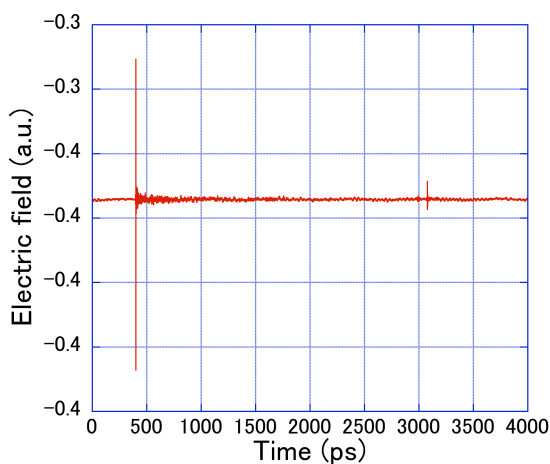


Fig.6-2 Electric field of PG (Transmission)

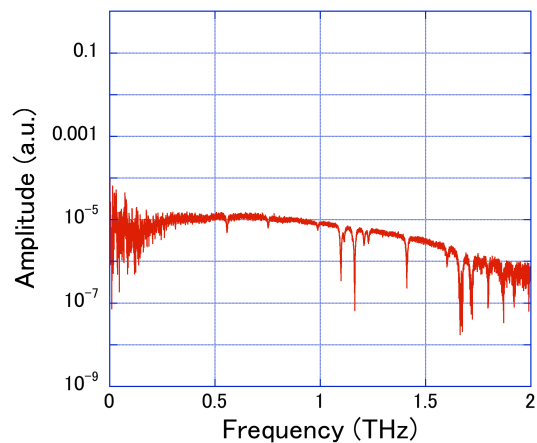


Fig.6-3 Amplitude of SFG (Transmission)

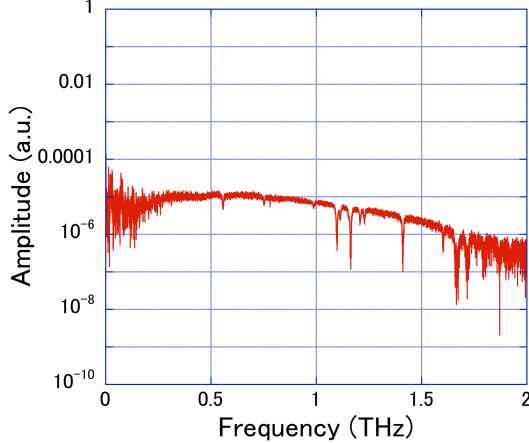


Fig.6-4 Amplitude of PG (Transmission)

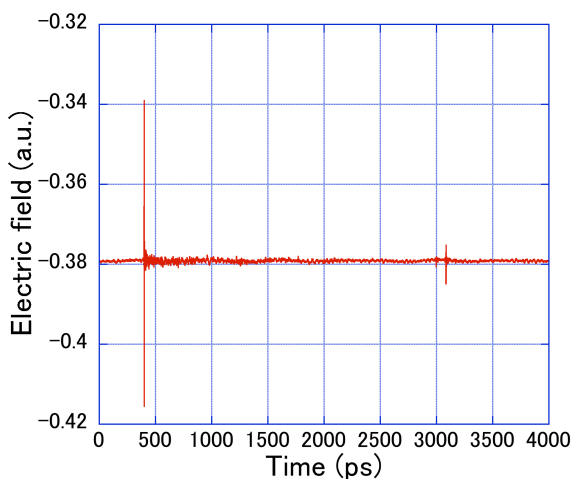


Fig.7-1 Electric field of SFG (Reflection)

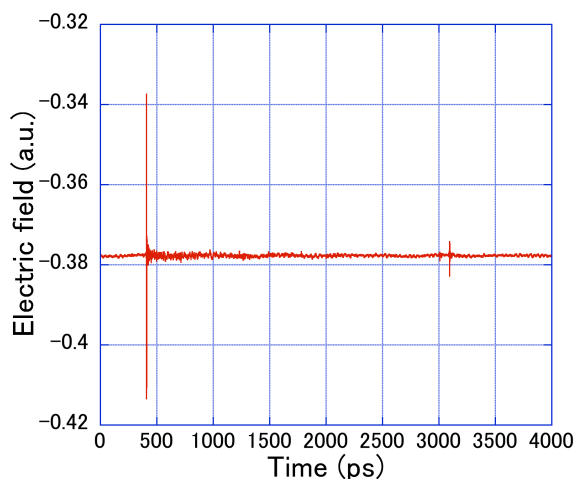


Fig.7-2 Electric field of PG (Reflection)

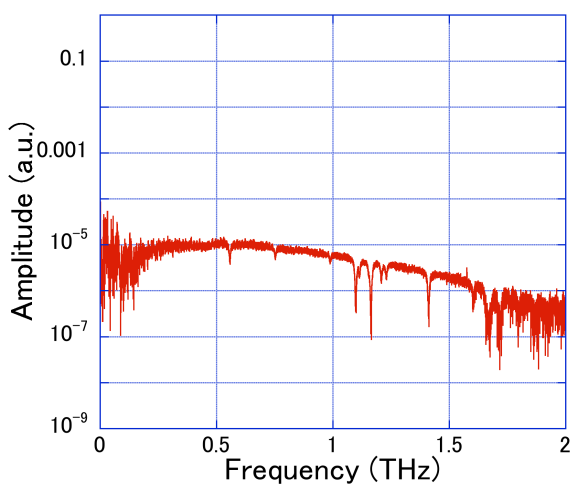


Fig.7-3 Amplitude of SFG (Reflection)

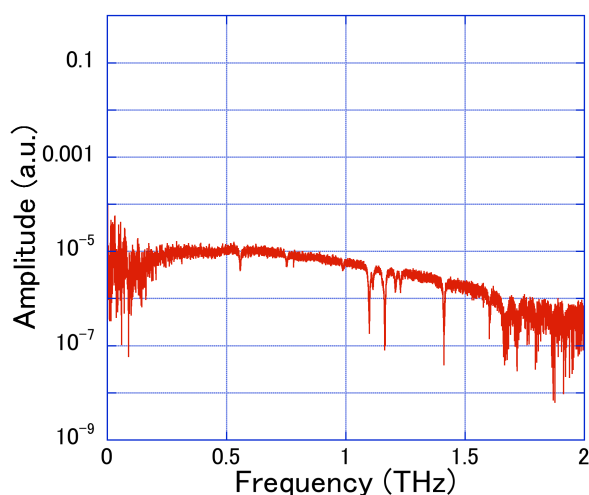


Fig.7-4 Amplitude of PG (Reflection)

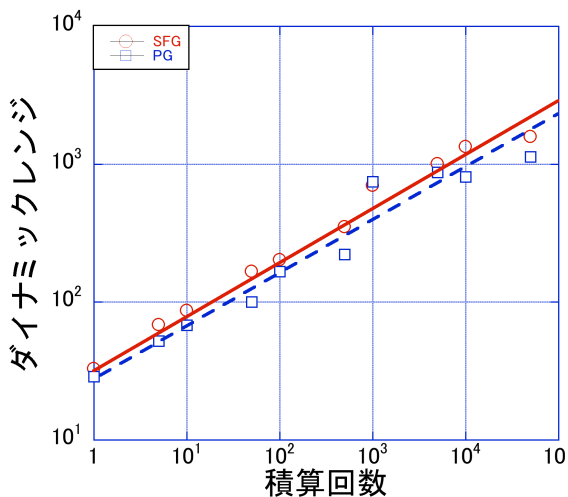


Fig.8-1 Relationships between DR and integration using SFG and PG (Transmission)

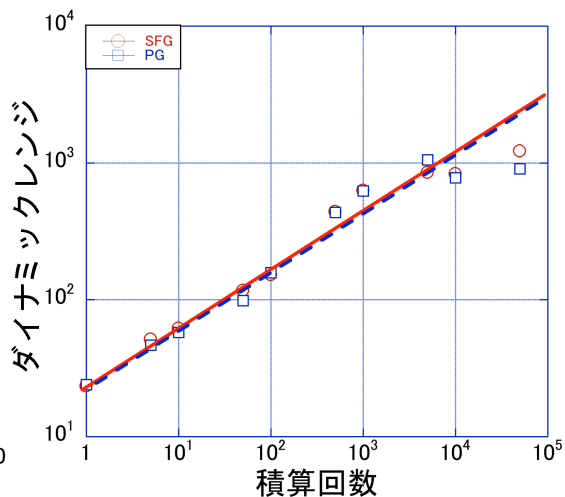


Fig.8-2 Relationships between DR and integration using SFG and PG (Reflection)

5. Measurement of metal material sample

大塚プロトタイプの特徴を活かすために、メタマテリアルのサンプルを測定した。このサンプルはテラヘルツ波と共鳴する素材でできている。金属メッシュは表面波と入射波のカップリングによる共鳴によるが、表面波を必要とする金属メッシュでは、吸収の大きな水溶液系の測定が困難である。一方、メタマテリアルはセル構造で共鳴が決まるため、将来的には細胞を金属マテリアル上にのせることで、テラヘルツ波の特徴（細胞内外の水和状態の変化・水分子やたんぱく質の直接励起による応答・細胞丸ごとの物質の相互作用）を活かした計測への応用が可能である。メタマテリアルのサンプルを Fig.9 に、このサンプルの基本特性を Fig.10 に示す。

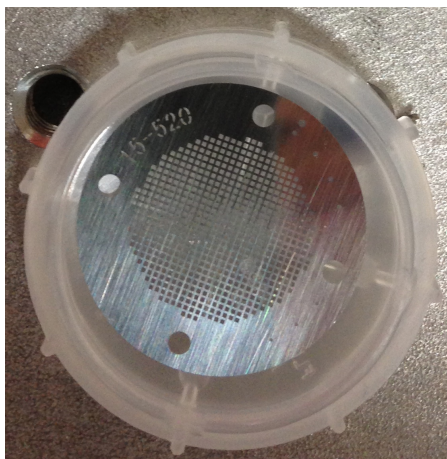


Fig.9 Metal material

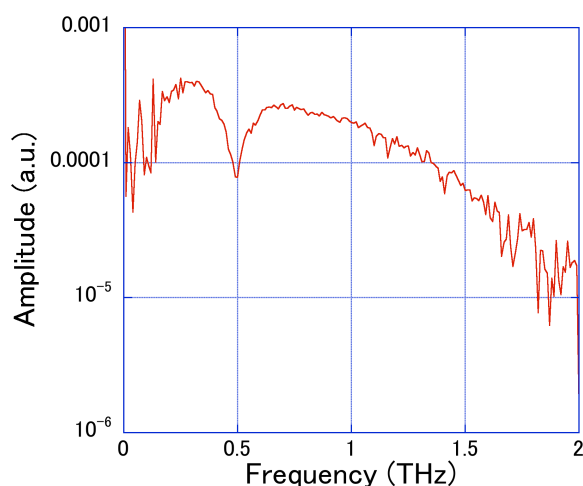


Fig.10 Amplitude of metal material

このメタマテリアルの上に水をたらし測定した結果を Fig.11 に示す。Fig.11 よりリファレンスと比べて水を垂らした場合、ディップの消失が確認できる。これは、水の消衰係数（エネルギーの吸収の強さ） k による影響であると考えられる。

次にメタノールを同様にたらし測定した結果を Fig.12 に示す。この計測では 2min ごとに計測を行い、時間変化を確認した。時間が立つ毎にスペクトルのディップが変化しているのが分かる。これはメタマテリアル上からエタノールが気化して徐々にしみ出し、屈折率が変化したためだと考えられる。

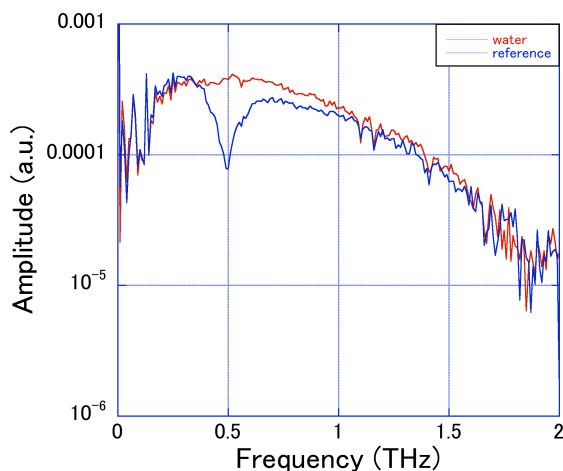


Fig.11 Amplitude spectrum of water vs reference on sample.

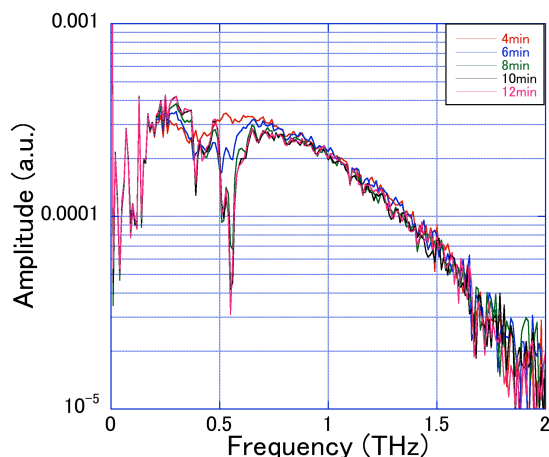


Fig.12 Amplitude spectrum of methanol on sample.

6. まとめ

今年度前期は阪大との共同研究で、大塚プロトタイプの評価を行った。まず、ガス分光でタイミングジッターの評価を行いその結果から、高い分解能を要求しない計測においては SFG も PG もジッターの影響は変わらないので、オールファイバー化も可能である。大塚プロトタイプの基本特性では、トリガーを PG と SFG にした場合の透過配置も反射配置もダイナミックレンジに変化はなかったため、ジッターの周波数軸のズレは見られない結果となった。この装置はファイバーレーザーから直接カップリングして THz パルスを発生させているので、通常の THz-TDS と比べ SN が悪い。従ってこの In-GaAs-PCA でジッターの影響を、ガス分光装置を構築し水蒸気の線幅を計測することで調べることが必要である。サンプル計測ではメタマテリアルの特性を活かしてエタノールを用いたが、計測時間が 2min と長いので、計測時間 30s・高分解能で計測できるサンプルを用いることで、さらにこの大塚プロトタイプの有用性を示すことができるだろう。

7. 今後の展望

今後は In-GaAs-PCA を用いたガス分光装置を構築し、水蒸気線幅を調べる。また、EO サンプルングで信号を捕まえて差周波制御やアダプティブサンプルングを行う予定である。

