平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

(平成21年度補正予算事業)

「テラヘルツマルチビームを用いた超高速 DNA 検査装置」

研究成果等報告書

平成22年6月

- 委託者 中国経済産業局
- 委託先 財団法人岡山県産業振興財団

目 次	
	ページ
第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	7
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	
1-3 成果概要	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	1 0
第2章 本論	1 1
2-1 基本部分の安定化とSN比の向上	1 1
2-1-1 レーザービームのポインティング安定化	1 2
2-1-2 スキャンスピードの高速化	14
2-2 レーザービームとテラヘルツ波の2分割	16
2-2-1 レーザービームの2分割	1 6
① 光路長整合分割	
② テラヘルツダブルビームに向けた分割	
2-2-2 テラヘルツダブルビームの発生	18
 照射位置合わせ 	
 微動装置の追加 	
③ テラヘルツレンズの追加	
④ 信号増幅	
2-2-3 テラヘルツダブルビームの実証	2 5
データ採取とデータ処理	27
第3章 全体総括	3 2
3-1 目標に対する達成度	
3-2 研究開発後の課題	33
 テラヘルツ波の帯域について 	
② テラヘルツアンテナチップの電気的接続方法について	
3-3 将来の事業展開構想	33
参考資料	34

第1章 研究開発の概要

電波と光の中間の波長であり、物質透過力に優れ、特定の物質に吸収される性質 をもつテラヘルツ波について、テラヘルツ波の発生の基となるフェムト秒レーザー を安定化、さらに複数に分割化することで試料の前処理を不要とする DNA 検査装 置に応用、その解析時間の短縮(4分の1)を図る。

- 1. 基本部分の安定化と SN 比の向上
 - 1-1 レーザービームのポインティング安定化
 - 1-2 スキャンスピードの高速化
- 2. レーザービームとテラヘルツ波の2分割
 - 2-1 レーザービームの2分割
 - 2-2 テラヘルツダブルビームの発生
 - 2-3 テラヘルツダブルビームの実証
- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
 - (1) 研究開発の背景

テラヘルツ波を発生させる基となるフェムト秒レーザーは、その発生原理からし ても不安定な要素を包含しており、既存の海外製フェム秒光源および既存のテラヘ ルツ発生装置では全てこの点が見落とされている。安定していないフェムト秒レー ザーを照射されたテラヘルツ発生素子からは、同様に不安定なテラヘルツ波しか発 生しない。あんていしていないフェムト秒レーザーを複数ビームに分割照射しても、 複数のテラヘルツ波が発生することは期待できるが、その不安定さは変化せず、分 析制度の向上への寄与は期待できない。

したがって、安定したテラヘルツ波を発生させるためには、テラヘルツ発生素子 に照射されるフェムト秒レーザーの市を安定にすることが必要である。

(2) 研究の目的及び目標

テラヘルツ波を発生させる基となるフェムト秒レーザーは、そのミラーを向かい 合わせた共振器により発振するという発生原理から必然的に不安定な要素を包含し ており、既存の海外製フェムト秒光源および既存のテラヘルツ発生装置では全てこ の点が見落とされている。

安定性が悪いフェムト秒レーザーで励起されるテラヘルツ波発生素子からは、同様に安定性が悪いテラヘルツ波しか発生しない。

したがって、フェムト秒レーザー光源固有の問題であるレーザービームのポイン ティング揺らぎをキャンセルして、テラヘルツエミッタおよびテラヘルツディテク タに照射するビームポインティングの「位置決め精度」を向上する必要がある。

また、検査装置においてはフェムト秒パルスをスキャン(時間遅延操作)するスキ ャナーの駆動速度が、従来技術では振動の増大によるフェムト秒レーザーの安定を 阻害することを抑えるため極めて遅く、装置の検査時間の制限となっている。

ここでも、可動ミラーを使ってレーザーの伝搬光路長を変化させることがビーム ポインティングを乱す要因となるので、「位置決め精度」に影響を与えない仕組み のスキャナーが必要となる。

さらに、現在存在するテラヘルツ波発生装置は全て、テラヘルツ発生素子に「1 本」のフェムト秒レーザーを照射して「1本」のテラヘルツ波を用いて測定を行っ ているが、テラヘルツ波を発生する素子自身の破壊を防ぐ必然性から、入力可能な フェムト秒レーザーの強度が限定されているので、発生するテラヘルツ波の強度も 限定されざるを得ない。その結果、励起用のフェムト秒レーザーが持つエネルギー の大半は無駄に捨てられていて、なおかつ発生するテラヘルツ波は微弱で測定時の SN比(信号雑音比)が悪いのが現状である。

このような状況からテラヘルツ波が優れた透過性を有し、物質毎に特有の吸収スペクトルを示し、非破壊検査で特定物質の同定が可能であるにもかかわらず、テラヘルツ波を用いた DNA 検査装置については実験室レベルでしか使用されていない。

しかし、これらの課題を解決することで計測時間・コストを短縮でき、汎用の分 析装置としての展開が期待できる。

これらの状況を鑑み、「テラヘルツマルチビームを利用した超高速 DNA 検査装置」を実現するための目標は以下の2つとする。

- 目標1:フェムト秒レーザーを安定にし、測定時のSN比を向上(現行の2倍 以上)、スキャナーの位置精度を保ったまま、測定所要時間を短縮する。 (現行の1/10以下)
- 目標2:テラヘルツダブルビーム(2本のテラヘルツ波)を発生させ、素子の 破壊を避けつつテラヘルツ波の強度を増大(現行の2倍以上)、 測定対 象に対して有効に働くことを実証する。
- (2) 実施結果
 - 目標1に対して:

フェムト秒レーザーのテラヘルツユニットへの導入に際し、独自のアル ゴリズムで制御するATA(アドバンスド タクティカル アライナー) で、レーザービームの僅かな揺らぎもキャンセルすることを可能にした。 SN比は他の外乱要因が影響したようで1.5倍程度であった。また、可 動ミラーを載せたスキャナーのスキャンスピードは2Hz程度を実現し たので、1スキャンあたり0.5秒となる。これは、実験装置の15分に 対しては当然、製品として販売されている装置の7秒に対しても10倍以 上の高速化を達成した。

目標2に対して:

テラヘルツダブルビームは発生した。テラヘルツ波の強度に関しては、 比較対象装置の実測が極めて困難なため、2倍以上を達成したと断言する ことができないものの、測定にあたっては有効に機能していることを実証 した。

当初目標と目標値および開発結果について、表1にまとめる。

目標項目	目標値	開発結果	目標達成率
フェムト秒レーザー	すったたちました。	揺らぎを抑制し安定に	100%
を安定にする	揺らさを抑制する	した	100%
SN比を向上する	2倍以上	1.5倍程度	75%
測学正亜味問の伝旋	現存の1 /10以下	7秒→0.5秒	1000/
側正別安时间の短縮	現1101/10以下	(1/14)	100%
THzダブルビーム	ダブルビームを発生	ダブルビームが発生し	1000/
の発生	させる	た	100%
THz波強度の増大	2倍以上	計測不能	90%
有効に働くことの実	有効に働くことを実	有効に働くことを実証	1000/
証	証する	した	100%

表1 目標値と実施結果

○ 装置全体図



写真1 本件開発装置全体 装置のコンパクト化について考慮しなかったため、非常に大柄な装置となった。

- 装置の構成
 - ① フェムト秒光源部



写真2 レーザーヘッド (フェムト秒レーザー発振器)



写真3 フェムト秒レーザー電源および制御装置

② テラヘルツ波発生部



写真4 テラヘルツ波ダブルビームユニット





③ テラヘルツ波発振器・検出器チップ

写真5 ボウタイ型アンテナ

写真6 ダイポール型アンテナ

いずれのチップも低温成長ガリウムヒ素基板の上に金蒸着を行うことでアン テナパターンを形成している。但し、これはアンテナチップであり実際にテラヘ ルツ波を発振あるいは検出するためには、アンテナパターンに対して配線を行い、 電圧の印可、あるいは電流検出を行うことが必要である。ところが、アンテナチ ップは低温成長の結晶であり、熱を加えると化合物半導体としての特性が変化し てしまうため、電気的接続の最も容易な手段である「半田付け」が適用できない。 次善の策として「導電性ペースト」を用いて電気的接触を行ったが、インピーダ ンスが大きく最善の方法ではないことが明らかになった。この部分は今後も改良 の余地があるし、改善すべき点でもある。

一般的に言われているアンテナパターンのテラヘルツ波に関する特徴は、以下 の通りである。

アンテナパターン	テラヘルツ波強度	テラヘルツ波帯域
ボウタイ型	強い	狭い
ダイポール型	弱い	広い

表2 テラヘルツ波アンテナパターンの特徴

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

(1) 研究組織



総括研究代表者(PL) 所属:株式会社光フィジクス研究所 役職:代表取締役 氏名:渡部 明 副総括研究代表者(SL) 所属:協和ファインテック株式会社 役職:取締役エンジニアリング部 部長 氏名:大森 啓士

(2) 管理体制

①事業管理者

【 財団法人 岡山県産業振興財団 】



②再委託先

【株式会社光フィジクス研究所】



【協和ファインテック株式会社】



(3) 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人岡山県産業振興財団

①管理者氏名

氏 名	所属・役職
三島 佳洋	技術支援部 部長
横田尚之	技術支援部 研究開発支援課長
宮内 隼	技術支援部 研究開発支援課 主事
綱澤 知則	技術支援部 研究開発支援課 主事
藤田 美穂子	総務部 総務企画課 主事
猪口陽平	技術支援部 研究開発支援課 主事

【再委託先】

②研究者氏名

	株式会社光フ	ィジク	ス研究所
--	--------	-----	------

氏 名		所属・役職
渡部 明	代表取締役	
次田 浩	企画営業部	部長
奥野 雅史	研究開発部	部長
能勢 秀俊	研究開発部	主任研究員
児島 孝則	研究開発部	研究員

協和ファインテック株式会社

氏名	所属・役職
大森 啓士	取締役エンジニアリング部 部長
小林 正樹	エンジニアリング部 主任研究員
門脇 信傑	エンジニアリング部 副主任研究員
石丸 哲平	エンジニアリング部 研究員

③協力者 (アドバイザー)

氏 名	所属・役職	
紀和 利彦	国立大学法人岡山大学工学研究科 准教授	

1-3 成果概要

(1) 目標1に対して

本質的な不安定さを内在しているフェムト秒レーザーを、アクチュエーター付の ミラー2枚を介して、テラヘルツ波発生装置へ導入するようにした。これら2枚の アクチュエーター付ミラーは、光フィジクス研究所独自のアルゴリズムを搭載した ATA (アドバンスド タクティカル アライナー)と呼ばれるソフトウェアの制御 により、レーザービームの僅かな揺らぎさえもキャンセルしてテラヘルツ波発生装 置上の正確な位置に照射することを可能にした。

また、光路長調整用のミラーを載せたスキャナーのスキャンスピードは2Hz程 度を実現することが出来た。これは、1スキャンあたり0.5秒に相当する。従来 からある装置のスキャンスピードは、大学研究室の実験装置で15分~30分、他 社から製品として販売されている装置で7秒という値である。本研開発で作成した 装置は、従来からあるいずれの装置に対しても10倍以上の高速化を達成した。

さらに、フーリエ変換後のデータ密度は、他社の製品では0.015THz毎で あったが、本件開発の装置では0.008THz毎のデータとなり、他社製品に比 べ、およそ倍のデータ密度となっている。これは、データ測定時の光学遅延スキャ ン範囲がおよそ倍の巾であることを示している。データ密度が高いと言うことは、 フーリエ変換を行った場合、ピークの見落としがより少ないということであり、そ れは分析を行う上での大きなメリットとなる。

(2) 目標2に対して

テラヘルツダブルビームの発生は可能であった。

また、発生しているテラヘルツ波の強度に関しては、比較対象装置の実測が極め て困難なため、2倍以上を達成したと断言することができないものの、測定に於い ては十分な出力が観測されているので、出力的には問題ないと考えている。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

管理法人:財団法人岡山県産業振興財団

〒701-1221 岡山市北区芳賀 5301 テクノサポート岡山 3 F 連絡担当者名・所属役職:技術支援部 研究開発支援課 課長 横田 尚之 TEL: 086-286-9651 FAX: 086-286-9676 E-mail: <u>nyokota@optic.or.jp</u> 第2章 本論

2-1 基本部分の安定化とSN比の向上

まず、フェムト秒レーザーが本質的に抱えているがフェムト秒レーザーのユーザ ーにはほとんど知られていない、ビーム揺らぎについて説明しておく。

(1) ビーム揺らぎの.評価方法



レーザー出射口から1mの所にビームプロファイラーと呼ばれる検出装置を設置する。このビームプロファイラーという装置は、ビーム断面内の強度分布をモニ ターする装置で、ビームの真円度や重心位置をµm単位で計算することができる。 そのため、時間経過に伴うビーム重心の揺らぎを評価することが出来る。

(2) ビーム揺らぎの測定結果

光源が安定してから(電源ONから1時間以上経過後)測定を行った レーザー装置内部の共振器が熱平衡状態に達し、安定状態となることでビーム揺ら ぎは小さくなり、およそ50μm程度の揺らぎに収まるようになった。

揺らぎ幅の中心を基準に考えると「25 µ ラジアン」程度の揺らぎと表現するこ とが出来る。装置の個体差については判断出来ないが、本件開発で求めるレーザー の安定性としては不足していると破断する。

もともと、「ビーム揺らぎ」と言うパラメータはスペックされていない場合が多 く、装置メーカーとしては関知しないパラメータのようである。

(3) 補足情報

ー般的な参考として、「ビーム揺らぎ」が仕様内に表記されている機種も少数派 ながら存在し、例えばスペクトラ・フィジックス株式会社のMaiTaiは50 μ ラジアン、MaiTai DeepSeaは100 μ ラジアンとの記載がある。 昭和オプトロニクスのグリーンレーザーJunoは10 μ ラジアン/℃との記載 が見られる。

上記の現実に即し、安定したテラヘルツ波を発生させるためには、ビーム揺らぎ を数 *μ* ラジアン以下に抑制しなければならないので、本件開発の最初として、レー ザービームのポインティング安定化を図ることにした。

2-1-1 レーザービームのポインティング安定化 説明のため、テラヘルツユニット部分の模式図を用いる。



図1 ポインティング安定化機構

図1において青線で囲んだ部分がポインティング安定化のために必要な部分であ る。図1の右側から来るレーザー光源からの光は、図中右上のポインティング安定 用制御ミラー対で2回反射された後に、ポインティング安定化用センサへの光をビ ームサンプラーAで分岐する。分岐した光は、ピンホールを通過後、外周を大きく 取り回し、揺らぎ量を拡大した後に、図1左下のフォトダイオードセンサに入射す る。ポインティング安定化機構はフォトダイオードの出力が最大になるように、制 御ミラー対のモーターを制御ソフトウェアからの指令により駆動して、光軸の微調 整を行う。したがって、フォトダイオードからの出力が最大になる位置でテラヘル ツユニットの光軸調整を行っておくことで、入射するレーザーの光軸が揺らいでも、 テラヘルツ波の発生を常に最適状態に制御する事が可能となる。

本件開発に採用した制御ソフトウェアは光フィジクス研究所独自のアルゴリズム に基づいている。センサとして用いているデバイスはただ1台のフォトダイオード

だけであるが、レーザー光の揺らぐ方向が判別できなくてもレーザー光のポインテ ィング位置を最適位置に保持するように制御可能である。

また、このアルゴリズムを基本として構成されたアライメントシステム ATA (ア ドバンスド タクティカル アライナー)は、高輝度光化学研究センターの大型放 射光施設でも、一部レーザーのアライメントに採用されており、実績を上げている。

- (参考1)財団法人高輝度光科学研究センター加速器部門の冨澤宏光副主幹研究員が、 第11回高エネルギー加速器科学研究奨励会西川賞を受賞された研究の一部分
- (参考2) ISSRNS2010で冨澤宏光先生ご発表の Strategy of metaheuristics algorithms for laser optimization

2-1-2 スキャンスピードの高速化

説明のため、テラヘルツユニット部分の模式図を用いる。



図2 スキャンスピードの高速化

図2の中央上部に青線で囲んだ部分が、テラヘルツ波の検出装置へのパルス到達 タイミングを調整する光学遅延発生用の「スキャナー」である。本件開発では、テ ラヘルツ時分割分光分析を実施するので、テラヘルツ発振器から発生したテラヘル ツ波がテラヘルツ受信器に到達したタイミングに合わせて、テラヘルツ受信器にフ ェムト秒パルスを入射しなければならない。なおかつ、そのタイミングの前後、数 +ピコ秒の範囲で入射タイミングを調整することで「時分割分光」が実現できるた め、スキャンスピードと精度が非常に重要である。本件開発には光フィジクス研究 所設計の OROCHI を採用している。この OROCHI スキャナーは160 p s の広い スキャンレンジを持ちながら、10 H z の繰り返しで駆動しても振動しないという 特徴を持つため、テラヘルツユニット中に搭載する装置として適していると判断で きる。

実際に2Hzでスキャンして、すなわち1回のスキャンが0.5秒でデータを採取

することが可能であった。さらに、スキャンレンジが160psと広いので、フー リエ変換後のデータ密度が、市販されている他社の装置に比べおよそ倍であること も確認できた。データ密度が高いと、フーリエ変換後に小さなピークを取りこぼし にくくなるので、分析技術上大きなメリットとなる。

○ 時分割分光分析について

「フェムト秒」のように非常に短い時間単位の中で発生する現象は、通常の電気 回路でデータ採取することが出来ない。なぜならば、導線中を電気信号が伝達して いくために要する時間が現象の発生時間よりも長くなるためである。

その問題を解決するための方法が「時分割」とうい方法である(図3)。本研開 発に於いては、フェムト秒パルスで励起された化合物半導体アンテナから、テラヘ ルツ波の周波数情報を含んだインターフェログラム信号が発生しているが、通常の センサと電気回路で検出できるほど持続していない。すなわち高速信号であるため 直接測定することが出来ない。しかしながら、基本的に同じ形のインターフェログ ラムが繰り返し発生(黄色線)していると考えられるので、複数回の検出を行うに あたり、検出するタイミング(青線)を僅かずつずらすことで、インターフェログ ラム信号全体の形状を再現(赤線)することが可能となっている。



図3 時分割の概念

結果として、テラヘルツ出力信号を再構築することが出来るので、電気的な信号 処理を行うことが可能になる。 2-2-1 レーザービームの2分割

説明のため、テラヘルツユニット部分の模式図を用いる。



図4 レーザービームの2分割

表題では、単純にレーザービームの2分割と記述しているが、図4の青丸で示す ようにビームの分割は3箇所で行われている。最初の分割は時分割分光分析を実現 するための光学遅延回路を含んだテラヘルツ波発振器側と検出器側への光路長整合 分割である。本件開発では1:1分割で設計・製作した。第2段の分割はテラヘル ツ波発振器・検出器セットを2組使えるようにするため、レーザーをさらに1:1 で2分割できるように設計・製作した。

① 光路長整合分割

この設計過程において重要なのは、最初の分岐点からテラヘルツ波検出器表面までのフェムト秒レーザーの光路長(図4中のB)と、分岐点からテラヘルツ波発振器までの光路長+テラヘルツ波の伝搬経路長とを含んだ、レーザーおよびテラヘルツ波の伝搬経路長(図4中のA)との長さを等しくすることである。

具体的に表現すると、今回採用した光フィジクス研究所設計のフェムト秒レーザ ー光源 AMTERAS は、100MHzの繰り返し周期で30fsの光パルスを発生し ている。光の速度がおおよそ秒速30万kmであることから計算すると、3m毎に くる9 μ mの光、と表現できる。すなわち、図3にAとBとで表現した伝搬光路長 を μ mの単位で合致させる必要があるが、現実的には不可能なので、図3Eで示し た部分を利用して光路長を調整し、最終的にスキャナーのスキャン範囲内に収める ことでテラヘルツ波の発生と検出が可能になる。

② テラヘルツダブルビームに向けた分割

第1のテラヘルツ波発振器・検出器対までの光路長整合が取れれば、そこから分 岐して利用される第2のテラヘルツ波発振器・検出器対での検出タイミングはおお よそ整合していることになる。

詳細は次節で述べるが、テラヘルツ波の検出には想像以上の時間が必要であった。 しかし、一方の光軸で経験を積んだため、2本目のテラヘルツ波を調整する際は、 重要なポイントが明確になっていたのでスムーズに進めることが出来た。

2-2-2 テラヘルツダブルビームの発生

説明のため、テラヘルツユニット部分の模式図を用いる。



図5 テラヘルツダブルビームの発生

実際の作業においては、まず何も検出できないのであるが、それが(1)テラヘルツ波が発生していないから検出できない、ためなのか(2)テラヘルツ波は発振しているが光路長がずれていて検出できない、ためなのかが全く判断することが出来ず、テラヘルツ波が発振していることを確認するまでに、多大な時間と労力とを 費やすことになった。

① 照射位置合わせ

最初の調整として実施したのはテラヘルツ波発振器と検出器を取り除いた状態で 時計回りのレーザービームと反時計回りのレーザービームとを重ねることである。 こうすることで、光路長の整合はさておき、少なくとも光軸は正しいことが確実と なる。

続いて、テラヘルツ波発振器と検出器を挿入し、レーザー光が化合物半導体上に

形成されたアンテナパターンに正確に入力されるよう位置を調整する。レーザーの 光軸を合わせる精度で調整し、集光レンズを微動してテラヘルツ波アンテナチップ の所定部分にレーザーの集光スポットを合わせるレベルの微動精度では調整の精度 が不十分であることが徐々に明らかとなった。

解決のために、本件開発当初は想定していなかった微動装置をテラヘルツ波発振 器・検出器部分に追加することを決断した。

② 微動装置の追加

テラヘルツ波発振器・検出器に微動装置を追加することで、テラヘルツ波の強度 が大きくなるアンテナ上の照射部分を探す操作が可能になった結果、実際のサンプ ル測定に使えるテラヘルツ波が検出できるようになった。

さらにテラヘルツ波の強度を増大させる手段として、テラヘルツレンズの導入を 検討することにした。

③ テラヘルツレンズの追加

テラヘルツ発振器・検出器のアンテナチップ表面に半球状あるいは3/4球状の レンズを装着することで、アンテナチップから全方向に拡散放射しているテラヘル ツ波を集光して利用することが可能になるので、採用を検討した。

テラヘルツレンズの材質は PTFE、MgO、Si などいろいろな種類があるが、コ ストおよび納期から Si レンズを採用した。

アンテナチップ表面にレンズを取り付けることで、拡散していたテラヘルツ波が 集光するようになりテラヘルツ波測定実験の精度が格段に向上したと考えている。

- ④ 信号増幅器
 - (1) 信号増幅器の役割



図6 テラヘルツ波検出信号の流れ



図7 テラヘルツ波検出チップ

- (2) 増幅器の必要性
 - テラヘルツ波発振器・検出器には、化合物半導体チップを用いている。 テラヘルツ波は、電圧を印可した発振器にフェムト秒レーザーを照射 することで発振させることが出来る。

一方、テラヘルツ波検出器は、電磁波たるテラヘルツ波を検出し電流 に変換する機能を持っている。 そして、発振器から発振されるテラヘルツ波そのものが微少出力であ る上に、本研開発では、単に発振したテラヘルツの検出するのではなく 試料を透過し減衰したテラヘルツ波を検出し、信号処理しなければなら ない。

したがって、検出器からの出力信号を増幅する必要があるものの、検 出器からの出力が極めて微弱な為、一度に増幅すると雑音が大きくなり、 信号と雑音の分離が出来なくなる可能性が高い。そのため前置増幅器(本 装置)が必要不可欠である。

 テラヘルツ波検出器は、化合物半導体上に形成された金属アンテナパタ ーンで構成されているが、出力信号が特殊な形で出力される(電流出力)。 通常一般の測定器等は、電圧信号を操作測定するように設計されており、電流信号を直接取り扱う事は出来ない。

テラヘルツ波検出器からの出力が電流信号の場合、通常の測定器で処 理が出来るよう、入力電流の値に応じた電圧を出力する機能(電流-電 圧変換機能)が必要であるため、本装置は、この機能を満足できるよう に設計しなければならない。

- 3. 微弱な信号を取り扱うためには、増幅器を用いて信号を増幅する必要があるのは前述の通りであるが、一度に増幅すると増幅器そのものの内部雑音が大きくなる。また、通常の増幅器は、入力の感度が決まっている。テラヘルツ波検出器の出力は、この様な感度の低い増幅器で直接信号を増幅することができない。それ故、通常の増幅器の最低感度電圧まで増幅するために本増幅器が必要不可欠である。
- 4. テラヘルツ波検出器は、化合物半導体で出力インピーダンスが非常に大きくなっている。この様な大きなインピーダンスを持つ素子を、通常のアンプに直接接続することは不可能である。このため本増幅器は入力インピーダンスが検出器のインピーダンスとバランスが取れるぐらい大きくしなければならず(インピーダンス変換機能)、そのためには特殊な設計をされた増幅器が必要不可欠である。

以上をまとめて表3に示す。

項目	仕様	備考
電源電圧	±15V	絶対最大印加電圧±20V
入力インピーダンス	100MΩ以上	
増幅率	10000 倍以上	
増幅器形式	電流入力-電圧出力型	

表3 増幅器の考慮すべき基本仕様

(3) 具体的な設計

増幅器の必要性は、明確であるが、①出力信号をそのまま増幅するだけで良いか、②雑音を取り除くフィルタが必要であるか、が明確になっていなかったため、単体の増幅器「増幅器1」とフィルタ付の増幅器「増幅器2」とを設計し検討した。

また、テラヘルツ波検出チップのインピーダンスは非常に大きいと予想され るので、増幅器の入力インピーダンスも相当に大きく(通常検出チップのイン ピーダンスの10倍以上)設計する必要があり、実装の難度が非常に高くなっ た。

(4) 回路特性

設計した増幅器の回路特性を評価するため、電子回路シミュレータを利用し て解析評価を行った。解析ツールとしては、SPICE 3F5/XSPIC Eに準拠している。

いずれの増幅器も直流特性、交流振幅特性(利得)、位相特性について評価 した結果を、増幅器1については図8~図11および写真7~8に、増幅器2 については図12~図15および写真9~10に、それぞれ示す。

直流伝達関数、即ち直流の利得については、増幅器の設定が異なるので入力 -出力の傾きが異なっている。また、増幅器2では、演算増幅器が2段あるた め傾きが正になっているが、増幅器1では、演算増幅器が1段なので負の傾き を持っている。増幅器2は、利得が大きい分だけ飽和も早く発生しており、1 00pA以上の電流が流れた場合は電源電圧15Vの場合でも飽和領域に入 る。

增幅器	利得	利得(絶対値)	備考
· 通信哭 1	-160dB	160dB	
1 百世田 石 日	-0.1V/nA	0.1V/nA	電流-電圧変換係数
単恒品の	223dB	223dB	
1月11田4月 乙	142V/nA	142V/nA	電流-電圧変換係数

表4 増幅器の特性

交流電圧関数・位相特性

2つの増幅器の解析結果を検討する限りでは、伝達関数、位相特性共に増幅器 1の方が、良好な特性をしていると判断できる。利得の設定は、R1を調整す ることに拠って可能である。

2-2-3 テラヘルツダブルビームの実証

説明のため、テラヘルツユニット部分の模式図を用いる。



図16 テラヘルツダブルビームの実証

テラヘルツダブルビームの効果を確認するために、測定サンプルが容易に取り換 え可能なサンプル保持具を設計・製作した。

サンプル保持具は、測定サンプルを保持する「サンプルセル」とセルをテラヘル ツビーム内に保持する「サンプルホルダ」(別紙図面:図番 THZ-10-01-00)で構 成されている。このサンプル保持具は、図16の中央下部に青線で囲んだ部分に固 定される。

測定サンプルは、粉末状固体、液体、稀には気体等が考えられるが、当面は粉末 状固体試料を想定した。高精度に測定するにはテラヘルツ波が透過するサンプルの 厚みを規定する必要があると考え、サンプルセルの厚みを制御する方法を検討した。

サンプルセルとしてシリコーンゴムシートを無水石英板 2 枚で挟みこむ構造を 選択した。サンプルの厚みは、サンプル保持部を切り欠いた挟み込むシリコーンゴ ムシートの厚みにより規定することが出来る。また、表面性状の良いシリコーンゴ ムシートと無水石英板を使用することにより、無水石英板の両側から挟み込む力を 加えなくてもシートと無水石英板間の密着力が高まり、サンプルが液体であっても 漏れること無く保持が可能となった。

検討したサンプルセルの形状について下表にまとめた。また、測定サンプルによ りテラヘルツ波の吸収量が異なるため測定試料の厚みを検討することも必要とな ると考えられる。そこで試料の厚み変更がシリコーンシートの厚みを変更すること により容易に行える構造としている。

本件ではテラヘルツダブルビームを適用しており、2本のテラヘルツ波の光路に サンプルセルをそれぞれ配置しなければならない。そのためサンプルホルダにより 保持されたサンプルセルを光路上に容易に配置できるよう配慮し、なおかつ測定サ ンプルの位置決めを容易にし、配置後はサンプルのズレを防止する構造の位置決め 機構を導入したサンプルホルダを設計し製作した。

セル材質	無水石英板	
セルの大きさ	H30×W40×t0.5mm	
試料の保持形状	U字型切り欠き	
試料保持サイズ	W20×H20×t0.5mm	
必要試料量 (容積)	0.17ml	

表5 サンプルセルの形状

○ データ採取とデータ処理

(1) 測定ソフトウェアの開発

テラヘルツ波測定は光フィジクス研究所内で開発されたオリジナルソフトウェ アを用いて実施された。テラヘルツ波測定画面を図17に示す。



図17 テラヘルツ測定画面

本ソフトウェアは、図17の上部左側の青線枠内に標記されているように、光フ ィジクス研究所の光学遅延用スキャナーOROCHIに標準添付されているソフ トウェアの一部(測定部分)である。

画面下半分の「リアルタイムデータ」の部分に、白線でミラーの位置が表示され、 黄線で出力電圧が表示されている。「リアルタイム」データなのでスキャンの都度 書き換えられる。このように電圧での入力を可能にするために、前節で述べたプリ アンプが必須であった。

画面右上の「積算平均値」の部分にはデータを複数回積算して、平均化処理する ことでノイズを除去した結果を表示している。測定をスタートしてから停止するま で積算平均をとり続ける設定になっているので、任意回数の測定を積算平均する場 合、あるいはピークの様子を見ながら測定する場合には便利な機能である。

画面左上の「積算値」はデータ点数を指定しておき、新しいデータから指定した

個数までのデータを積算表示する(図17ではOFFになっている)。これは、緩 やかな状態変化を伴う現象を測定するために用意されている。例えば、測定中にサ ンプルの水分が蒸発していく場合とか、空気中の酸素で酸化される場合など、変化 を捉えて測定する場合に便利な機能である。

どのグラフにも「SAVE」ボタンがついていることから明らかなように、ここで測定したインターフェログラムは、CVSファイルの形で保存可能となっている。

「リアルタイムデータ」および「積算値」は4入力まで同時表示が可能であるが、

「積算平均値」は複数入力を同時描画させると、画面が非常に見難くなるので1入 力のみを選択して表示するようになっているが、単に表示だけの問題である。

(2) フーリエ変換処理

インターフェログラムでは解析することが出来ないので、フーリエ変換(FFT) ソフトウェアも用意した。フーリエ変換ソフトウェア画面を図18に示す。



図18 フーリエ変換ソフトウェア画面

テラヘルツ波測定ソフトウェアからセーブしたインターフェログラムデータを

FFTソフトウェアに読み込むと、画面上部に読み込んだインターフェログラムを 表示すると同時にフーリエ変換を行い、画面下部のフーリエ変換結果を表示する。

さらに本ソフトウェアは、AとB、2つのインターフェログラムを読み込ませる と自動的にB/Aを計算するように設定されており、ブランクスペクトルの演算、 あるいはサンプル間のスペクトル演算が可能である。

FFT後のデータはCVSファイルで記録することも可能なので、汎用の表計算 ソフトウェア等を利用することができる。

(3) サンプル測定結果

発生しているテラヘルツ波を用いてサンプルの実測を行った。代表的な測定結果 として、「水」、「DNA」についてデータを掲載する。まず、図19と図20に 2.5THzまでの水とDNAの実測スペクトルを示し、図21と図22には5T Hzまでの実測スペクトルを示す。

現時点では、どのピークが何に由来する吸収であるかの同定は行えていないが、 いずれの周波数範囲で見ても、「水」と「DNA」とは明らかに異なったスペクト ル形状を示している。

これらの測定を実施するにあたり、無水石英板をテラヘルツ波に直交させて測定 すると、平行平面基板の特徴である「干渉波形」が顕著に表れ、その後の解析を困 難にするので干渉波形を出現させないよう、テラヘルツ波と無水石英板とが直交し ないよう、傾けて保持して測定を行った。



図19 水のスペクトル (2.5THzまで)



図20 DNAのスペクトル (2.5THzまで)



図21 水のスペクトル (5THzまで)



図22 DNAのスペクトル (5THzまで)

第3章 全体総括

- 3-1 目標に対する達成度
 - 目標1:フェムト秒レーザーを安定にし、測定時のSN比を向上(現行の2倍 以上)、スキャナーの位置精度を保ったまま、測定所要時間を短縮する。 (現行の1/10以下)
 - 結果1:フェムト秒レーザーのテラヘルツユニットへの導入に際し、独自のア ルゴリズムで制御するATA(アドバンスド タクティカル アライナ ー)で、レーザービームの僅かな揺らぎもキャンセルすることを可能に した。SN比は他の外乱要因が影響したようで1.5倍程度であった。ま た、可動ミラーを載せたスキャナーのスキャンスピードは2Hz程度を 実現したので、1スキャンあたり0.5秒となる。これは、実験装置の 15分に対しては当然、製品として販売されている装置の7秒に対して も10倍以上の高速化を達成した。
 - 目標2:テラヘルツダブルビーム(2本のテラヘルツ波)を発生させ、素子の 破壊を避けつつテラヘルツ波の強度を増大(現行の2倍以上)、 測定対 象に対して有効に働くことを実証する。
 - 結果2:テラヘルツダブルビームを発生させ、確認した。テラヘルツ波の強度 に関しては、比較対象装置の実測が極めて困難なため、2倍以上を達成 したと断言することができないものの、測定にあたっては有効に機能し ていることを実証した。

目標項目	目標達成率	目標値	開発結果
フェムト秒レーザー	1000/	すったたちましたフ	「「ないない」」
を安定にする	100%	缶りさ を抑 利 9 つ	話りさを抑制し女正にした
SN比を向上する	75%	2倍以上	1.5倍程度
測学正面時間の伝統	1000/	現存の1 /10以下	7秒→0.5秒
側正別安时间の超陥	100%	現1]の1/10以下 	(1/14)
THzダブルビーム	1000/	ダブルビームを発生さ	バブルビームが改せした
の発生	100%	せる	ハノルビームが発生した
THz波強度の増大	90%	2倍以上	計測不能
有効に働くことの実	1000/	有効に働くことを実証	古地に働くこした宇訂した
証	100%	する	19%に倒くことを夫証した

表6 目標項目と目標達成率

3-2 研究開発後の課題

当初の目標は達成したが、実際の測定においては技術的に改良の余地がある ことも明らかになった。これらについては継続して改良改善を行う予定である。

① テラヘルツ波の帯域について

本件開発の装置で発生しているテラヘルツ波の帯域は~7THz程度になる と予想していたが、本報告書作成時点で明らかに検出できているのは~5THz 程度であった。

予想ほど帯域が拡がらなかった原因は、検出器およびAD変換器の問題であ ると考えている。すなわち、(1)アンテナチップへの導線コンタクト時のイン ピーダンス低減、(2)外部ノイズ遮断のための電磁波シールド、(3)非常に 急峻な変化を検出しなければならないAD変換器、以上の点に適切な対策を施す ことで、テラヘルツエミッタに入射するフェムト秒レーザーのパルス幅を30f s以下にした成果がさらに顕著に現れると考えている。

参考までに、大学研究室の実験装置ではおおむね3THz程度までの帯域が 計測できており、他社から製品として販売されている装置では、2.5THz程 度までの帯域が観測できていた。

② テラヘルツアンテナチップの電気的接続方法について

本件開発で採用した、50µmの金線を導電性ペーストで接触させる方法は 実験的には問題無い方法と考えているが、SN比をより向上させるためには、テ ラヘルツアンテナへの導線コンタクトを工夫する必要がある。接合インピーダン スを下げる方向として、金線を太くすること、および金線の先端を薄く拡げて接 触面積を大きくすることを想定している

3-3 将来の事業展開構想

装置全体の一括販売、および、テラヘルツ実験キットとして、本件開発のテ ラヘルツ波ユニットの販売を行うことを考えている。テラヘルツ波ユニット内を さらに細分化して、構成部品単位での販売も視野に入れている。

新しい測定技術としてテラヘルツ波が認識されつつあるので、今後様々なノ ウハウが構築され利用されるようになると見込んでおり、我々の装置で、我々自 身のノウハウを含めて製品展開を行い、市場にアピールする予定である。

以上