

< 2 > 新規産業開発研究

< 2 - a > 先導的探索 / 実証研究

サブテーマリーダー：光産業創成大学院大学 教授 土屋裕

(代理：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 青島紳一郎)

小テーマ： THz波応用

研究従事者：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究員 青島紳一郎、黒柳和良、河田陽一、高橋宏典

(1) 研究の概要、新規性及び目標

研究の概要

[フェーズI]

平成14年度のみ研究を実施し、テーマ<1-2-b>で開発した非線形有機光学結晶等を用いてTHz分光イメージングの光学系を構築し、生体サンプル等の遠赤外イメージング計測等の探索研究をおこなった。浜松医科大学との交流会を通してのニーズ調査をおこないながら有効な応用分野を探索した。

[フェーズII]

フェーズ I の成果を踏まえ、THz波を応用した計測と、応用計測の際の問題点解決に主眼をおいた研究をおこない、放射されるTHz波の高輝度化、イメージング計測、全有機THz波計測システムの検討等をおこなった。

研究の独自性・新規性

効率を向上して高強度THz波を発生し、これを利用するための基盤技術開発の研究をおこなった。本事業の成果であり、他に先駆けて実現した小型・高効率・高耐光強度 フェムト秒波形整形器を利用するとともに、オリジナルのアイデアである適応型光パルス反応制御 (RECAPS) を適用する独自の研究を実施した。結果として、発生THz波の高周波成分の増強に成功するという新規な成果が得られた。また、共同研究チームが世界にさきがけて作製したBNA結晶を利用して、「超高密度フォトン利用実証レーザーシステム」の実例としての「全有機結晶テラヘルツ波発生・計測」(プレス発表実施)を実現し、この系が高周波成分の検出に有効であるという新規な知見が得られた。

研究の目標

[フェーズI] (平成14年度のみ)

THz波を用いた骨などの生体部位の分光イメージング計測で最適なTHz波の波長を明らかにする。また、イメージング計測における種々の方式(測定点をスキャンする方式や、2次元イメージを一度に取り込む方式等)を検討して、有効な方式を明らかにする。

[フェーズII]

テーマ<1-2>の成果を踏まえ、新規産業創出の可能性の実証を目指し、大出力のTHz波を用いた工業材料や部品などの非破壊検査のためのTHz波イメージングの研究、有機材料からの高輝度THz波発生、THz波の高周波成分の放射・検出に関する検討をおこなう。また、本事業で得られた成果を整理・統合して、新規産業創成の基盤を整備する。

(2) 研究の進め方及び進捗状況

[フェーズI]

平成14年度のみ研究を実施した。テーマ<1-2-b>の研究成果を適用し、生体由来の物質に対するTHz領域での透過、吸収を計測し、イメージング計測に適したTHz波の波長を明らかにした。また、THz波による透過イメージング計測では、測定点をスキャンする方式によりイメージングをおこない、良好な結果を得た。さらに、計測時間を短縮するため、2次元イメージを一度に取り

込むための光学系を検討した。

[フェーズII]

平成15年度は、テーマ<1-2>超高密度フォトン反応制御技術の「THz波のための計測・制御」と平行して研究を推進した。平成16年度以降は、テーマ<1-2>の成果を引継いで研究を実施した。反射波を用いたスペクトル計測やイメージングをおこない良好な結果を得た。

産業応用の観点から、透過型の測定系では、被測定物に対する制約が大きいため、反射型の測定系を構築し、各種試料の反射スペクトルの計測、ならびに、反射によるイメージング計測の検討をおこない良好な結果を得た。また、コンクリートの計測について、厚い試料の透過計測や透過スペクトルの測定により、THz波を応用できる厚さや適用すべき周波数に関する基礎データを取得した。評価の際に用いた、THz波による屈折率、吸収係数の評価方法は、コンクリートに限らず他の様々な物質の評価に応用できるため、各種材料の特徴付けに対して有効であることを明らかにした。

THz波を用いた計測の高解像度化や、THz波域における吸収スペクトルの評価では、高周波までのTHz波の計測ができることが望ましい。そこで、THz波の高周波までの発生・検出と高周波までの分光計測をおこなった。一連の計測において、本事業において着目した有機非線形光学結晶であるBNA結晶は、一般に用いられるZnTe結晶に比べて、同じ厚さであっても、高輝度で、高周波までのTHz波を発生できることを明らかにした。また、結晶そのものに着目した研究のみでなく、波形整形により高周波成分をより多く放射させる方法についても検討し、フィードバック制御をかけることで、4 THz付近で50%程度のTHz波放射強度の増強ができた。

平成17年度には、本事業で得られた成果を整理・統合して、新規産業創成の基盤を整備するため、BNA結晶等を用いて、THz波の発生と検出を有機結晶でおこなう全有機THz波計測システムを構築した。有機結晶の原材料は安価であり、全有機THz波計測システムはTHz波計測の実用化の促進につながるものと期待される。測定できるTHz波の周波数は一般に厚い結晶を用いると高周波成分を検出するのが困難になるが、本事業により、BNA結晶では、4~6 THzの周波数でZnTe結晶よりも大きな出力が得られ、BNA結晶が高周波成分の検出に有効であることが明らかになった。これにより、全有機THz波計測システムを実現するとともに、高周波成分の検出に有効であることを確認できた。高輝度THz波放射の可能なBNA結晶を用いて、THz波の検出まで可能にし、予定以上の達成度であった。この系は、実証レーザーシステムと位置付けることができ、THz波計測の実用化促進につながる成果を得た。

以上より、本事業における目標の達成度は 120 %である。

(3) 主な成果
[フェーズI]

生体由来物質の計測

計画に従い、<1-2-b>波長域拡大技術の開発の成果をふまえて、平成14年度の途中から本テーマに着手した。

THz波の医療応用の実験を開始し、生体部位の分光イメージング計測で最適なTHz波の波長を明らかにするために、生体由来物質のTHz波透過計測をおこなった。

THz波を用いたイメージングは緒についたばかりであり、その有効性を考慮しながら応用分野が模索されている段階である。イメージングをする上で、物質毎に有効な波長域を特定しておく必要がある。そこで、生体由来の物質に対するTHz領域での透過、吸収を計測し、イメージング計測に適したTHz波の波長を明らかにすることを試みた。

実験に用いた測定系の概念図を図1に示す。測定に用いた光源は、モード同期レーザーである。測定系に入射された光は、ビームスプリッターにより2つに分岐される。ビームスプリッターを透過した光は、チョッパーにより変調され、エミッター素子に導かれる。エミッター素子として厚さ1 mmのZnTe(110)結晶を用いた。エミッター素子から放射されたTHz電磁波は、1対のSi超半球レンズと放物面鏡によりレーザー素子に集光される。一方、ビームスプリッターで反射された光は、レーザー素子に導かれる。レーザー素子として、ギャップ長10 μmのフォトコンダクティブアンテナとした。サンプルは放物面鏡間におき、透過特性を計測した。

サンプルとして、人の爪、皮革(牛革)、蝉の羽、セラミックを用いた。セラミックは実際の骨の代用として選択した。

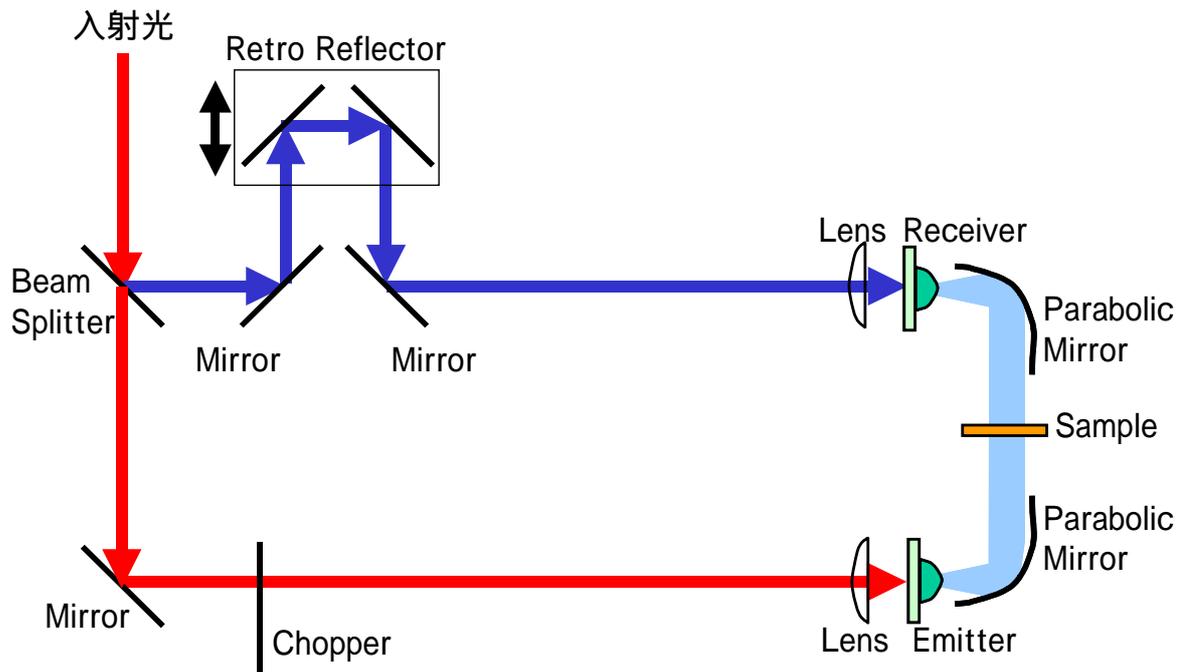


図1 THz波透過スペクトル測定系

測定結果は、サンプルを透過した信号のスペクトルを、サンプルのない状態で計測したスペクトルにより除算を施した透過率による評価とした。結果を図2に示す。人の爪、皮革(牛革)、セラミックでは、低周波側で透過率が高く、高周波側は透過しないことがわかる。蝉の羽については、低周波側で透過しにくいのに対し、高周波側の透過率はほぼ100%であった(測定時の誤差により一部100%を越えている部分が存在する)。これらのことから、皮や骨の計測では、1.0 THz以下が透過しやすく、イメージングに適することがわかった。

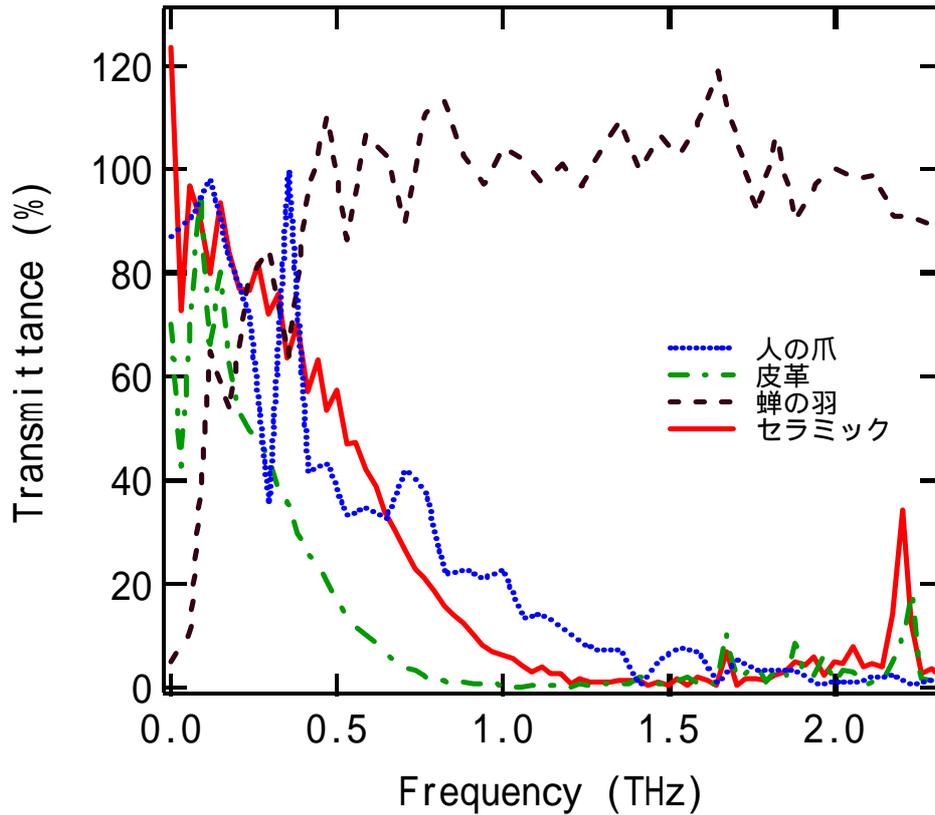


図2 生体由来物質のTHz波の透過率

コンクリートの透過イメージング

THz波を用いたイメージングは、緒についたばかりであり、その有効性を考慮しながら応用分野が模索されている段階である。イメージング計測では、測定点をスキャンする方式によるイメージングをおこなった。この方法では、試料の広い範囲をスキャンすることが可能である。

厚さ1 mmと4 mmのコンクリートのTHz波透過イメージングをおこなった。測定したコンクリートの写真を図3に示した。測定したコンクリートには、裏側に部分的にアルミ箔が貼り付けられおり、この領域では、THz波の透過率が低い。THz波による透過測定の結果を図4(a)(b)に示した。図4(a)は、厚さ1 mmのコンクリートに対する測定結果、図4(b)は厚さ4 mmのコンクリートに対する測定結果である。測定は、厚さ1 mmのものについては、50 mm×10 mmの範囲を、厚さ4 mmのものについては、40 mm×10 mmの範囲をそれぞれ、X軸方向は0.5 mmステップ、Y軸方向は2 mmステップでスキャンした。アルミ箔のある部分で信号強度が低くなっており、アルミ箔の有無が判別できる。厚さ4 mmのコンクリートに対する測定結果は、厚さ1 mmに対する測定結果に比べてボケている。これは、コンクリートが厚いためにTHz波に対する散乱が大きいためであると考えられる。

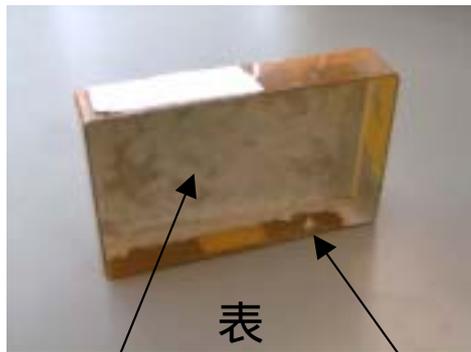


表
名刺ケース
コンクリート

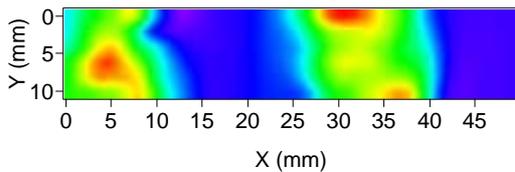
(a)



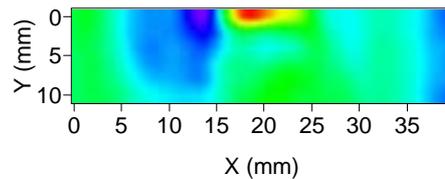
裏
アルミ箔

(b)

図3 計測に用いたコンクリート



(a)



(b)

図4 コンクリートのTHz波透過イメージング
(a) 厚さ1 mm。(b) 厚さ4 mm。背面にアルミのある部分の透過率が低くなっている。

レーザー励起パルスX線の医療応用技術開発

浜松医科大学との交流会を開催し、直接医療に係わる臨床医を含む多く関係者との意見交流をおこなった。本事業で取り上げている研究テーマを説明して話題提供し、最新の医療現場におけるレーザー応用機器の状況等を議論した。不可視光であるTHz波に関しては、被爆等の無い安全な光源として医用イメージングの観点から興味があることが示された。

[フェーズII]

コンクリートの反射スペクトル計測

コンクリートの透過イメージングにおいて、透過型のイメージングを実現することに成功した。しかし、透過型の測定系では、被測定物に対する制約が大きいため、産業応用の観点からは、反射型の計測が望まれる。そこで、新たに反射型の計測系を作製し、THz波計測をおこなった。反射型の測定系の概略図を図5に示す。従来の透過型の測定系の放物面鏡間にTHz波を反射するための鏡を挿入した構成とした。今回は、リファレンスとなる鏡での反射スペクトルを計測した。鏡の部分を試料に置き換えることにより、各種試料の反射計測が可能になる。

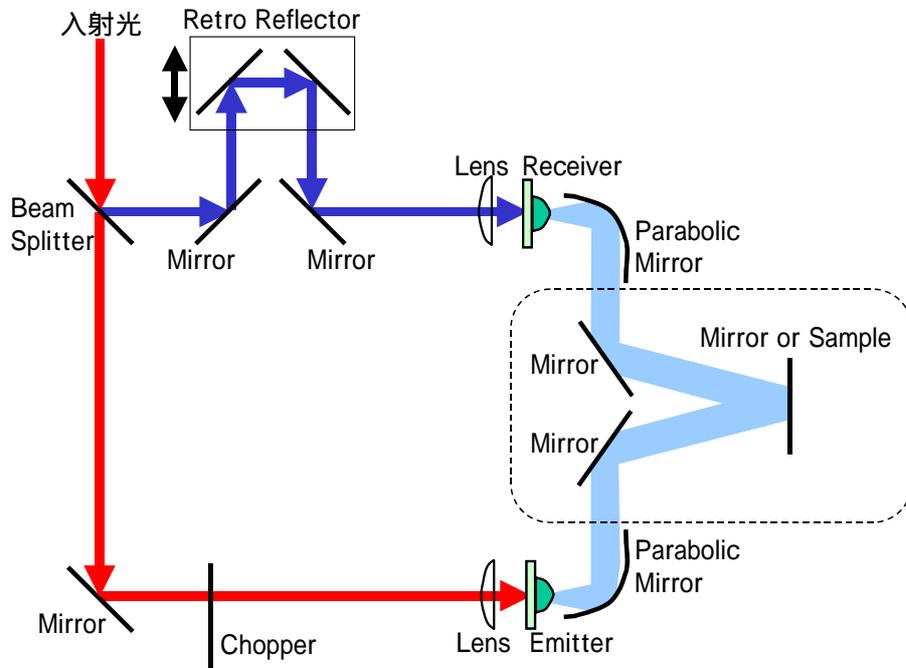


図5 反射型THz波測定系

測定により得られた時間波形を図6(a)に、時間波形を高速フーリエ変換して得られた周波数スペクトルを図6(b)に示した。THz波の放射、検出に用いるアンテナ素子に、低周波のみに感度を有する素子を用いたため、100 GHz以下の非常に低い周波数成分が得られている。今後、各種試料の反射スペクトルの計測、ならびに、反射によるイメージング計測の検討をおこなう予定である。

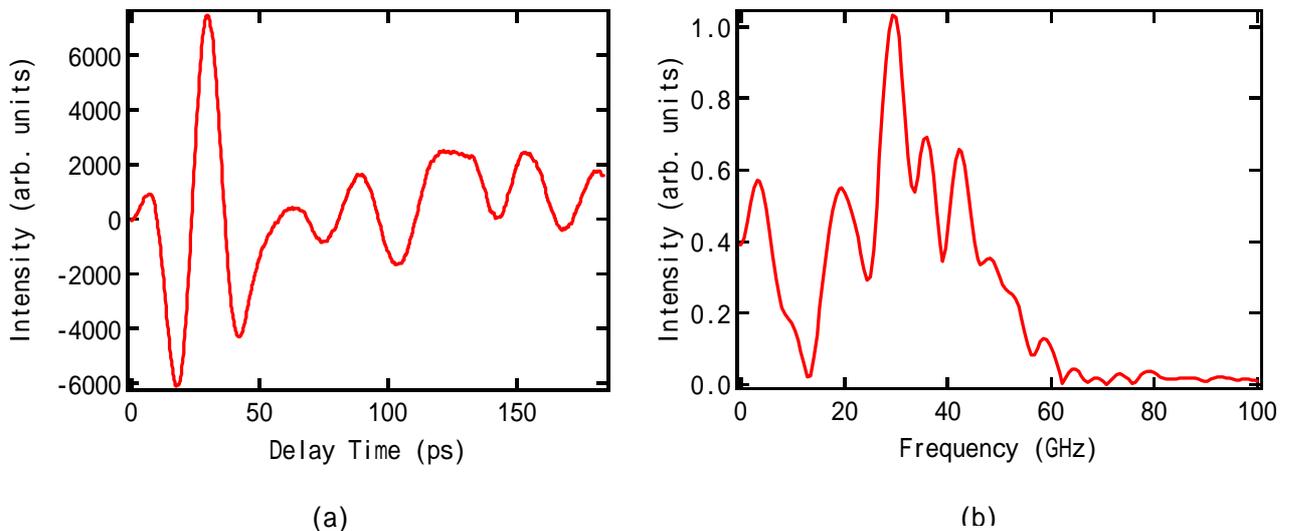


図6 測定により得られた時間波形と周波数スペクトル
(a) 時間波形。(b) 周波数スペクトル

コンクリートの反射イメージング

コンクリートの反射スペクトル計測において、反射型の計測系を作製し、THz波計測をおこなった。本項目では、この測定系の試料ホルダー部分をX-Zステージによりスキャンすることにより、イメージング計測をおこなった結果について報告する。試料は、図7に示すような、厚さ2 mmのコンクリートである。コンクリート背後に隠された金属を検出することを想定し、裏側に幅1 cmのアルミ箔を貼った試料を用意した。今回の計測では、このアルミ箔を貼った状態と何も無い状態の両方を計測し、その差分をとることで反射イメージとした。反射型イメージング計測は、被測定物の内部にある金属による反射波の信号強度が他の領域と異なることを利用したものである。我々の測定方法で計測される信号は、光強度としてではなく、電界強度として計測されるため、金属による反射により強度が低下して観測されることもある。



図7 測定に用いた試料
厚さ2 mmのコンクリート。中央付近は、アルミ箔。

測定により得られたイメージを図8に示した。アルミ箔のある部分で反射波が弱くなっており、コンクリート裏側にある金属をイメージングすることができた。

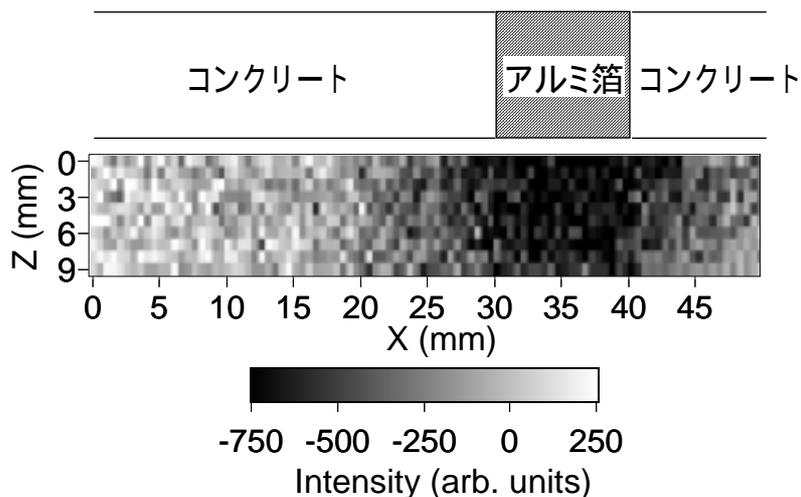


図8 測定により得られたイメージ

厚いコンクリートの THz 波透過特性

コンクリートの反射イメージングにおいて、反射型のイメージングを実現することに成功した。産業応用の観点からは、より厚い試料の計測が望まれる。どの程度の厚さまで計測可能なかを評価するためには、測定系を透過型として試料を評価するのが良い。そこで、本項目では、透過型の計測系において、THz波の放射・検出に用いるアンテナ素子を低周波のみに感度を有する素子とし、計測周波数を下げることによって、より厚いコンクリートの計測を試みた結果について報告する。従来、透過型の測定系で計測できていたコンクリートの厚さは1 cm程度までであったが、今回、計測に用いた試料の厚さは5 cmである。

測定により得られた時間波形を図9(a)に、時間波形をフーリエ変換して得られた周波数スペクトルを図9(b)に示した。図中では、リファレンスとなるコンクリートを透過させない状態の波形を赤で、厚さ5 cmのコンクリートを透過させた後の波形を青で示した。THz波の放射、検出に用いるアンテナ素子に、低周波のみに感度を有する素子を用いたため、リファレンスのスペクトルは、35 GHz付近にピークを持つ、非常に低い周波数となっている。図中に青で示したコンクリート透過後の時間波形でも、明確なピークを観測することができ、厚さ5 cm程度のコンクリートが計測可能であることを示すことができた。今後は、これまで反射型測定系で測定できた2 mm程度よりもさらに厚い試料での反射型イメージング測定への応用が期待できる。

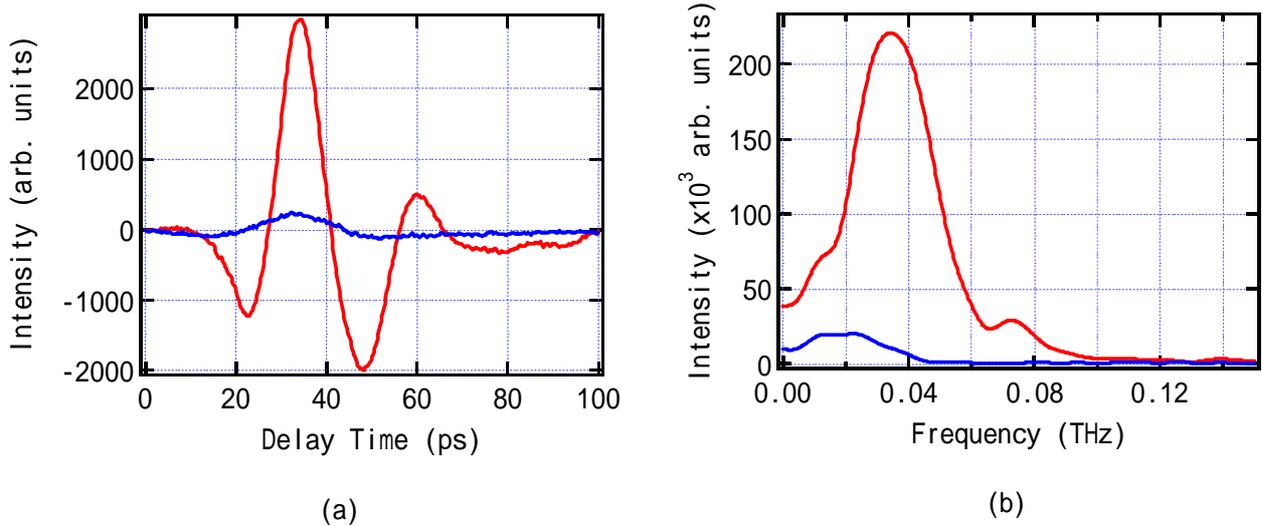


図9 測定により得られた時間波形と周波数スペクトル
(a) 時間波形。(b)周波数スペクトル。いずれも、赤がリファレンス、青がコンクリート透過後の波形

コンクリートのTHz波透過スペクトル計測

物質の組成や変性などの光学的な評価では、屈折率と吸収係数が重要になる。これは、屈折率と吸収係数が物理量であり、同一の物質について一度計測すれば、同じ値が使えるためである。また、これらの値は、複素誘電率とも相関があり、計算により複素誘電率へ変換することも可能である。吸収係数がわかっているならば、検出しなければならない光がどの程度まで減衰するかをあらかじめ見積もることができる。これは、透過イメージングだけでなく、反射イメージングにおいても、どの程度の深さまでの情報が得られるのかを見積もるといふ点から非常に重要な情報である。

コンクリートの透過計測により得られたスペクトルから、屈折率と吸収係数を評価した。屈折率、吸収係数を求めるためには、試料の厚さが必要であるため、この計測は透過型とした。試料は、反射型イメージングに用いたコンクリートを切り出したのと同じのコンクリート塊から切り出したものである。評価結果の再現性をみるため、厚さの異なる5個の試料を用意した。それぞれの厚さは、0.55 mm、1.05 mm、2.10 mm、5.05 mm、10.1 mm である。屈折率の実部と吸収係数を計算した結果の内、厚さ0.55 mm、2.10 mm、10.1 mmの3種類のみを図10～図12に示す。いずれも、(a)が屈折率の実部、(b)が吸収係数である。図中で薄黄色の色をつけた領域は、吸収が大きいためデータの信頼性が乏しい領域である。

屈折率については、いずれのデータも周波数の低い領域では、ほぼ一定であり、2.2 程度である。2.10 mm のデータを見ると、1 THz 付近に分散があるようにも見える。しかし、この分散は、0.55 mm では見られない。これらの変動に関しては、組成の分布による影響が出ている可能性とデータの信頼性が低くなる境界付近で変動する可能性の両方が考えられる。吸収係数については、周波数が高くなるに従ってほぼ直線的に増加し、0.5 THz で 25 cm^{-1} 程度である。10 mm 厚のものも、0.3 THz 付近までであるが、同程度の値を示している。吸収係数の周波数依存性が周波数に対して、線形であると仮定すれば、 $\alpha = 50f \text{ cm}^{-1}$ (f は、THz 単位の周波数)である。

このような、屈折率、吸収係数の評価方法は、コンクリートに限らず他の様々な物質の評価に応用できるため、各種材料の特徴付けに対して有効である。

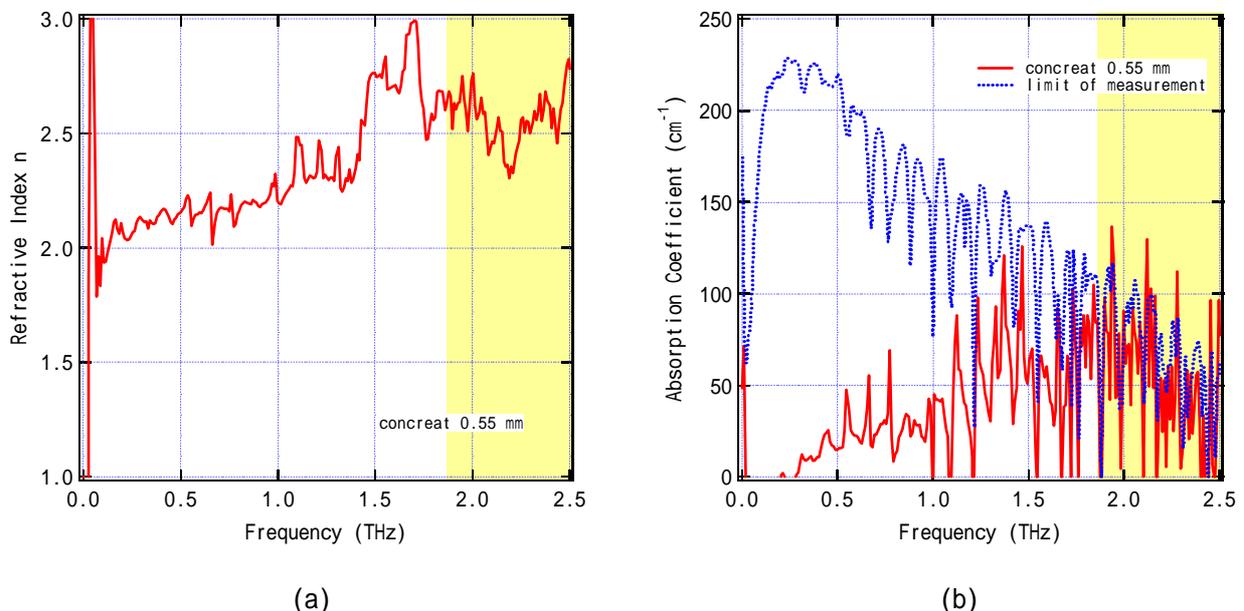
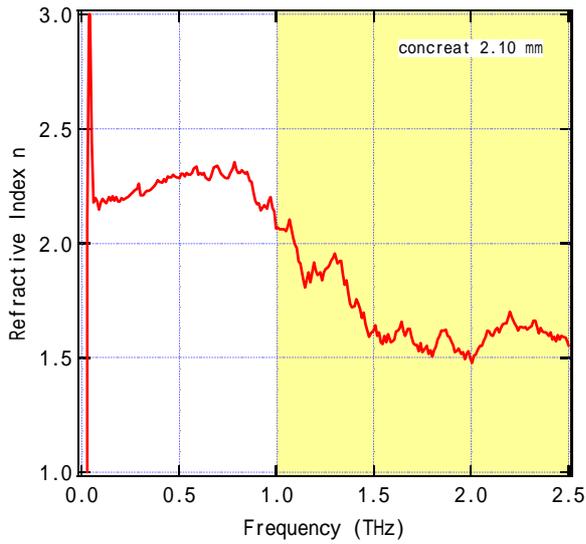
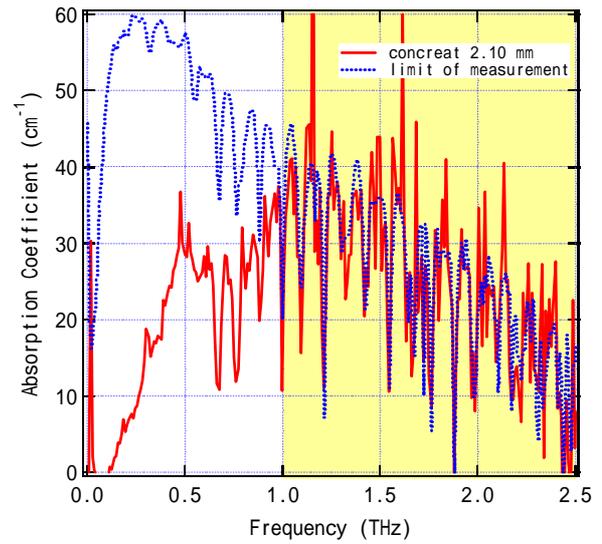


図10 コンクリートの屈折率と吸収係数 $d = 0.55 \text{ mm}$
(a) 屈折率、(b) 吸収係数

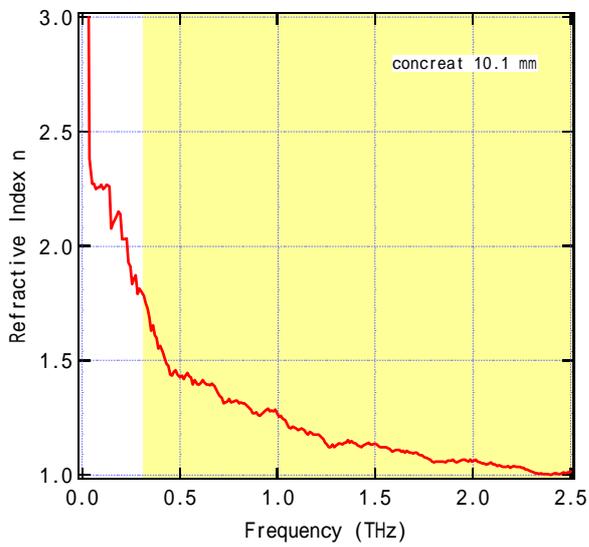


(a)

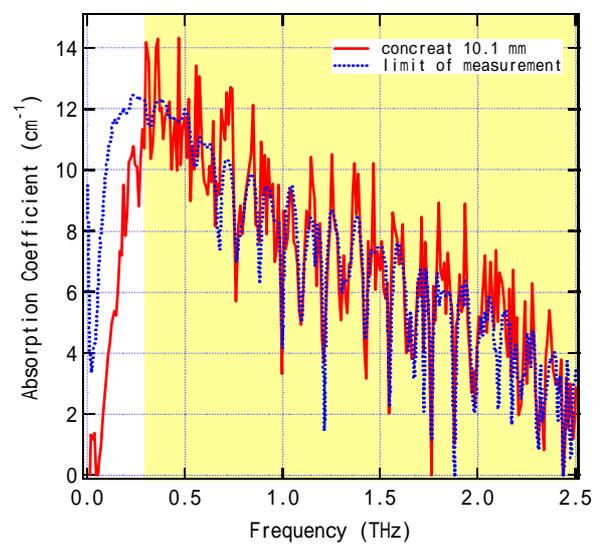


(b)

図11 コンクリートの屈折率と吸収係数 $d = 2.10$ mm
(a) 屈折率、(b) 吸収係数



(a)



(b)

図12 コンクリートの屈折率と吸収係数 $d = 10.1$ mm
(a) 屈折率、(b) 吸収係数

ZnTe結晶を用いた高周波までのTHz波発生と検出

前項までの測定は、THz波の発生、検出の組み合わせで、0-5 THz程度の範囲に限られていた。このうち実際に吸収測定などに使うことができていたのは、0-3 THz程度の範囲であった。これに対して、10 THz付近までの高周波領域を分光測定に応用できればTHz波の応用の可能性が広がると考えられる。

光整流効果を用いたTHz波放射の発生と、電気光学効果を用いたTHz波の検出でのTHz波の発生、検出周波数の限界は、レーザーのパルス幅と結晶の厚さに依存する。現在用いている再生増幅器のパルス幅50 fsにより制限される周波数領域の上限は、20 THz程度となるはずであるが、これまでの計測では0-5 THzのTHz波しか得られていない。この程度の周波数領域のTHz波放射、検出であれば、パルス幅100 fs程度のレーザーを用いても同程度の結果が得られる。これは、現在の計測条件では、放射、検出されるTHz波の上限が、用いているZnTe結晶の厚さにより制限されているためである。したがって、結晶をより薄いものに変更すれば、より高い周波数までの計測が可能になるはずである。そこで、今回、厚さ18 μm 、68 μm 、200 μm の結晶を用い、計測可能な周波数の上限を計測した。

測定条件を表1に示す。結晶の組み合わせは、エミッター200 μm 、レシーバー68 μm (測定条件)、エミッター200 μm 、レシーバー18 μm (測定条件)、エミッター68 μm 、レシーバー18 μm (測定条件)の3通りである。レシーバー用の結晶を変更すると検出器に入射される光量が変わるため、 と 、 の条件では、強度の絶対値の比較ができないことに注意が必要である。

表1 測定条件

測定条件	エミッター厚さ (μm)	レシーバー厚さ (μm)
	200	68
	200	18
	68	18

測定された時間波形を図13に、周波数スペクトルを図14に示した。図14(a)は縦軸を線形表示したものであり、図14(b)は対数で表示したものである。測定条件 のスペクトルは、測定条件 、 ならびに、 のスペクトルに比べて高周波成分が劇的に増加しており、対数表示でみると、17 THz程度までのTHz波放射を実現できている。

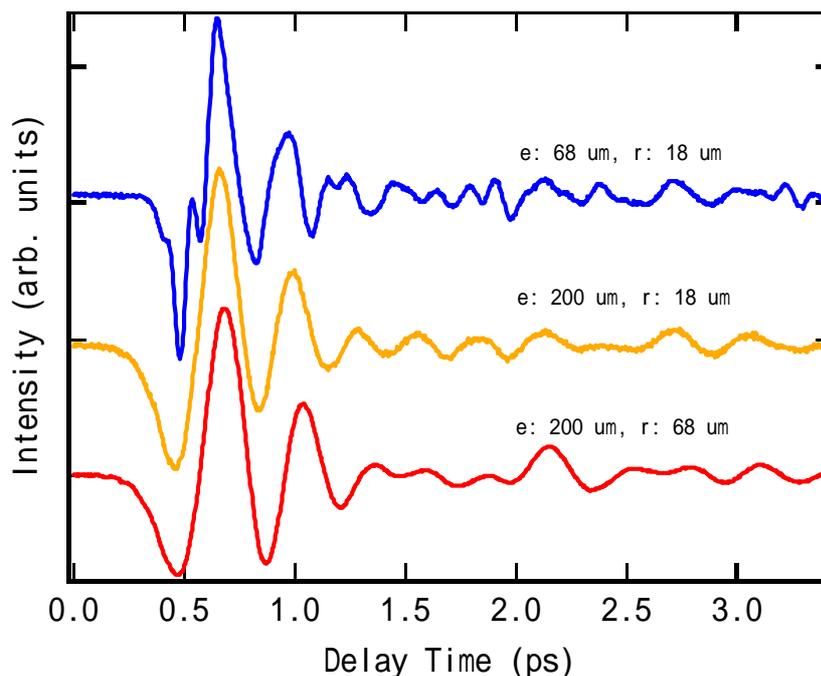
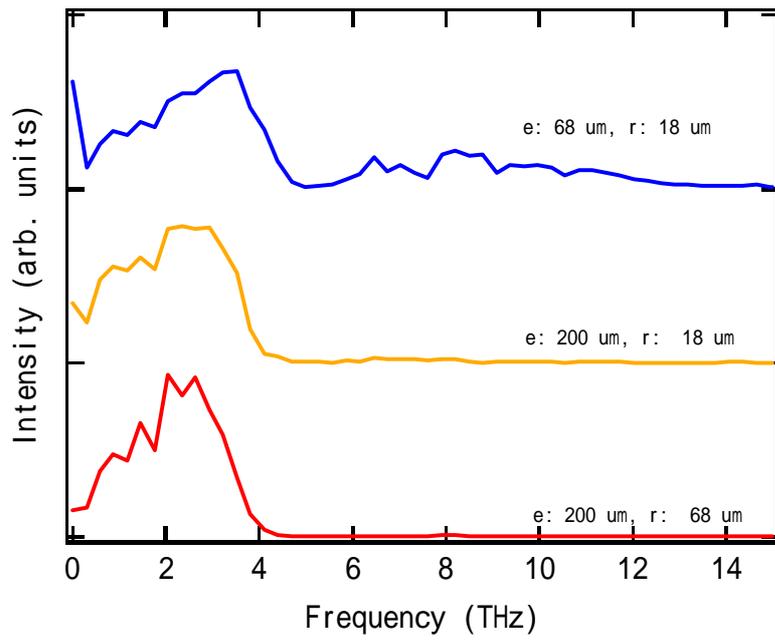
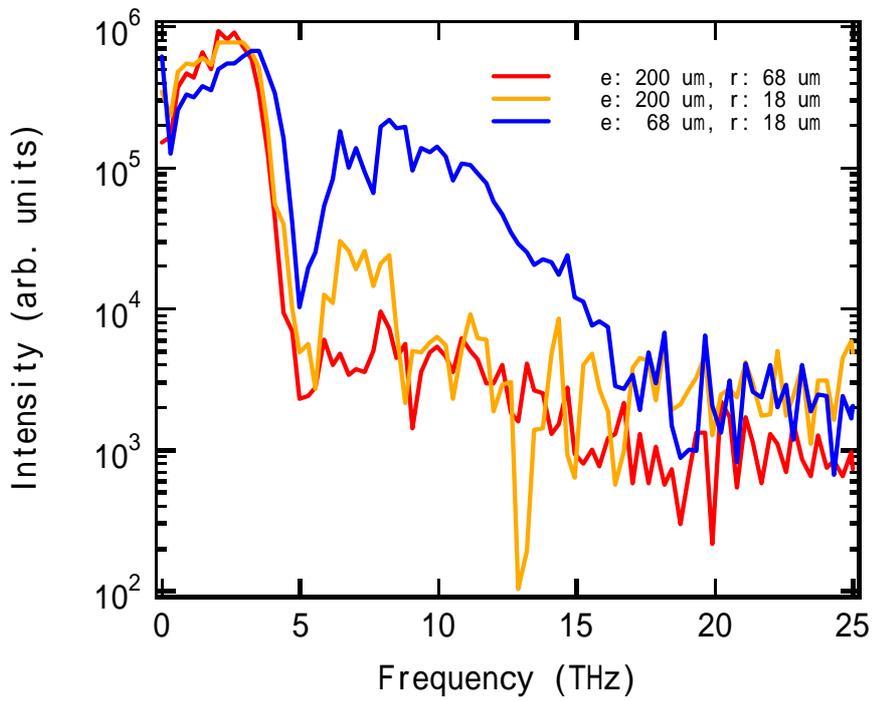


図13 時間波形



(a)



(b)

図14 周波数スペクトル
 (a) 縦軸線形 (b) 縦軸log

BNA結晶を用いた高周波までのTHz波発生

光整流効果を用いたTHz波放射の発生と、電気光学効果を用いたTHz波の検出でのTHz波の発生、検出周波数の限界は、レーザーのパルス幅と結晶の厚さに依存する。現在用いている再生増幅器のパルス幅50 fsにより制限される周波数領域の上限は、20 THz程度となるはずであり、ZnTe結晶を用いた高周波までのTHz波発生と検出において、THz放射にZnTe 68 μm 、検出にZnTe 18 μm の結晶を用いることにより17 THzまでのTHz電磁波の放射検出を実現した。今回、THz放射の結晶にBNA結晶を用いてTHz電磁波の放射特性をZnTeと比較した。

測定条件を表3に示す。レーザー結晶をZnTe 18 μm とし、エミッター結晶のみを変更した。エミッターの結晶は、ZnTe 200 μm (測定条件)、ZnTe 68 μm (測定条件)、BNA 342 μm (測定条件)の3通りである。結晶の特性の優劣を決めるためには、それぞれの結晶の励起光に対する群屈折率とTHz波に対する屈折率の差、ならびに、結晶の厚さが必要である。BNA結晶の励起光に対する群屈折率はわかっていないので、屈折率に関する部分に関する検討を省略し、単純に結晶の厚さだけで考えると、今回の測定条件で高周波を放射するという点に関しては、BNA結晶に対して不利な条件となっている。

表2 測定条件

測定条件	エミッター結晶	エミッター結晶の厚さ (μm)	レーザー結晶	レーザー結晶の厚さ (μm)
	ZnTe	200	ZnTe	18
	ZnTe	68		
	BNA	342		

測定された時間波形を図15に、周波数スペクトルを図16に示した。図16(a)は縦軸を線形表示したものであり、(b)は対数で表示したものである。測定条件のBNA結晶342 μm からのTHz波は、10 THzを越える程度までの成分を放射している。測定条件 (ZnTe 200 μm)と (ZnTe 68 μm) の中間の状態である。BNA結晶では、結晶が厚いにもかかわらず、より薄い200 μm 厚のZnTe結晶より高周波まで放射できているのは、励起光に対する群屈折率とTHz波に対する屈折率の差がZnTeより小さいためであると考えられる。得られたスペクトルが、ZnTe 68 μm と200 μm の中間であることから、励起光に対する群屈折率とTHz波に対する屈折率の差は、ZnTe結晶のおよそ半分程度であることが予想される。屈折率差が小さいということは、同じ高周波成分を得ようとする場合に、ZnTe結晶に比べて厚い結晶を用いることが可能であることを示している。

BNA結晶からのTHz波放射を計測し、ZnTe結晶と同じ厚さの結晶であればより高い周波数成分まで放射できることを実証した。

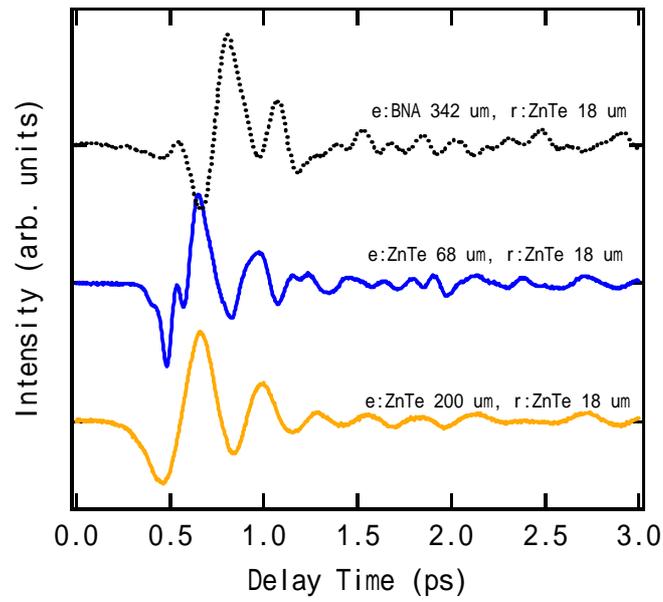
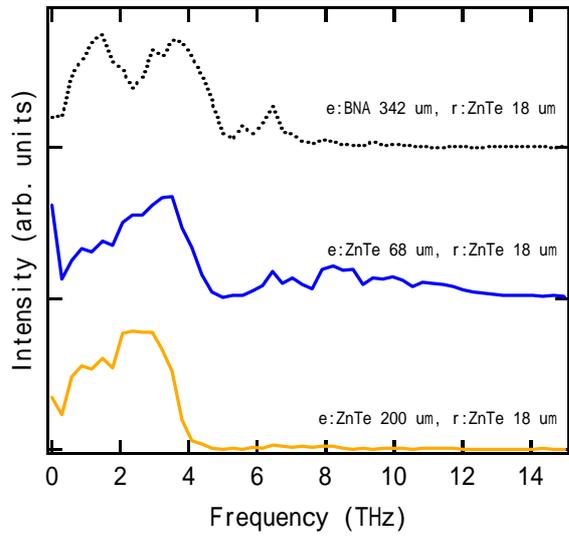
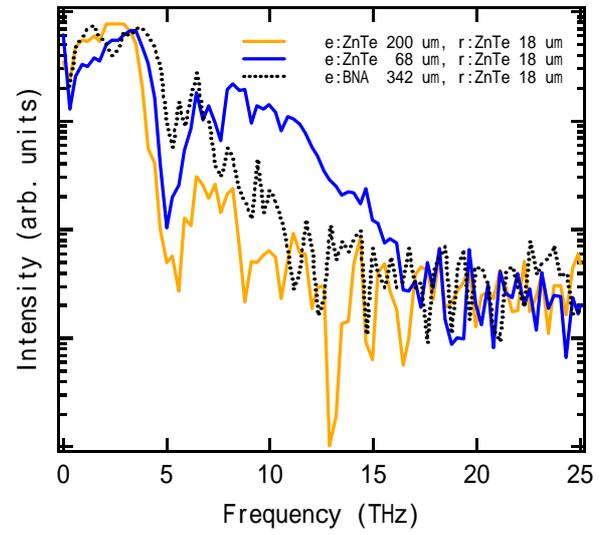


図15 時間波形



(a)



(b)

図16 周波数スペクトル
(a) 縦軸線形 (b) 縦軸log

高周波までのTHz波を用いた分光計測

これまでのTHz波の測定は、THz波の発生が容易であり、かつ、検出系の感度を高くとれる0-5 THz程度の領域に限られていた。この内、実際に吸収測定などに使うことができていたのは、0-3 THz程度の範囲であった。これに対して、10 THz付近までの高周波領域を分光測定に応用できれば、THz波の応用の可能性が広がると考えられる。本年度は、有機材料のBNA結晶を用いて高周波までのTHz波を放射させ、非破壊検査法の一例として透過分光測定をおこない、その光学定数である屈折率と吸収係数を求めた。

具体的には、高周波までのTHz波を用いてBNA結晶とアルカン類である、オクタコサン($C_{28}H_{58}$)、ドトリアコンタン($C_{32}H_{66}$)、ヘキサトリアコンタン($C_{36}H_{74}$)の屈折率と吸収係数を評価した。THz波の発生に用いた光源は、再生増幅器からの出力光(中心波長800 nm、パルス幅60 fs、繰返周波数1 kHz、出力620 mW)である。

THz波のエミッターは、厚さ180 μm のBNA結晶であり、THz波を検出するレシーバーは厚さ18 μm のZnTe(110)結晶である。被測定試料の内、BNA結晶の厚さは410 μm である。また、アルカン類は、厚さ3 mm程度のペレット状に圧縮形成したものをを用いた。本テーマの実験に用いたBNA結晶は、大阪市立大学大学院理学研究科の橋本秀樹教授の研究室において作製されたものである。

最初にBNA結晶の測定結果について述べる。BNA結晶のへき開面には、面内に、a軸とc軸が存在するため、それぞれの軸に平行な偏光について計測した。図17(a)に測定された時間波形を示す。いずれの方向も吸収により強度が低下しているが、特にc軸方向の吸収の方が大きい。図17(b)に周波数スペクトルを示す。リファレンスにおいて、2 THz付近と5-6 THz付近にディップが見られる。2 THz付近のディップはエミッターに用いたBNA結晶の吸収であり、5-6 THz付近のディップはレシーバーに用いたZnTe結晶の吸収である。また、多数のスパイク状の急峻なディップは水蒸気による吸収である。

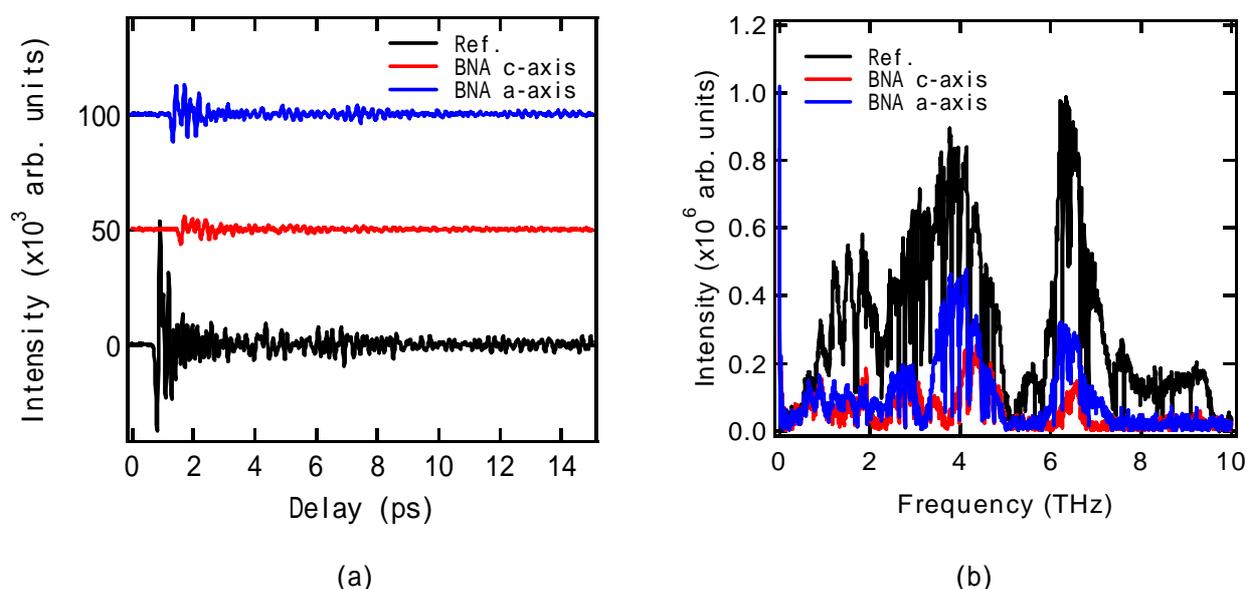
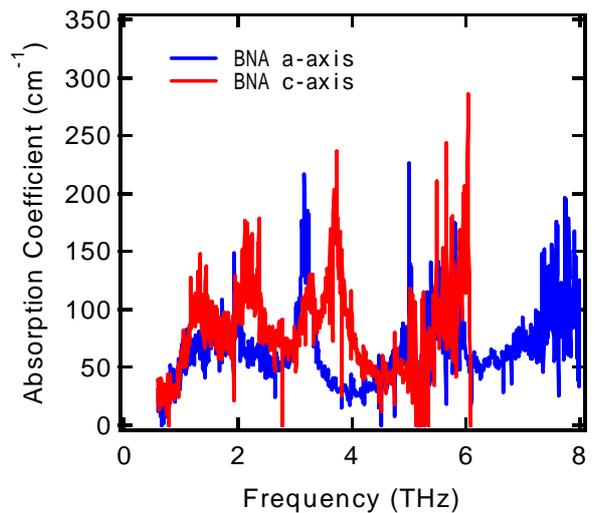
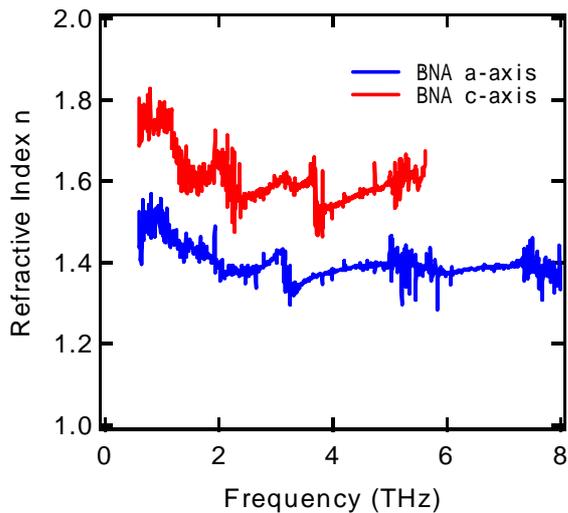


図17 BNA結晶の透過分光測定結果
(a) 時間波形、(b) 周波数スペクトル

これらの測定波形から計算された屈折率と吸収係数を図18に示す。屈折率と吸収係数がスパイク状になっている箇所は、水蒸気の吸収によって生じたものである。c軸方向では、0.5-6 THz、a軸方向では、0.5-8 THzの高周波数領域にわたって屈折率と吸収係数を評価することができた。以前の3 THz付近までの計測でわかっていた以外のものとして、c軸方向では4 THz付近に、a軸方向では3 THz付近に大きな吸収が存在することがわかった。



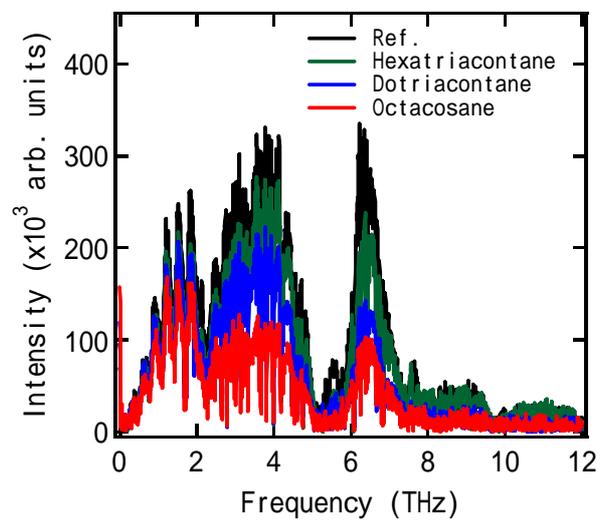
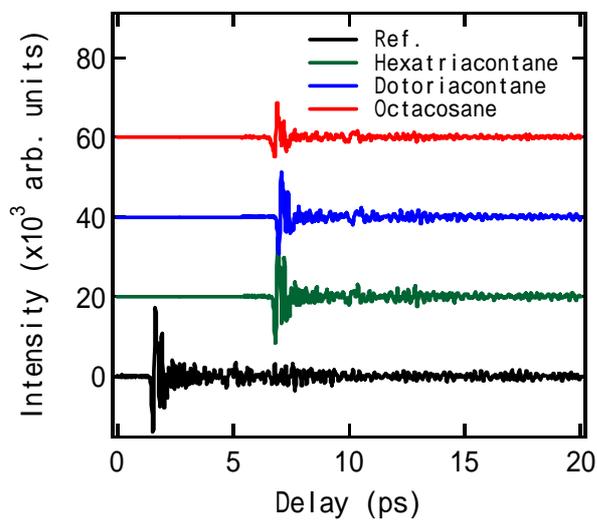
(a)

(b)

図18 測定から得られたBNA結晶の屈折率と吸収係数

(a) 屈折率、(b) 吸収係数

次に、アルカン類の測定結果について記す。測定されたアルカン類の時間波形を図19(a)に示す。いずれの材料も吸収が小さく、信号強度の低下は、リファレンスに比べて1/3程度で抑えられている。周波数スペクトルを図19(b)に示す。分子量が小さいほど、信号強度の減衰が大きいことがわかる。リファレンスにおいてみられる、2 THz付近と5-6 THz付近のゆるやかなディップと多数の急峻なディップは、それぞれエミッターのBNAの吸収、レーザーのZnTeの吸収、水蒸気による吸収である。



(a)

(b)

図19 アルカン類の透過分光測定結果

(a) 時間波形、(b) 周波数スペクトル

図20に測定波形から計算された屈折率と吸収係数を示す。屈折率と吸収係数がスパイク状になっている箇所は、水蒸気による吸収によって生じたものである。5-6 THz付近で屈折率と吸収係数が乱れているが、これはZnTeの吸収により信号強度が小さくなったことに影響されたものであり、本質的なものではない。高周波までのTHz波を用いてアルカン類の屈折率と吸収係数を0.5-11 THzに渡って評価することができた。アルカン類は、計測できた0.5-11 THzの領域すべてに渡って、吸収係数が 10 cm^{-1} 以下であり、THz波の高周波領域まで吸収係数が小さい物質であることがわかった。

以上の結果より、高周波領域までのTHz波が発生可能になるとともに、発生できた高周波領域までのTHz波を用いた分光計測を実現することができた。

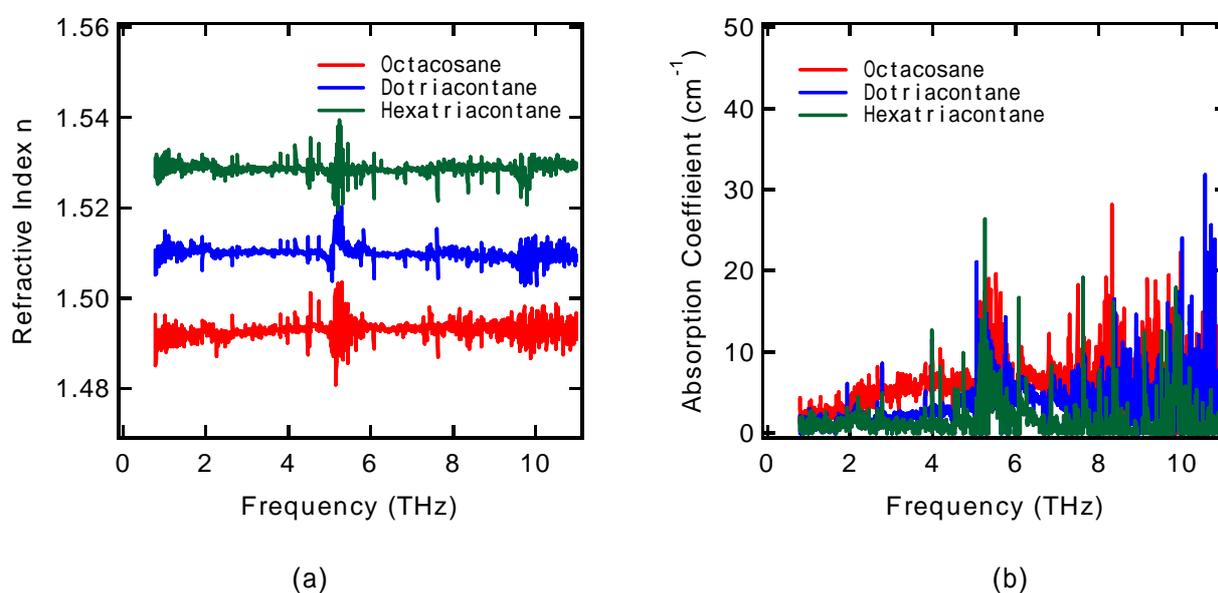


図20 測定から得られたアルカン類の屈折率と吸収係数
(a) 屈折率、(b) 吸収係数

波形整形による高周波成分の増強

高周波までのTHz波スペクトルを発生・検出できる実験系（エミッター-BNA 265 μm 、レーザー ZnTe(110) 68 μm ）において、波形整形器を用いてエミッター結晶に入射する光波形を制御し、THz波スペクトルを制御する実験を実施した。

実験系を図21に示す。波形整形器は、THz波のエミッター側のみに挿入した。この時、8 THz程度までのTHz波放射が得られたが、強度の強いTHz波放射は4.5 THz程度までに限られる。ここで、放射されるTHz波の高周波成分を増強する事を試みた。THz波測定系の遅延をTHz波の時間波形におけるピーク位置に固定し、検出信号が大きくなるようにシミュレーテッドアニーリング(SA)法による制御をおこなった。波形整形器へのフィードバックループを100回繰り返した。

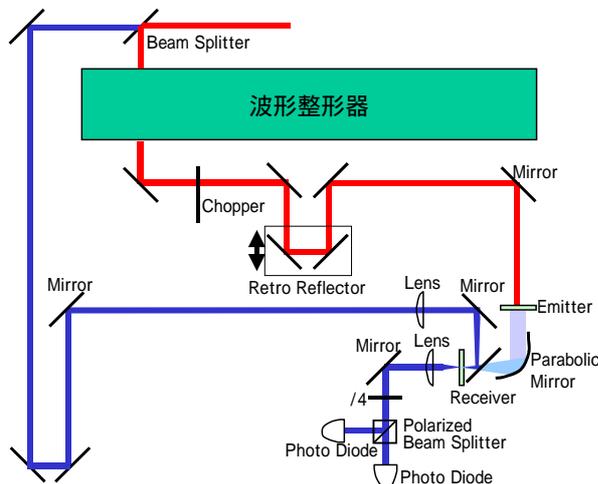


図21 実験系

SA後の周波数スペクトルを図22に示す。制御前と制御後のスペクトルを比較すると、最適化された位相において高周波成分がより強く放射されており、波形整形による効果が確認できる。ここで、周波数スペクトルの内、1.7 THz付近のディップは、水蒸気による吸収であり、2.2 THz付近のディップは、エミッターに用いたBNAの吸収によるものである。

つぎに、どの周波数成分が強くなっているのかを確認するために、制御後の信号強度と制御前の信号強度の比を図23に示した。この図では、1を越えた領域でスペクトルの強度が上がっていることを示している。2 THzを境に高周波側でスペクトル強度が上がっており、波形整形することにより、高周波側を強くするという目的を達成することができた。4 THz付近では、50%程度の増強ができた。なお、5 THzより高周波側の周波数領域は、ノイズが大きいため正確に評価できていない。

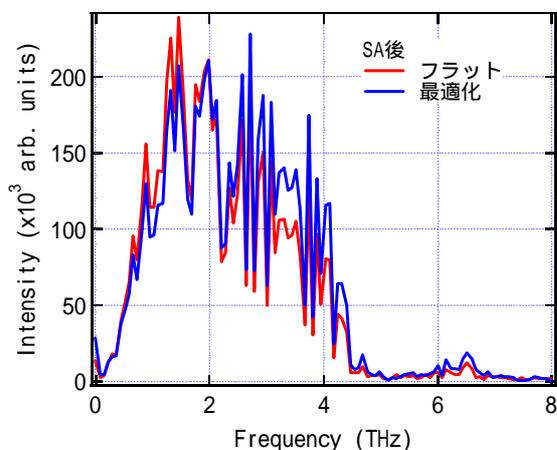


図22 周波数スペクトル

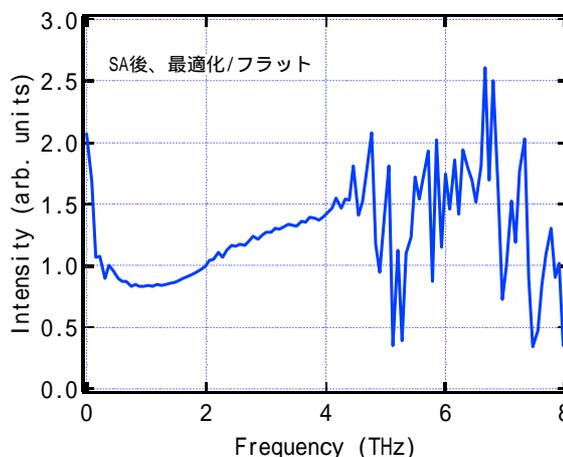


図23 制御後の信号強度と制御前の信号強度の比

全有機THz波計測システムの構築

共同研究先の大阪市立大学 橋本教授から提供されているBNA結晶等を用いて、THz波の発生と検出を有機結晶でおこなう全有機THz波計測システムを構築し、THz波計測の実用化促進を図った。

THz波エミッターとして優れていることが確認できているBNA結晶を、レーザー結晶に用いてTHz波を検出する実験を試み、全有機THz波計測システムの検討をおこなった。

レーザーとして、厚さ1.0 mmのZnTe結晶と厚さ1.1 mmのBNA結晶を用いて、それぞれの特性を比較した。観測されるTHz波のスペクトルは、結晶厚さによっても影響を受けるため、同程度の厚さの結晶を選んで計測をおこなった。実験系を図24に示す。この時、THz波放射用のエミッターに、厚さ130 μm のBNA結晶を用いた。

測定された時間波形を図25に、周波数スペクトルを図26に示す。図では、ZnTe結晶を用いた場合を赤で、BNA結晶を用いた場合を黒で示した。BNA結晶を用いた電気光学効果によりTHz波を検出することができたのは、本研究が初めてである。なお、図では、結晶厚さに対する補正はおこなっていない。ここで、周波数スペクトルの内、1.7 THz付近のディップは、水蒸気による吸収であり、2.2 THz付近のディップは、エミッターに用いたBNAの吸収によるものである。

次に、図26のデータをピーク強度で規格化することで、THz波の検出可能な周波数帯域を比較した。ピーク強度で規格化した周波数スペクトルを図27に示す。周波数帯域は一般に厚い結晶を用いると高周波成分を検出するのが困難になる。今回の測定では、BNA結晶の方が、4~6 THzの高周波でZnTe結晶よりも大きな出力が得られた。従って、BNA結晶は高周波成分の検出に有効であることが明らかになった。

全有機THz波計測システムを実現するとともに、高周波成分の検出に有効であることを確認できた。この系は、実証レーザーシステムと位置付けることができる。有機結晶の原材料は安価であり、全有機THz波計測システムはTHz波計測の実用化の促進につながるものと期待される。

以上より、入射パルスの波形整形制御による高周波成分の発生強度を増強するとともに、高周波成分の検出に有効である全有機THz波計測システムを構築することができた。非破壊検査には、広帯域の計測が望まれることから、本事業で新規産業創成の基盤を整備することができた。

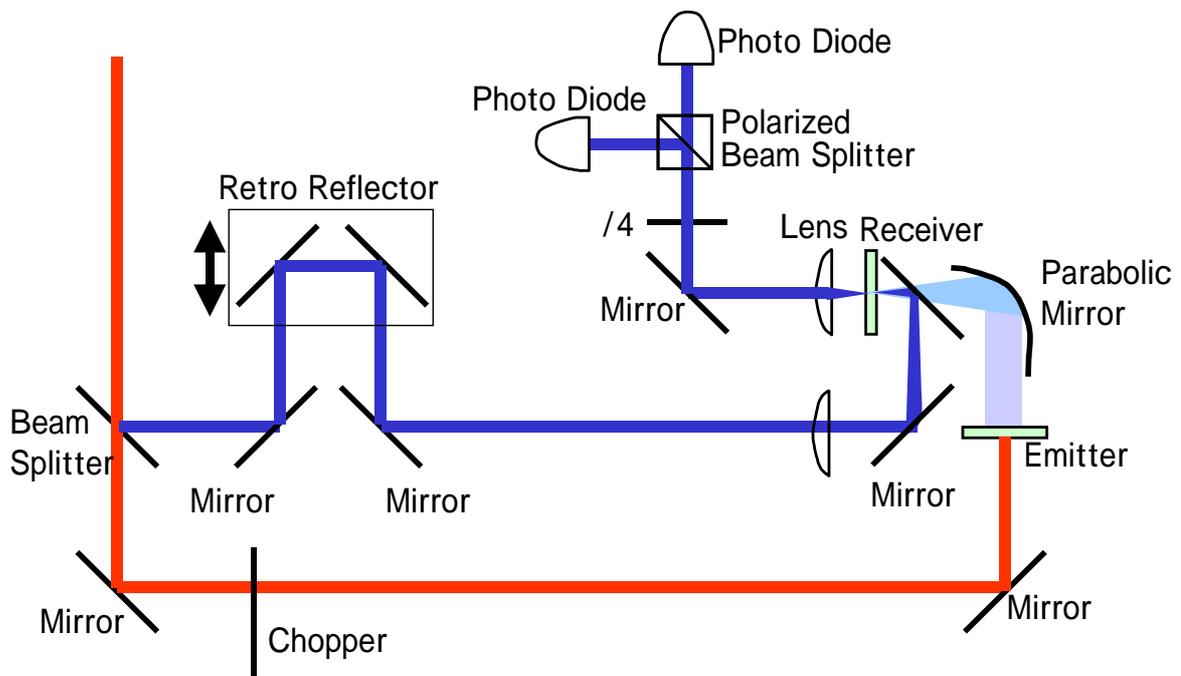


図24 実験系

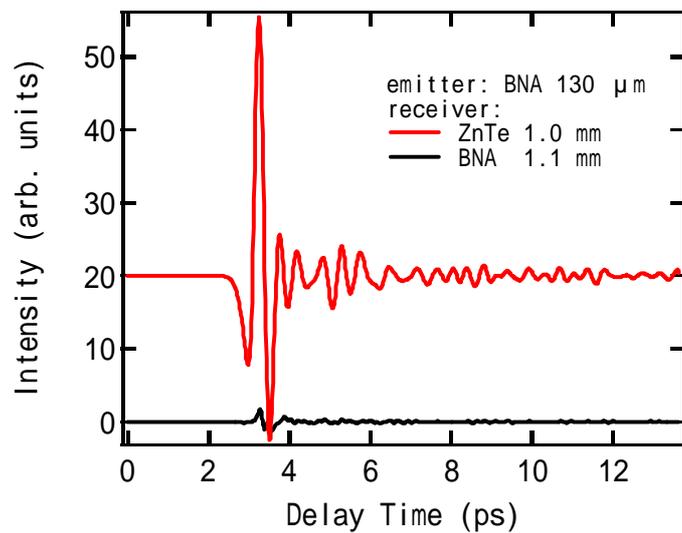


図25 時間波形

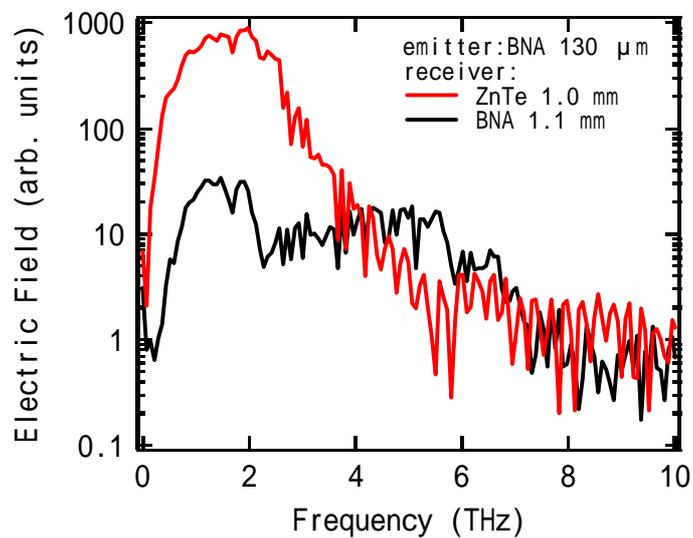


図26 周波数スペクトル(対数表示)

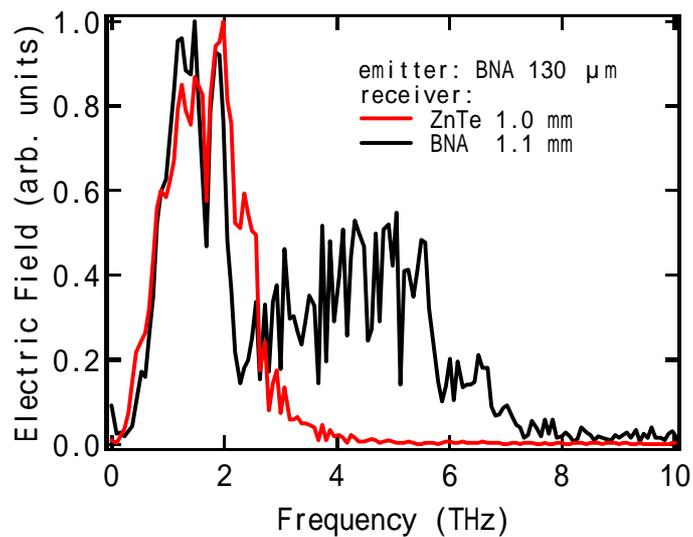


図27 ピーク強度にて規格化した周波数スペクトル

特許件数：2 論文数：2 口頭発表件数：4 プレス発表件数：1

(4) 研究成果に関する評価

国内外における水準との対比

他に先駆けて実現した小型・高効率・高耐光強度 フェムト秒波形整形器を利用し、高い技術水準の制御技術でオリジナルのアイデアであるRECAPSを実施し、世界で初めてフェムト秒パルス波形制御による発生THz波の高周波成分の増強に成功した。また、共同研究チームが世界にさきがけて作製したBNA結晶を利用して、「全有機結晶テラヘルツ波発生・計測」を実現し、この系が高周波成分の検出に有効であるという新規な知見を得た。さらに、THz波反射イメージング系を実現し、THz波の適用範囲の拡大を図った。以上、国内外において、他に見られないほどの高水準な研究レベルで事業を推進して完了した。

実用化に向けた波及効果

本事業の成果である「超高密度フォトン利用実証レーザーシステム」の実例としての「全有機結晶テラヘルツ波発生・計測」は、有機結晶を用いることで、安価、高性能、簡便な計測等の提供を可能にする。本事業で着目したBNA結晶は、潮解性が無い点で優れた結晶であるとともに、有毒元素を含まないため、環境対応の点からも有望である。また、RECAPSを用いたTHz波発生の周波数制御等の計測技術は、必要な周波数を効率よく得るための基盤技術として、今後の産業応用への足がかりとなると期待される。さらに、THz波イメージングでは、反射波を用いた計測の応用計測への波及が考えられる。よって、本事業の成果は実用化に向けて大きな波及効果をもたらすものと期待できる。

(5) 残された課題と対応方針について

本研究テーマでは、フェーズ において当初の目標を達成し、残された課題は特にない。フェーズ では、参画企業において、ネット販売などを試行し、ニーズ調査を実施しつつ具体的な産業展開を図る計画である。