

平成 26 年度研究開発成果概要書

課題名 : THzギャップを埋める実時間THzカメラの研究開発
 採択番号 : 16401
 個別課題名 : -
 副題 : THzアレイセンサ・カメラの感度の低周波化と多画素化

(1) 研究開発の目的

高温の粉塵や煙が発生する災害現場で倒れた人を捜索する場合や衣服中の隠匿物・封筒内の薬物等を捜す場合、透過性の高いテラヘルツ（THz）波を検出するカメラを開発すると便利である。

本研究開発（平成24年度から26年度）では、このような分野で役立つハンディTHzカメラを開発し、その実用性を実証することを目的とする。現状の技術では、85GHzや0.25または0.5THzのセキュリティ用途のカメラは走査機構を必要としており大型である。一方、現状のリアルタイムのハンディTHzカメラの感度は2THz以下で感度が低下する。そこで0.5～2THzの周波数領域でアレイセンサの高感度化を図り、走査機構のないリアルタイムのハンディTHzカメラを開発することを目的とする。それにより、災害現場やセキュリティの分野において使い易い装置を社会に提供することができる。

(2) 研究開発期間

平成24年度から平成26年度（3年間）

(3) 実施機関

日本電気株式会社

(4) 研究開発予算（契約額）

総額 280百万円（平成26年度 87百万円）
 ※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発課題と担当

課題 : THzギャップを埋める実時間THzカメラの研究開発（日本電気(株)）

1. THzアレイセンサの低周波数化・多画素化の技術開発
2. THzカメラの開発とアレイセンサの評価
3. 模擬災害または模擬セキュリティの状況下でのカメラの実証実験

(6) これまで得られた成果（特許出願や論文発表等）

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	7	4
	外国出願	1	0
外部発表	研究論文	1*	1
	その他研究発表	15*	7*
	プレスリリース・報道	1	1
	展示会	6	2
	標準化提案	0	0

*) 研究論文、その他研究発表について、上記の累計数以外に、各々1件と2件を投稿済みです（掲載：2015年4月以降を予定。研究論文/J Infrared Milli Terahz Waves、その他研究発表/Proc. SPIE vol.9483, 防衛技術ジャーナル）。

(7) 具体的な実施内容と成果

課題 THzギャップを埋める実時間THzカメラの研究開発

サブ THz 領域の電磁波に対する感度を格段に向上させるための新画素構造を開発し、画素数 320×240 と 640×480 のアレイセンサに適用して目標とする NEP 値を達成した。これらのアレイセンサを搭載したカメラに、外部トリガ機能、Lock-in 機能、ビームプロファイル機能、感度評価アルゴリズム機能、画像処理機能等を組込んで多機能で使い易い物にし、カメラの開発目標を達成した。実証実験機に関してはユーザーニーズ調査に基づいて、模擬セキュリティ向けに透過と反射の両画像を取得できるイメージング装置を開発し目標を達成した。

1. THzアレイセンサの低周波数化・多画素化の技術開発

本委託研究ではボロメータ型 THz アレイセンサの感度をサブ THz の周波数帯で向上させるため、前回の委託研究で開発した画素構造（従来型画素構造と呼ぶ）を基に再設計し、図 1 と 2 に示すように、SiN 厚膜（図 1 で 2:追加誘電体、図 2 で誘電体 1-5 と記載）を Si 読出回路（Read-Out Integrated Circuit: ROIC）上の反射膜とエアギャップの間に挿入する新規画素構造とした。断面画素構造として、図 1 の単層 SiN 膜と図 2 の多層 SiN 膜の 2 通りの構造に対して、製造工程の開発を行った。

まず 2 つの新規画素構造を 320×240 アレイセンサ（画素ピッチ 23.5 μm）に適用して試作した結果、後述のように、両構造とも NEP の目標値を満たしたが、単層 SiN 膜の場合、厚みに制限があることが分った（注：Thru Silicon Via 形成装置およびステップカバレッジが良いメタル形成装置の導入ができれば、限界を延ばすことができ且つ製造が容易になる可能性がある）。そこで、厚みの上限が大きい多層 SiN 膜を用いる場合の幾つかの製造上の課題（層間配線端部での SiN の異常成長とクラックの発生）を解決し製造工程として採用し、640×480 アレイセンサ（画素ピッチ 23.5 μm）の試作に適用した。同製造工程で光学的共振構造の干渉長として約 15 μm が得られた。次に THz 波の波長の大きさを考慮して、画素ピッチ 94 μm の大画素（23.5 μm 角 4×4 相当）の 160×120 アレイセンサの開発にトライした。大画素の場合、熱分離構造の形成が容易でないこと及び厚膜 SiN の残留応力により ROIC が壊れることが 1 次試作で分り、大画素の形成工程と SiN の応力に関する製造条件を見直し、2 次試作を行った。同アレイセンサの画素の写真を図 3 に示す。左半分が 23.5 μm ピッチの画素、右半分が 94 μm ピッチの画素である。

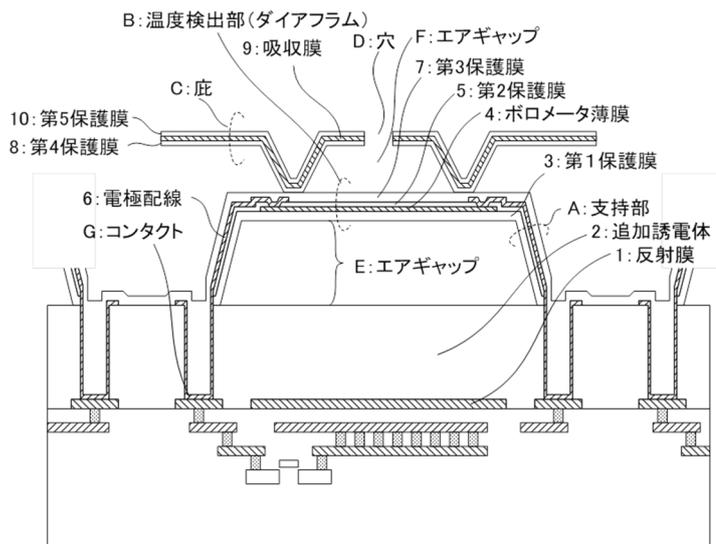


図 1. 新規画素構造 (単層 SiN 膜)

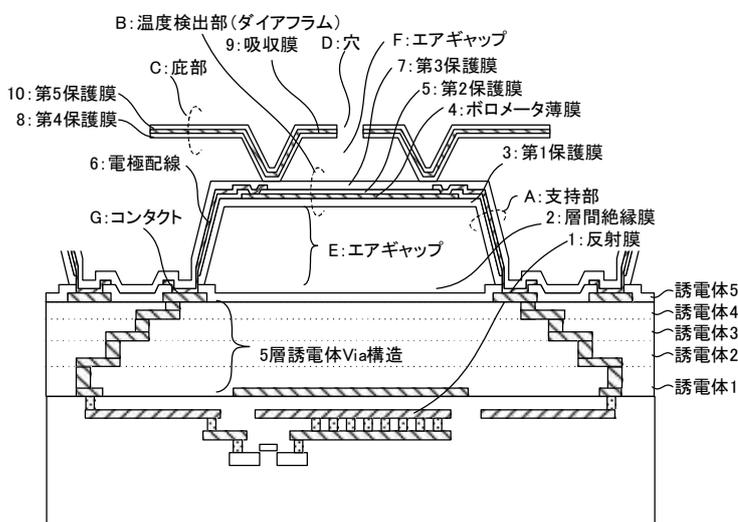


図 2. 新規画素構造 (多層 SiN 膜)

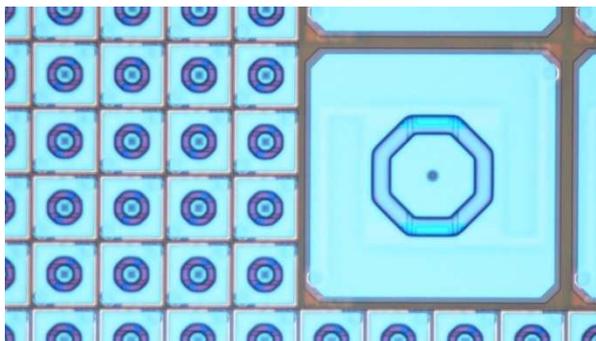


図 3. ピッチ 94 μm の画素 (右半分)。左半分は 23.5 μm ピッチの画素。

2. THzカメラの開発とアレイセンサの評価

課題ア-1 で開発した新規画素構造を有するアレイセンサを後述の THz カメラに組み込んで NEP (Noise Equivalent Power : 雑音等価電力) を測定した。将来の標準化を念頭に置いて、NEP の評価方法に関する提案を行い、J Infrared Milli Terahz Waves に掲載された (NICT, 理研, NEC の共著)。この方法に基づいて NEP の評価を行った結果、周波数 4.3THz で NEP=10~17pW、周波数 2.5THz で NEP=16~22pW、周波数 0.624THz で 4×4 pixel binning の下で 150~220pW、0.5THz で 4×4 pixel binning の下で 540~700pW、0.485THz で 4×4 pixel binning の下で 360pW の値を得た(図4、図5)。目標値は周波数 2 及び 3THz 付近で約 16pW、0.5THz 付近で NEP=約 500pW を実現することである。このように、測定値は目標値を達成している。尚、0.5THz 付近での NEP に関しては、既に目標を達成しているが、4×4 画素相当の大画素 (94 μm ピッチ) の 160×120 アレイセンサの開発にも挑戦しており、NEP 値を評価する予定である。以上のように、従来技術に比べて、サブ THz での感度を約 10 倍向上させることに成功した。この成果は本委託研究の目標の中でも最も重要なものである。

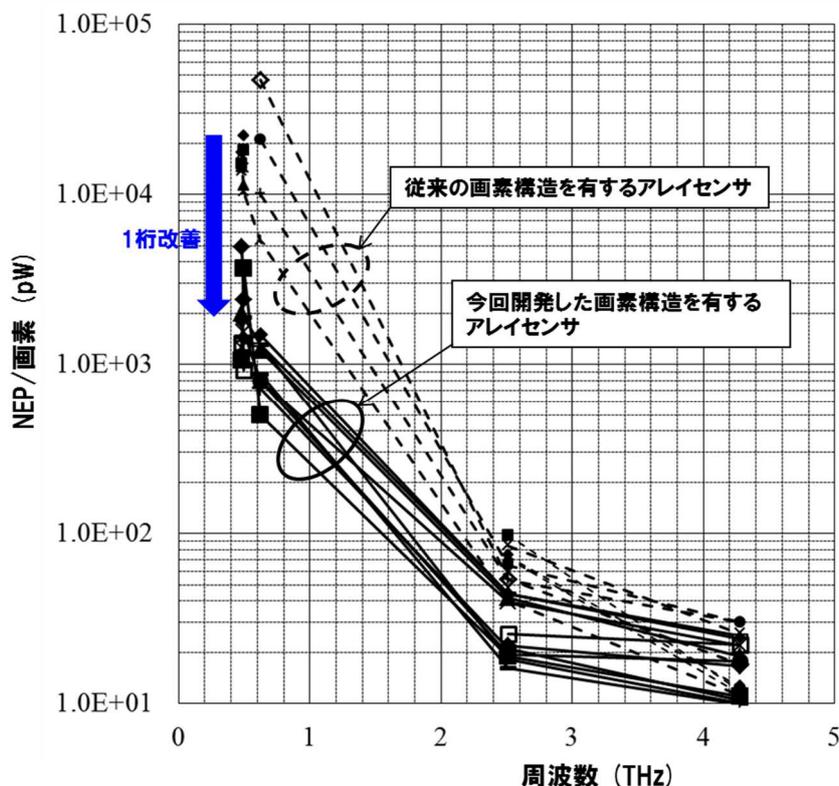


図 4. 今回開発したアレイセンサの NEP と従来の画素構造を有するアレイセンサの NEP の測定値 (Pixel binning なし)

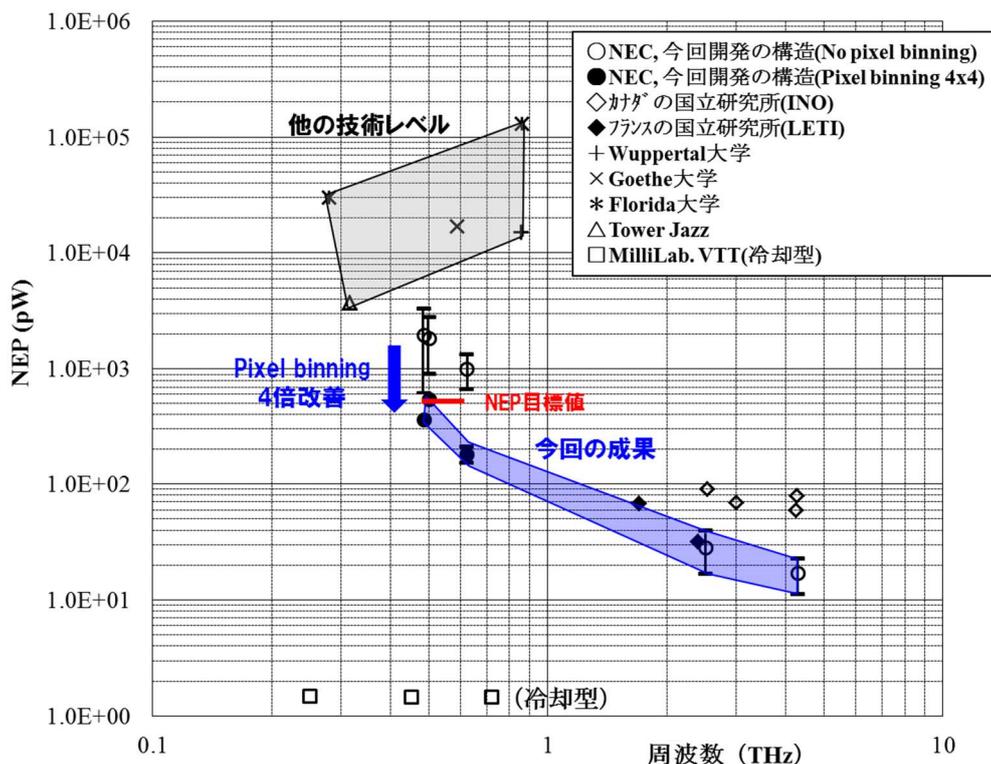


図 5. 今回開発したアレイセンサの NEP (0.5~0.6THz のデータに関しては 4x4 の pixel binning を適用) と他グループのアレイセンサの NEP の比較

課題ア-1 で開発した 320×240 アレイセンサを組み込んだ評価カメラ、従来画素構造の 320×240 アレイセンサを組み込んだ THz カメラおよび大阪大学産業科学研究所の THz 自由電子レーザー (THz-FEL) を用いて、両アレイセンサの NEP のスペクトル周波数特性を 3.3~6.7THz の範囲で評価した。THz-FEL の概要を図 6 に示す。線形加速器 (L-band LINAC) で加速した電子を THz-FEL に導き、モノクロメータを通して THz カメラでビームパターンが取得される。入射パワーやパルス当りのエネルギーについては、パワーメータとジュールメータで計測される。THz-FEL から輻射される THz 波の周波数は、Wiggler gap の間隔を変えることにより調整される。測定結果を図 7 に示す。同図に、社内で行った 0.485THz, 0.5THz, 2.5THz および 4.3THz のデータも載せた。2.5THz 以下では今回開発したアレイセンサの感度の方が高いことが分る。特に周波数 0.5THz 付近で約 10 倍の感度向上が見られる。

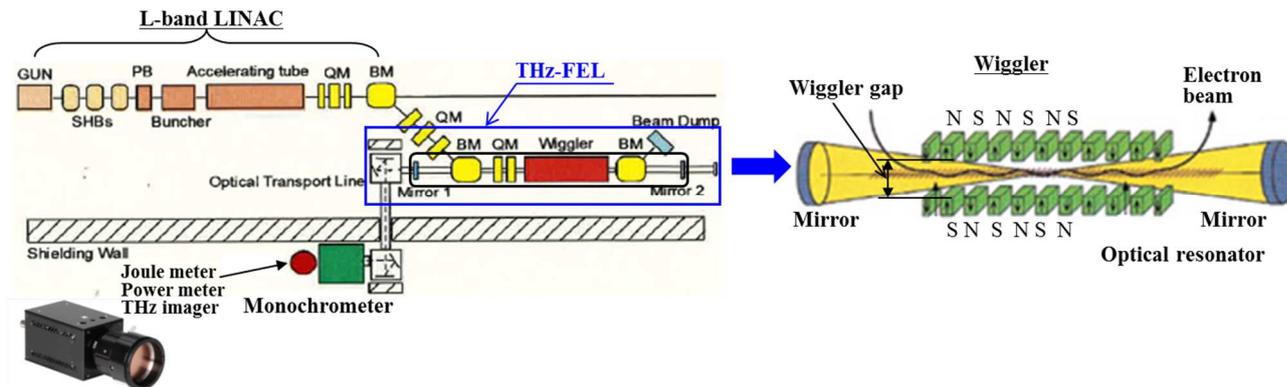


図 6. THz 自由電子レーザーの概要

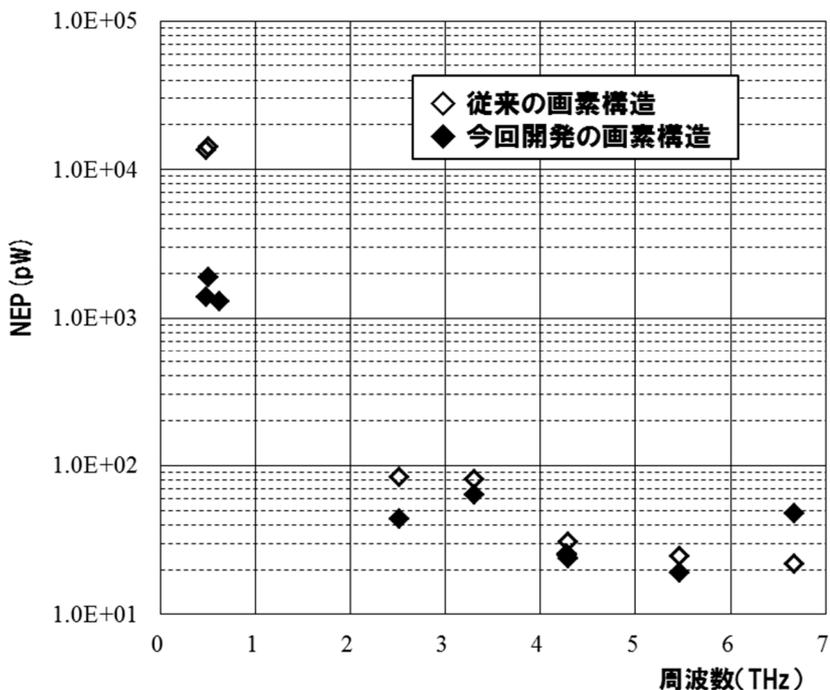


図 7. 今回開発したアレイセンサと従来画素構造のアレイセンサの NEP の周波数特性

640×480THz カメラ (図 8) は、640×480 アレイセンサを組み込んだ真空パッケージと信号処理回路を含むカメラヘッドおよび入出インターフェース (I/F) 回路を含む I/F Box から成り、両者を分離できるように設計・製造を行った。この設計により、カメラヘッドをより狭い空間でも設置できるよう配慮した。I/F Box には、Lock-in イメージング機能、USB 接続機能および新規の外部トリガ機能がある。THz カメラへのコマンド送信とデータ記録・表示は、USB ケーブルを介してコンピュータで制御される。コンピュータ側には Viewer ソフト (カメラへのコマンド送信、画像処理、データ記録・表示等) と解析ソフトがインストールされている。解析ソフトに

は、NEP を自動計算する機能、ユーザの声を反映させたビームプロファイラーの機能等が含まれている。



図 8. 開発した 640×480THz カメラ

光学系を含むカメラの大きさは、課題ア-3 の実証実験機的设计に依存する。後述のようにユーザーニーズ調査結果も考慮し、2 つの THz カメラを実証実験機に組み込むこととなった。両カメラ共通のカメラヘッドの大きさは、8cm 高×7.6cm 幅×15.4cm 長で、一つの光学系は 12cm 径×10cm 長、もう一つは 8.5cm 径×8.4cm 長である。従って、各カメラの大きさは、12cm 径×25cm 長、8.5cm 径×24cm 長となり、これらを足し算した大きさは、2 つのカメラを合わせた目標サイズを満たした。また各カメラの消費電力は約 7W で目標値 8W 以下を満たした。

Lock-in イメージング機能では、例えば、カメラが光源の ON/OFF を制御することができ、光源 ON 画像から OFF 画像を自動的に差し引くことにより、信号雑音比を向上させることができる。今回、位相調整をより細かくできるように改良し（32 分割で調整／従来は最大で 8 分割）、正常に動作することを確認した。

外部トリガ機能では、例えば、パルス光源がカメラの撮像タイミングを制御することによって、パルス光源のビームパターンを捉えることができる。同機能の実証実験では、大阪大学産業科学研究所の THz 自由電子レーザー（THz-FEL）を用いて、光源パルスの繰返し周波数 2.5, 3.3, 5.0, 10Hz で、同機能が正しく動作することを確認した。図 9 は、THz-FEL からの連続した約 100 パルスのピーク値の変動を示す（繰返し周波数 5Hz）。各パルスのビームパターンの代表的な写真も載せた。ピーク値の変動に関し、標準偏差値と平均値の比 8.9%は、ジュールメータで測定したパルス当りのエネルギーに対する同比 8.5%とよく一致する。

また F 値の明るい Si レンズ（F/0.7, 0.75）やコンバージョンレンズの開発を行い、撮像実験を通じて課題を抽出し、実証実験機用光学系的设计の基礎とした。

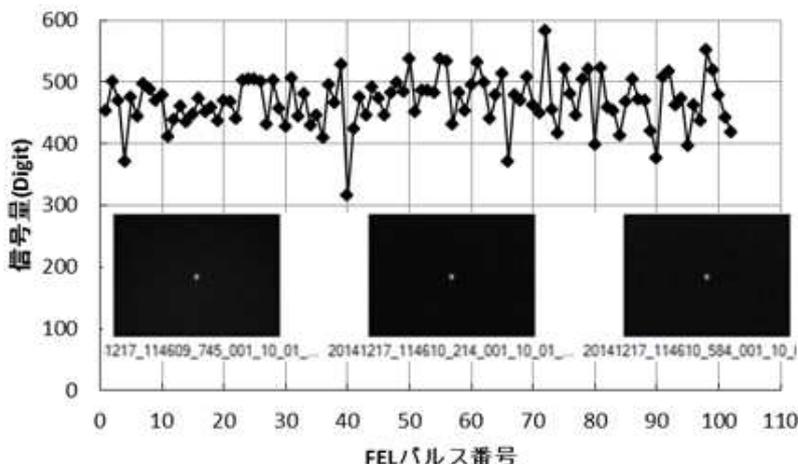


図 9. 連続した約 100 パルスのピーク値の変動と各パルスのビームパターン

3. 模擬災害または模擬セキュリティの状況下でのカメラの実証実験

課題ア-1 とア-2 で得られた THz アレイセンサの感度、THz カメラの信号処理機能の能力および市販の高輝度 THz 光源のパワー等に関する調査を基に、模擬災害および模擬セキュリティの状況下で用いるイメージング装置の概念設計を行った。具体的には、THz 光源のパワー、大気吸収、災害現場での透過特性、照射光学系と受光光学系の総合効率および THz アレイセンサの感度等を考慮したシミュレータを作成し、模擬災害現場用イメージング装置や模擬セキュリティ用イメージング装置に対して信号雑音比の推定を行った。

光源の周波数については、大気、紙、布、プラスチックに対して透過率が高い周波数で且つコンパクトなイメージング装置になるような高輝度のサブ THz-CW 光源を調査した。逡倍器を用いた Amplifier Multiplier Chain (AMC) と Backward Wave Oscillator (BWO) を候補とし、最終的に VDI 社の AMC 光源を選定し、発振周波数約 0.5THz で 10mW のパワーの光源を購入した。

模擬災害現場用と模擬セキュリティ用の照射光学系と受光光学系の設計を行い、信号雑音比を見積った。その結果、前者の場合、プラスチック燃焼時に発生するガスの透過率が低く、現場に即適用できるイメージング装置の実現が容易でないことが分った。そこで THz イメージング装置に関するユーザーニーズ調査を行った。約 50 件の研究機関や会社とコンタクトし、ヒアリング以外にデモ実験も行った。その結果、ユーザの多くが非破壊検査用途を望んでいることが分り、模擬セキュリティと非破壊検査の両方の用途を満たすイメージング装置を実証実験機として開発することにした。

図 10 が実証実験機概念図、図 11 が写真である。実証実験機の大きさ重量は、約 83cm 幅×60cm 奥行き×82cm 高、約 70kg である。図 10 において、THz 光

源からのコヒーレンシの高い0.5THzのビームはBeam homogenizer (BH)により均一化されコリメータレンズを通して広がったビームとなる。AMC光源は直線偏光しているので、Wire grid (WG)と1/4波長板の組合せにより、サンプルの透過画像と反射画像を原理的に一度に取得することができる。また反射画像取得時、サンプルの真正面から見ることもできるので、画像が歪まないという特長もある。サンプル面に封筒サイズまで置くことができ、カメラの走査により画像を5枚つなげて約5cm幅×約20cm長の領域を撮像できるように設計・試作を行い、透過と反射の両画像を取得することができた。図12は、表示画面と金属物差しの反射画像を示す。この実証実験機にはサンプルを見る可視カメラも取り付けられている。図13と図14に剃刀の刃の反射画像と透過画像を示す。このように図10のように、光源が持つ直線偏光性を利用して、サンプルの反射画像と透過画像を原理的にほぼ一度に取得できるようになった。

今後同実証実験機を、セキュリティを始め非破壊検査等の用途探索に用いて、社会に貢献できる具体的な用途を開拓していく。

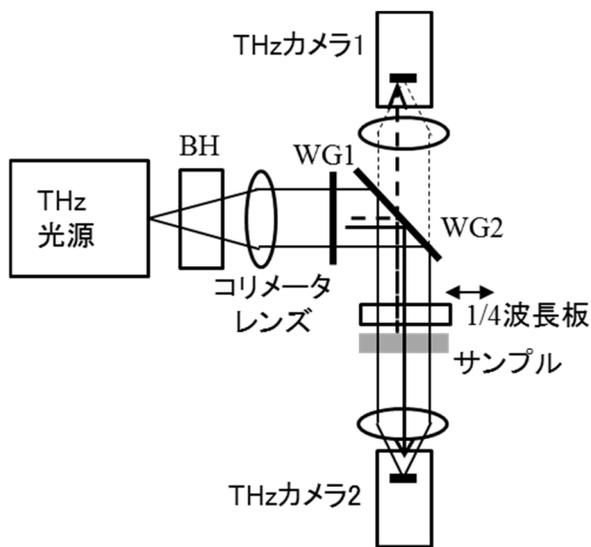
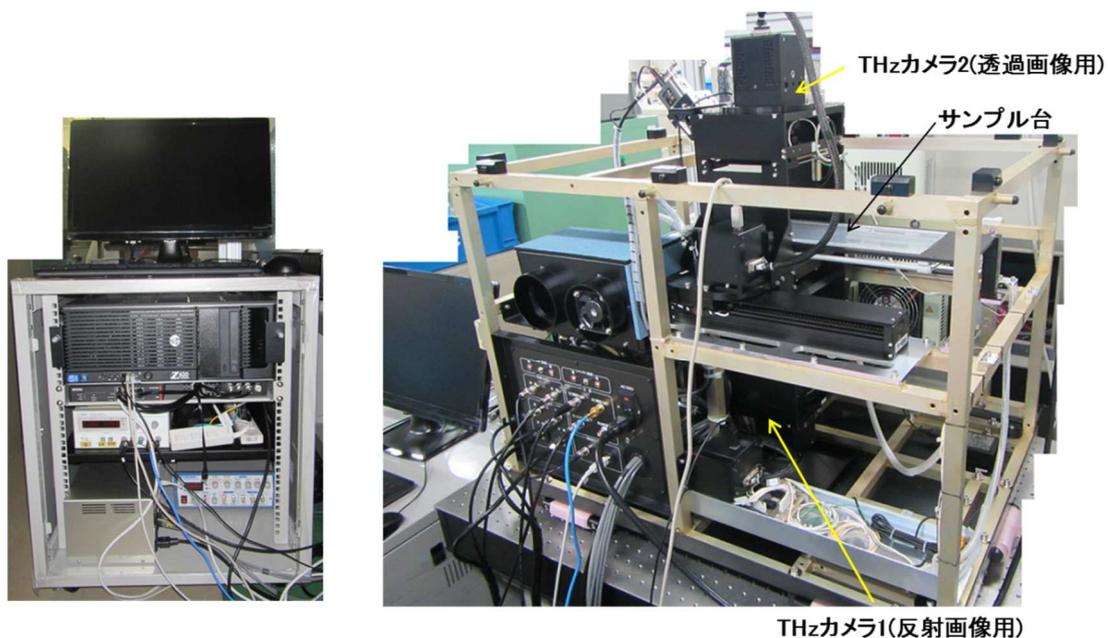


図 10. 実証実験機 の概念図 (BH : Beam homogenizer, WG: Wire grid)



コントローラ部

検出部

図 1 1. 実証実験機の写真。右側は検出部でカバーを外した状態である。

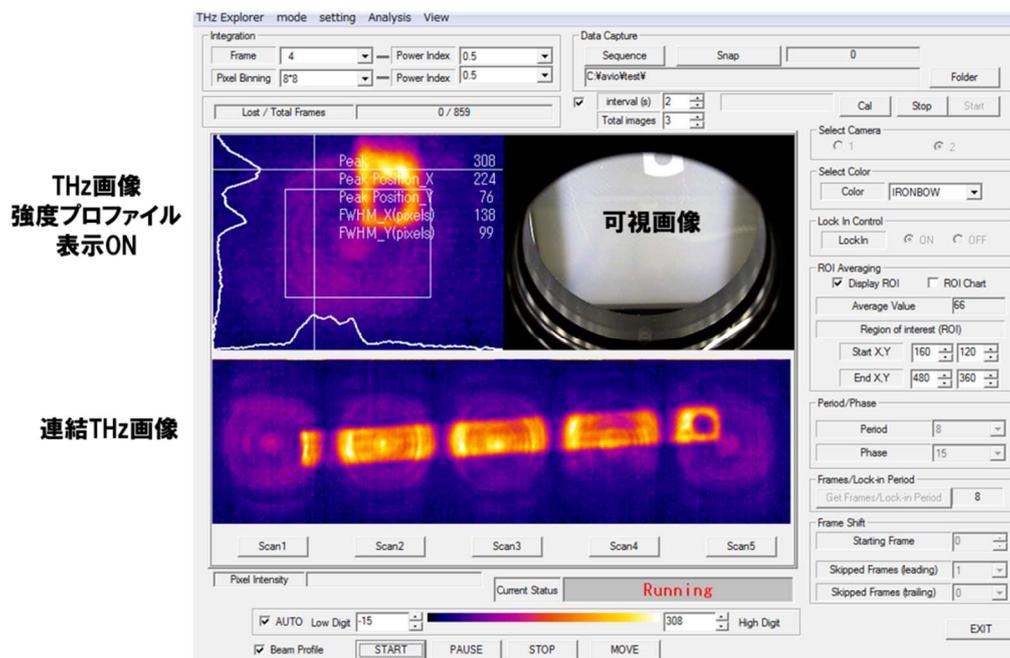


図 1 2. 表示画面と金属物差しの反射画像

(26-3)

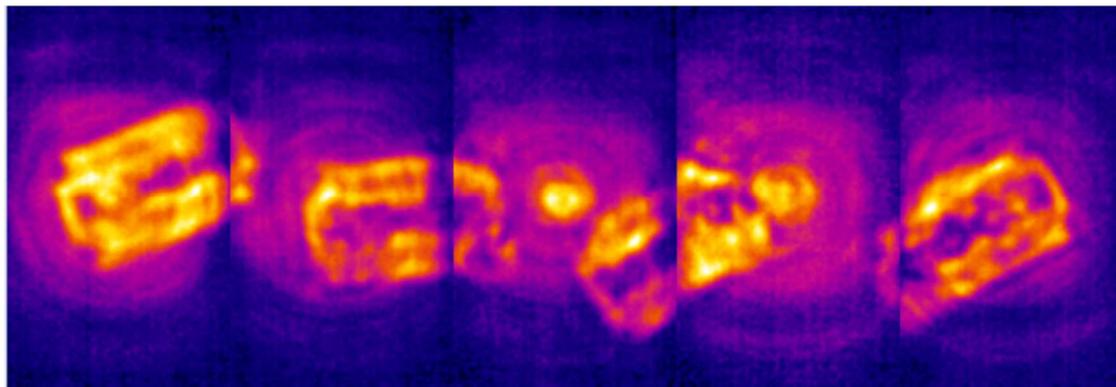


図13. 剃刀の刃の反射画像

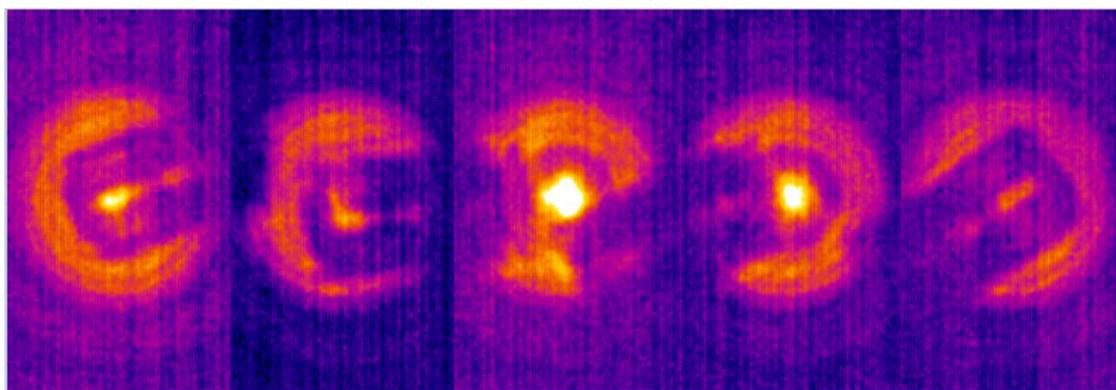


図14. 剃刀の刃の透過画像