

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24310069

研究課題名(和文)自由電子レーザーの新しい動作領域の開拓

研究課題名(英文)Search for a new operation mode of a free-electron laser

研究代表者

磯山 悟朗 (ISOYAMA, Goro)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：80125989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：阪大産研Lバンド電子ライナックを用いた遠赤外・テラヘルツ(THz)自由電子レーザー(FEL)の高度化と性能評価の研究を行なった。電子バンチの電荷量を4倍に増やすことが出来るライナック電子銃用のグリッドパルサーを開発して波長70 μm 、周波数4.2THz付近でFELマイクロパルスのエネルギーが従来の10倍である0.1 mJ以上の大強度THzビームを発生した。ライナック運転の安定性と再現性を向上することにより安定なFELビームを発生することが可能になり、FELによる高強度THzビームの利用研究を行なう基礎を確立した。

研究成果の概要(英文)：We have conducted studies for upgrade and performance evaluation of the far-infrared or terahertz (THz) free-electron laser (FEL) based on the L-band electron linac at ISIR, Osaka University. A grid pulser for the electron gun of the linac was developed to make charge of electron bunches four times higher and consequently a high intensity THz beam with micropulse energies higher than 0.1 mJ was successfully generated at wavelengths around 70 μm or frequencies around 4.2 THz, which is ten times higher than previous values obtained with FELs in the same frequency region. The linac has been also upgraded for stable and reproducible operation, so that the stability of the FEL beam becomes higher. Thus we have established bases for application experiments using the high intensity THz beam generated with the FEL.

研究分野：加速器科学

キーワード：量子ビーム FEL テラヘルツ 放射光

1. 研究開始当初の背景

自由電子レーザー (Free-Electron Laser, FEL) は電子加速器で発生した高エネルギー電子ビームのエネルギーを直接コヒーレント光のエネルギーに変換する装置で、通常のレーザーの動作が難しい X 線領域や赤外・テラヘルツ (THz) 領域で先端的な研究に利用されている。これら光スペクトルの両端では FEL の動作も容易ではないため、永年 FEL の開発研究が行われてきたが、短波長領域と長波長領域の FEL は未だに多くは無い。光共振器を用いる遠赤外・THz-FEL では、長波長領域で急激に増大する光の回折損失が最大の問題である。その結果、THz 波領域の FEL は世界でも 10 施設に達せず、国内で稼働中の THz-FEL は阪大産研 FEL のみである。

FEL のもう一つの課題は高輝度化である。FEL のパワーは、電子ビームの電流とエネルギーの積、即ち電子ビームパワーにレーザー光へのエネルギー変換効率を乗じて得られる。FEL のパワーは他の光源に比べて格段に高いが、エネルギー変換効率は長波長領域の数%から X 線 FEL の 10^{-4} 台と低く、電子ビームエネルギーの大部分を捨てている。更に光共振器から FEL を取出す効率も数%程度と低いため、波長 70~80 μm の FEL ミクロパルスエネルギーは最大でも 10 μJ 程度であった。

FEL の新しい動作領域の開拓とその基礎過程の研究はこれらの課題を解決するために必要不可欠と考えられるが、実験的な研究は世界的に見ても数少ない。

我々は、大阪大学産業科学研究所 (阪大産研) 附属量子ビーム科学研究施設の最大エネルギー 40 MeV の L バンド電子ライナックを用いて遠赤外線・THz 波領域で FEL の開発と高度化の研究を行っている。この FEL は波長 25 μm から 150 μm の範囲でパワー飽和に達する大出力で動作しており、FEL の特性測定などの基礎研究を行うと共に、動作波長領域を 300 μm (1 THz) まで長波長化する研究と THz 波利用実験研究の準備を進めている。

FEL の性能を決める重要な指標の一つは増幅率である。光共振器を使用する赤外 FEL の増幅率は 10~20 %程度であるが、阪大産研 FEL は、大強度電子ビームを加速することが出来る L バンド電子ライナックを使用しているため他の FEL と比べて格段に高い 60 %程度の FEL 増幅率を持つ。この増幅率を更に高めて高ゲイン領域の動作を実現すれば、FEL の波長領域の拡大や、FEL パワー飽和の壁を超える新しい動作状態を実現できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、阪大産研の L バンドライナックを用いた THz-FEL の高度化と FEL の基礎過程を研究することにより、高出力と高安定性を実現して THz-FEL の利用研究への道を拓

くことを目的とする。

(1) 高ゲイン FEL の実現

FEL は自発放射を種光にして発振が起こり、増幅回数が増加するに伴いパワーが指数関数的に増大する。FEL 増幅率は、指数関数領域のパワー発展より求めることが出来る。阪大産研 L バンド電子ライナックの電子銃を改造して電子ビームのピーク電流を高めることにより、現在 60 %程度である FEL ゲインを格段に高める研究を行い、高ゲイン FEL 動作を実現する。

(2) 新しい測定手法の開発

FEL のパワーや波長スペクトル、増幅率などを、自発放射領域から指数関数的増幅領域、飽和領域に至る広いパワー発展領域で計測する手法を開発する。

(3) FEL の基礎研究

新たに開発した計測手法により高ゲイン FEL の特性を評価してパワー発展の過程を明らかにする。FEL 増幅率とその変化を求めて、FEL のパワー飽和の機構を研究する。長波長領域で増大する回折損失を高ゲインで乗り越え、波長領域を 300 μm 、1 THz まで拡大する。

(4) FEL の高安定化

FEL の出力変動を低減するため、以前から行っている L バンドライナック高安定化の努力を継続する。

3. 研究の方法

(1) 阪大産研 L バンド電子ライナックの熱陰極電子銃用高速グリッドパルスを開発して、ピーク電流が 200 A に達する多バンチ電子ビームを発生し、高い増幅率を持つ FEL 動作を実現する。従来の FEL 運転では、熱陰極電子銃でピーク電流 0.6 A、パルス幅 8 μs の電子パルスを発生し、サブハーモニックバンチャー (SHB) システムでバンチが 9.2 ns 間隔で 8 μs 並ぶ電子ビームを作る。それを RF 周波数 1.3 GHz のライナック本体で最大エネルギー 20 MeV まで加速して、ウイグラーと光共振器よりなる FEL 装置に入射する。電子バンチの時間幅は 20~30 ps でピーク電流は約 50 A である。光共振器の長さは 5.53 m であり光が共振器を往復する時間は 36.8 ns である。他方、電子バンチ間隔は SHB システムの周波数で決まる 9.2 ns であるので、光共振器内に 4 個の FEL パルスが独立に存在する。FEL の増幅率は低ゲイン領域では電子ビームのピーク電流に比例して増加し、高ゲイン領域では更に非線形に増大するので、電子銃電流を増加すれば高い増幅率が得られる。しかし、現状でも加速管に入力する RF パワーの 4 分の 3 がビーム負荷として消費されるので、電子ビームのエネルギーと質を保ったままこれ以上入射電流を増やすこ

とはできない。

FEL 発振には光共振器内に 1 個の FEL パルスが存在すれば十分であるので、加速管のビーム負荷を変えずに電子ビームのピーク電流を増やすため、平均ビーム電流を一定に保ったまま加速管に入射する電子バンチを間引く手法がある。このために、パルス幅 5 ns で間隔 36.8 ns の連続パルスを発生する電子銃のグリッドパルサーを開発する。これにより電子バンチ間隔を 4 倍に増やし電荷量を 4 倍に高めることが出来る。この電子銃システムを開発して L バンドライナックに組み込み、高ゲイン領域で FEL 発振を実現する。

(2) 電子パルスの長さを変えることにより FEL 増幅回数を変えて、発振から飽和までの広いパワー発展領域で高ゲイン FEL の増幅率とその変化を高精度で求める手法を開発する。

光共振器を用いた FEL の増幅率は、1 回の増幅過程の前後のパワー比から 1 を減じた値として定義される。パルス動作をする FEL 光を高速検出器で計測してそのパワー発展より増幅率を求めることが出来る。我々は、波長が 50 μm より長い領域の FEL 計測に液体ヘリウム冷却 Ge:Ga 半導体検出器を用いている。この検出器の時間分解能は約 10 ns であり数 μs の FEL パワー立ち上り時間より十分に速いので計測したパルス波形より増幅率を求めてきた。

最近、この検出器の感度特性を広い強度範囲で測定したところ強い非線形性を示すことが分かり、この検出器を用いて測定した FEL の増幅率が誤りであることが分かった。

検出器の非線形性の問題を解決するために、熱型検出器であるシリコンボロメーターを使う。シリコンボロメーターは線形性が高いものの時間分解能がミリ秒程度であるのでマイクロ秒程度の FEL のパワー発展を直接計測することが出来ない。そこで、電子パルスの長さ、即ち FEL の増幅回数を変えて積分強度を求め、次にその差分からパワー発展を求め、更にパワー発展の差分からゲインを求める手法の開発を始めた。この方法は、何桁にも及ぶ FEL パワーの発展を測定することが出来る新しい手法である。しかし、多数回の測定からパワー発展を求め、パルス毎に変動する FEL 強度の差分を取るために、変動が大きい指数関数的パワー発展領域や、基本的に強度変化が少ないパワー飽和領域では精度の高い値を得るのが困難である。

もう一つの測定方法として、高速で高い線形性を持つ超電導ホットエレクトロンボロメーター (HEB) を使用する。速い時間応答性を持つ検出器で FEL のマクロパルスを測定することにより FEL のマイクロパルスを分離測定することが出来れば、FEL 増幅率は、隣り合う FEL パルス強度の比より容易に精度よく求めることが出来る。また、パワー発展に伴う増幅率の変化を容易に知ることが

出来る。電子パルスの長さを変えて積分型の検出器を用いて測定する前述の手法で問題となる、光共振器内に溜まったパワーの寄与を分離する必要ない。この測定には、ドイツ航空宇宙センター・惑星研究所で開発したホットエレクトロンボロメーター (HEB: 波長範囲が 50~300 μm で、時間分解能 0.5 ns 以下、感度が 10^{-10} W/Hz^{1/2}、ダイナミックレンジ 100 以上) を購入して使用する。この検出器で、FEL のマイクロパルス強度を区別して計測することができるので、単一の測定で FEL のパワー発展とゲインを求めることが出来る。

(3) 高ゲイン FEL の特性を活かして光共振器の回折損失が 60% に達する波長 300 μm 、1 THz での FEL 動作を実現する。

高い FEL ゲインを利用して波長領域を長波長側に拡大する。その時に問題になるのが光共振器の損失であるが、回折損失と光ガイディングの効果が競合すると考えられる。回折損失の計算値は、波長 300 μm で 60% 程度であるので、光ガイディングが無くても高ゲイン動作が実現すれば目標の 300 μm を実現することが可能であると考えられる。

(4) 未開拓の高ゲイン FEL で自発放射からパワー飽和までの広い範囲でパワー発展や増幅率の変化、波長スペクトルやマイケルソン干渉計による時間構造を測定することにより、高ゲイン FEL の物理を解明して、パワー飽和のメカニズムを実験的に研究する。

4. 研究成果

(1) FEL の高度化

FEL の高強度化

L バンド電子ライナック用にパルス幅 5 ns で 180 V の負パルスを 37 ns 間隔で 8 μs 発生する電子銃用グリッドパルサーを開発した。これにより電荷量 4 nC を持つ電子バンチを 37 ns 間隔で 8 μs 、加速管中のビーム負荷によりエネルギーが連続的に変化する先頭の 2 μs を除き FEL 発振に使用できる 6 μs の電子ビームを発生することに成功した。27 MHz モードと呼ぶこの新しい運転モードで FEL を運転したところ、従来の運転モードで得られる最大のマクロパルスエネルギーが 3.5 mJ であったものが、波長 70~80 μm 、周波数 3.7~4.3 THz 付近でマクロパルスエネルギーが 10 mJ を超える FEL 発振を実現し、その最大エネルギーは 27 mJ まで増大した。

27 MHz モードでは、マイクロパルス間隔が 4 倍に広がるため、マクロパルスの時間幅が同程度であるとすればマイクロパルスの数は 4 分の 1 に減少する。これらの効果を考慮すると、従来の運転モードでは最大 10 μJ のマイクロパルスエネルギーが 10 倍の 100 μJ に増大した。阪大産研を含む THz-FEL がこの波長付近で発生する FEL ミクロパルスの最大エネルギーは 10 μJ 程度であったため、ミクロ

パルスエネルギーが1桁増大したことになる。従来の理論では FEL でこのような大強度の THz 波を発生することは期待できないが、一部の理論で検討されていた FEL の超放射の可能性もある。

FEL ミクロパルスの時間構造に関しては、後述のように未確定ではあるが、マイケルソン干渉計で測定したコヒーレント長は 2 ps 以下である。ミクロパルスの時間幅を 2 ps とし、エネルギーが 0.1 mJ に対してピークパワーを計算すると 46 MW となる。焦点距離 12.5 mm の軸外し放物面鏡で集束した時のピークパワー密度は 0.7 TW/cm² となる。このテラヘルツ波が発生する電場は 2.2 GV/m、磁場は 7.4 T に達する。この高電場と THz 波の低い周波数により、物質中の電子を計算上 400 eV 近くまで加速することが出来る。THz-FEL としては世界最大強度を実現した。

THz 単一パルスの切り出し

FEL のマクロパルスは多数のミクロパルスにより構成される。27MHz モードでは、ミクロパルスが 37ns 間隔で約 100 個並びマクロパルスを構成する。時間分解 THz 分光では単一パルスが必要なため、FEL マクロパルスから 1 個のミクロパルスを取り出す研究を行った。THz 波が透過する GaAs 板に FEL ミクロパルスと同期したチタンサファイアレーザーの単一パルスを入射してプラズマミラーを短時間生成し、20ps 程度以下の長さを持つ THz-FEL ミクロパルス 1 個を切り出すことに成功した。

その他

当初研究の目標の一つに掲げた長波長化は、FEL の高強度化の研究を優先したため、本研究期間中には試みることが出来なかった。将来の課題として残された。

(2) FEL 特性の評価

パワー発展と増幅率の測定

ドイツ航空宇宙センター・惑星科学研究所との共同研究により、ナノ秒以下の時間分解能を持ち検出感度が高い超伝導ボロメータの窒化ネオジウム (NbN) 検出器と YBCO と呼ばれる高温超電導体を用いた検出器の 2 種類の検出器を用いて阪大産研 FEL の特性を測定する実験を行い、FEL の通常モードで発生する時間間隔が 9.2 ns の 4 個の独立な FEL パルスの振舞いを測定することに成功した。これらの高速検出器は感度は高く、高速応答をするが、ダイナミックレンジが 100 以上あるにもかかわらず、入力 THz 波強度に対して出力が線形に反応する領域が限られるため発振開始からパワー飽和までの広いエネルギー発展を測定することは困難である。

これに対して、従来から使用している Ge : Ga 半導体検出器に加えて、室温で使用できる高速検出器としてショットキーダイオードと高速焦電素子の性能を評価した。Ge : Ga 検出器は、検出感度が高く自発放射を検

出ることが出来るが、9.2 ns 間隔の FEL ミクロパルスを分解することは出来ない。ミクロパルス間隔が 37 ns に広がる 27 MHz モードで時間波形を測定したところ、Ge : Ga の単一パルスに対する応答は、立ち上がりは 10 ns 程度と速いが、立下りは数 10 ns と尾を引く非対称な応答をするため、27 MHz モードでも FEL ミクロパルスを完全には分離できないことが分かった。

ショットキーダイオード検出器と高速焦電素子の場合、検出感度は比較的 low、飽和領域に近い高パワー領域での使用に限られるが、波形取得用のオシロスコープより応答速度が速く、FEL ミクロパルスを分解するには十分である。両者ともダイナミックレンジは 2 桁弱であるが、ショットキーダイオードの場合には、マイクロ波用のダイオードと同様な応答を示すため、正確なパワー測定には校正が必要である。高速焦電素子の場合には、強度が強い時にマクロパルス波形が強度により変化する、即ち、熱の蓄積による感度変化によりミクロパルス強度を過剰に与える現象が見られた。そのため、検出器が線形に反応する範囲に入射強度を保つ必要が有る。室温で動作するこれらの高速検出器は何時でも FEL マクロパルス形状を測定することが出来るため FEL の基礎研究や利用研究に有用であるが、FEL の発振開始から飽和に至るパワー発展を測定することは出来ない。

FEL の増幅回数を変えてダイナミックレンジが広く線形に反応性が高いシリコンボロメータで FEL マクロパルスエネルギーを測定してマクロパルスのエネルギー発展と、ミクロパルスエネルギー、増幅率を求める新しい手法を開発した。その際に問題となる FEL マクロパルスの強度の短期変動と中・長期変化による誤差の増大を低減するため、増幅回数を周期的に変えてフーリエ変換により増幅回数の違いによるマクロパルスエネルギーの差を求める変調測定法を開発した。この方法で、パルス毎の短期的な変動を取り除くことができ、高い精度で自発放射からパワー飽和まで 8 桁に亘るミクロパルスエネルギーの発展と増幅率を精度良く求めることが出来た。この手法により測定した 27 MHz モードでの FEL 増幅率は 200~300% と通常モードの 60% と比べて電子パンチの電荷量に比例して増加することが分かった。

ミクロパルスの時間構造

FEL のミクロパルス長は 20 ピコ秒以下であると思われるが、前述の高速検出器では直接測定することは出来ない。そこでマイケルソン干渉計を整備して高い精度で干渉パターンの測定をした。ミクロパルスの時間幅は FEL の動作で大きく変わり、短ければ 2 ピコ秒又はそれ以下になることが分かった。

マイケルソン干渉計で測定する干渉波形は、コヒーレント長を計測しているに過ぎないという批判が有る。そこでミクロパルスの時間構造をフェムト秒チタンサファイアレ

ーザーを用いた電気光学サンプリング法により測定する研究を行ない、FEL ミクロパルスが更に短い時間幅を持つ複数の THz パルスからなること、この時間構造が FEL の光共振器長と伴に大きく変化することを見出した。

(3) ライナックの高安定化

FEL の基礎研究や利用実験に要求される FEL パルスの安定性は、電子ビームの発生源である電子ライナックの安定性に強く依存する。ライナックを構成する要素の中で、ライナックに高周波パワーを供給するクライストロン用電源(クライストロンモジュレーター、又はモジュレーター)の安定性が極めて重要である。しかしながらモジュレーターが発生する高電圧パルスピーク値の変動は数 10 ppm である。変動の原因は、高電圧・大電流パルスの発生に使用するサイクロンと呼ばれるガス封入放電管であると考え、静電誘導サイリスタを用いた 25 kV 6 kA の半導体スイッチを開発してサイクロンと交換した。その結果、FEL パルス変動が数 ppm に減少し、FEL パルスの短期的な強度変動が 2.4% (標準偏差) に減少した。

残された課題は中・長期的な変動である。ライナックの電源類の殆どを固体素子を用いた機器に更新したが、FEL モードで重要なサブハーモニックバンチャー用 RF 電源 3 台は真空管を使用した増幅器であった。これを毎年 1 台、3 台全てが半導体アンプに更新した。その結果、FEL 強度の中・長期的な変動が減少し、実験途中での再調整が不要になるだけでなく、朝にライナックと FEL を立ち上げる時に殆ど調整すること無しに立ち上げることが出来る。

(4) 利用研究

FEL が発生する大強度単色テラヘルツ波の利用研究を幾つかの THz 研究グループと共同で開始した。その一つは、軸外し放物面鏡を用いて集束した THz 波を有機分子結晶に照射し、分子間結合を強く振動励起することにより単一分子やイオンを外部に取り出す研究である。もう一つは同様の大強度 THz 波を有機分子の非晶質固体に照射して、熱ではなく電場により結晶化する研究である。これらの研究は期待した成果が出始めており、従来のフェムト秒レーザー励起 THz 波源の強度では不可能であった研究が、本研究により実現した大強度高安定 THz-FEL により可能になりつつある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 11 件)

K. Kawase, Y. Morio, Y. Kon, M. Fujimoto, S. Hirata, J. Shen, R. Kato,

A. Irizawa, G. Isoyama, S. Kashiwagi, Feed-forward control of the amplitude and the phase of a high-power RF pulse based on the overdrive technique, Nucl. Instr. Meth. **A679** (2012) 44-53, 査読有.

M. Fujimoto, R. Kato, K. Kawase, A. Irizawa, F. Kamitsukasa, H. Ohsumi, M. Yaguchi, G. Isoyama, S. Kashiwagi, S. Yamamoto, FEL Gain Measurement with a Novel Method, Proc. of the 34-th International Free Electron Laser Conference (FEL2012), Nara, Japan, August 26-31, 2012, pp. 515-518 (WEPD64).

K. Kawase, R. Kato, A. Irizawa, M. Fujimoto, S. Kashiwagi, S. Yamamoto, F. Kamitsukasa, H. Osumi, M. Yaguchi, A. Tokuchi, S. Suemine, G. Isoyama, The high-power operation of a terahertz free-electron laser based on a normalconducting RF linac using beam conditioning, Nucl. Instr. Meth. **A726** (2013) 96-103, 査読有.

A. Tokuchi, F. Kamitsukasa, K. Furukawa, K. Kawase, R. Kato, A. Irizawa, M. Fujimoto, H. Osumi, S. Funakoshi, R. Tsutsumi, S. Suemine, Y. Honda, G. Isoyama, Development of a high-power solid-state switch using static induction thyristors for a klystron modulator, Nucl. Instr. Meth. **A769** (2015) 72-78, 査読有.

S. Suemine, K. Kawase, N. Sugimoto, S. Kashiwagi, K. Furukawa, R. Kato, A. Irizawa, M. Fujimoto, H. Ohsumi, M. Yaguchi, S. Funakoshi, R. Tsutsumi, K. Kubo, A. Tokuchi, G. Isoyama, Grid pulser for an electron gun with a thermionic cathode for the high-power operation of a terahertz free-electron laser, Nucl. Instr. Meth. **A773** (2015) 97-103, 査読有.

N. Oda, S. Okubo, T. Sudou, G. Isoyama, R. Kato, A. Irizawa and K. Kawase, Image Reconstruction Method For Non-Synchronous THz Signals, Proc. of SPIE Vol. 9102, 910202-1~10, © 2014 SPIE · CCC code: 0277-786X/14/\$18 · doi: 10.1117/12.2049305, 査読無.

K. Kawase, M. Fujimoto, S. Funakoshi, K. Furukawa, A. Irizawa, G. Isoyama, R. Kato, K. Kubo, K. Miyazaki, S. Suemine, A. Tokuchi, R. Tsutsumi, M. Yaguchi, High Power Operation of the THz FEL at ISIR, Osaka University, Proceedings of FEL 2014, Basel, Switzerland, TUP073, pp. 528 - 531, 査読無.

G. Isoyama, M. Fujimoto, S. Funakoshi, K. Furukawa, A. Irizawa, R. Kato, K. Kawase, K. Miyazaki, A. Tokuchi, R. Tsutsumi, M. Yaguchi, F. Kamitsukas, Solid-State Switch for a Klystron Modulator for Stable Operation of a THz-FEL, *ibid.*, THP058, pp. 868 - 870, 査読無.

M. Nagai, E. Matsubara, M. Ashida, K. Kawase, A. Irizawa, R. Kato, and G. Isoyama, Ablation of organic crystals using picosecond THz free electron laser pulses, *IEEE Proc. of the 39th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and THz Waves*, September 14-19, 2014, The University of Arizona, Tucson, AZ, USA (IRMMW-THz2014), doi: 10.1109/IRMMW-THz.2014.6956352, 査読無.

G. Isoyama, M. Fujimoto, S. Funakoshi, K. Furukawa, A. Irizawa, R. Kato, K. Kawase, A. Tokuchi, R. Tsutsumi, M. Yaguchi, Recent Progress in Upgrade of the High-Intensity THz-FEL at Osaka University, *Proc. of FEL 2015*, Daejeon, Korea, TUP010, pp. 354 - 358, 査読無.
K. Kawase, M. Fujimoto, K. Furukawa, A. Irizawa, G. Isoyama, R. Kato, K. Kubo, Single Picosecond THz Pulse Extraction from the FEL Macropulse using a Laser Activating Semiconductor Reflective Switch, *ibid.*, TUP029, pp. 430 - 432, 査読無.

〔学会発表〕(計4件)

Irizawa, K. Kawase, R. Kato, M. Fujimoto, F. Kamitsukasa, H. Ohsumi, M. Yaguchi, S. Suga, G. Isoyama, Terahertz Free Electron Laser at Osaka University, *International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT 2012)*, Nara, Japan, November 27-29, 2012.

Irizawa, R. Kato, K. Kawase, M. Fujimoto, H. Osumi, M. Yaguchi, S. Suga, and G. Isoyama, Utilization Potential of the THz-FEL at ISIR for User-Experiments, *Sixth French Research Organizations - Tohoku University Joint Workshop on Frontier Materials (Frontier 2013)*, Tohoku University, Sendai, Japan, Dec. 1 -5, 2013, pp.86 (P-10).

N. Oda, T. Sudou, T. Morimoto, T. Ishi, S. Okubo, G. Isoyama, A. Irizawa, K. Kawase, R. Kato, Externally Triggered Terahertz Imaging For Microbolometer Focal Plane Array, *40th International Conference on*

Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Hong Kong, China, August 24-28, 2015 (T2A-2).

M. Nagai, E. Matsubara, M. Ashida, K. Kawase, A. Irizawa, R. Kato, and G. Isoyama, Non-thermal burst of organic powder using picosecond THz free electron laser pulses, *Optical Terahertz Science & Technology Conference*, San Diego, USA, March 8-13, 2015 (OST 2015).

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 撮像システム及び撮像方法
発明者: 小田直樹、須藤孝行、大久保修一、磯山悟朗、加藤龍好、入澤明典、川瀬啓悟
権利者: 日本電気株式会社、日本アビオニクス株式会社、国立大学法人大阪大学
種類:
番号: 特願 2013-30165
出願年月日: 2013年2月19日
国内外の別: 国内

○取得状況(計1件)

名称: 撮像システム及び撮像方法 (IMAGING SYSTEM AND IMAGING METHOD)
発明者: 小田直樹、須藤孝行、大久保修一、磯山悟朗、加藤龍好、入澤明典、川瀬啓悟
権利者: 日本電気株式会社、日本アビオニクス株式会社、国立大学法人大阪大学
種類:
番号: 14/183548
出願年月日: 2014年2月19日
国内外の別: アメリカ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

磯山 悟朗 (ISOYAMA, Goro)
大阪大学・産業科学研究所・教授
研究者番号: 80125989

(2) 研究分担者(平成26年度まで)

加藤 龍好 (KATO, Ryukou)
大阪大学・産業科学研究所・准教授
研究者番号: 20273708

(3) 研究分担者

川瀬 啓悟 (KAWASE, Keigo)
大阪大学・産業科学研究所・助授
研究者番号: 60455277

(4) 研究分担者

入澤 明典 (IRIZAWA, Akinori)
大阪大学・産業科学研究所・助授
研究者番号: 90362756