

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18133

研究課題名（和文）革新的マイクロ構造成形技術による完全光駆動電子加速器の実現

研究課題名（英文）Dielectric Laser Acceleration fabricated by 3D imprinting method

研究代表者

澁谷 達則（Shibuya, Tatsunori）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：50874525

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：レーザー加工による誘電体加速器構造の製作技術を新たに提案した。この誘電体加速技術は中赤外領域で動作することができ、中赤外で良質な光学特性を持つあらゆる材料に適用することができる。本研究では、この波長領域で動作可能な誘電体構造を異なる光学特性をもつシリコン、ダイヤモンド、サファイア、フッ化カルシウムで実現することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案した電子加速法は、固体で構成される粒子加速方法の中で最も高い加速電界を持つことが期待される方法である。これにより、煩雑な粒子加速器の小型化が期待できる高エネルギー物理学やがん治療などの分野での進展が期待される。

研究成果の概要（英文）：A new type of dielectric laser accelerating structure applied with laser material processing was proposed. This method works on the mid infrared wavelength regime, and it has no material limitation. In this experiment, we realized that 4 different type of materials (silicon, sapphire, diamond, calcium fluoride) is formed to accelerating structure for the regime of mid infrared operation.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：電子加速 フォトニック結晶 レーザー

1. 研究開始当初の背景

X線自由電子レーザーに代表される高輝度なコヒーレントX線源の登場は、材料科学や生命科学の目覚ましい発展をもたらし、現在ではタンパク質やナノ材料などの構造解析やダイナミクス解析などに欠かせない計測ツールとして、広く認知されている。このようなコヒーレントX線源におけるハードウェア上の問題点は、X線を生成するための電子加速システムと電子からX線へと変換するためのアンジュレータシステムが数百メートルを超過する巨大なシステムであることであり、設置場所や運転の簡便さ、装置維持の観点からの制約があり、利用機会が限られている。また、装置の煩雑性もあるため、人的リソースの制限も受ける。これらの制約を回避するためには、電子加速器システムそのものを1/100程度にまで小型化することができる新しい原理に基づく加速システムの開発が必要である。これにより、電子顕微鏡やX線結晶構造解析システムのような広範囲な利用機会の提供やシステムの組み合わせによる多機能化、さらには、新しいX線発生法などの基礎実験への展開などが期待できる。

2. 研究の目的

加速器における構造サイズは加速を励振する電磁波の波長(周波数)に依存しており、そのサイズを減少させるためには、電磁波領域から脱却して光領域での加速動作を実現する必要がある。この加速を励振するための光領域の構造体を製造するためには、数百ナノメートルから数マイクロメートルスケールでの微細加工技術が必要となり、一般的には、エッチング、マスク(レス)露光などの半導体製造プロセスが想定される。しかしながら、一般的な半導体プロセス技術には適用できる材料種、構造などに制限があり、選択できる加速器パラメータが制限される。そこで、本研究では、ドライプロセス技術であるレーザー加工技術が適用できる材料種に制限がないことに着目し、この技術を光波長領域の加速構造に適用することで、様々な誘電特性を持つ材料に対する高電界光加速技術の確立を目指す。

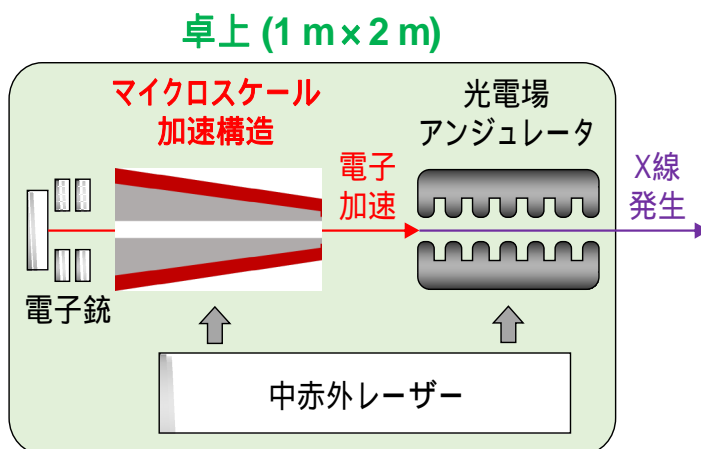


図 1: マイクロスケールの構造サイズを持つ光加速器を用いたコヒーレントX線源の概念図

3. 研究の方法

本研究では、レーザー加工技術の適用できる周波数帯を中赤外領域であると想定し(これ以上高い近赤外などの周波数領域の構造体を製造することが困難である)、中赤外光源の開発、中赤外で動作する加速構造体の決定、及び中赤外構造体のレーザー加工を行うこととした。まず、中赤外発生として、フェムト秒レーザー光源からの光パルスを用いて、光パラメトリック増幅システムの構築を目指した。これは、中赤外パルスの生成法(クロミウムや鉄、炭酸ガスなどの各種レーザー媒質によって強力なレーザーパルスが得られる)中で、開発にかかる時間的なコストを考慮して、比較的容易に中程度のパルスエネルギーを得られる光パラメトリック方式が合理的であると考えられたためである。

次に、これらの構造を用いた光波長程度の加速構造を時間領域差分法に基づくシミュレーションにより計算し、加速構造としての実現可能性を探究する。さらに、電子分析のための静電アナライザーを設計することで、電子分光実験の準備を進められる。

最後に、光加速の構造材料を検討した。これまでに光加速器に採用された材料は石英ガラス及びシリコンであり、加速実験を伴わない製造工程段階までのものであれば、ダイヤモンドが含まれる。本研究では、レーザー加工がドライで直接的なマイクロプロセスであることから適用材料への制限がなく、そのため、レーザー損傷閾値と誘電率の観点からのみ検討し、候補材料として、窒化アルミニウム、サファイア、ダイヤモンド(HPHT)、フッ化カルシウム、臭化カリウム、シリコン、塩化ナトリウム、石英ガラスを選定した。そのうち、高電界化が期待できることと化学的な安全性の観点から、サファイア、ダイヤモンド(HPHT)、フッ化カルシウム、シリコン、塩化ナトリウムを研究対象とした。これらの候補材料を用いてレーザー加工を行い、中赤外領域の構造を目指した。

4. 研究成果

まず、中赤外光を発生させるための光パラメトリック増幅システムの開発について報告する。はじめに、フェムト秒レーザー光源から放出された光パルスを2つに分岐し、一方の光パルスを

サファイア結晶に入射することで、コンティニューム光を発生させることに取り組んだ。サファイア結晶には光強度が強いほど、中赤外の長波長成分が拡大するが、一方でサファイア自体がレーザーによって損傷することが問題であった。そこで、レーザー光のサイズとサファイア結晶の長さを最適化することで、光パルスの相互作用長を制御し、サファイア結晶の損傷無しに波長 800 nm の基本波は 1400 nm 付近まで連続的にスペクトル拡大されたことを分光して確認した。次にこの

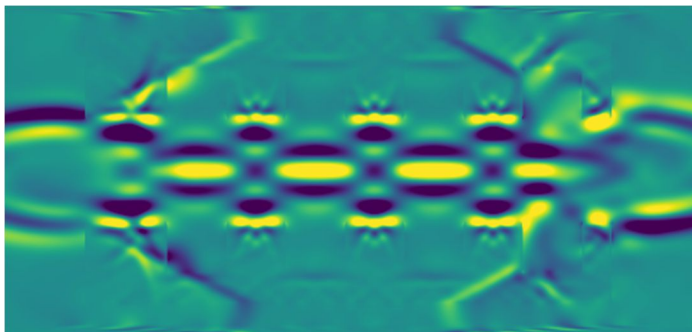


図 2: 時間領域差分法によるシミュレーションの結果の一例。2 対の回折格子間の中にギャップ毎に反転した正の加速位相を示した。

コンティニューム光ともう一つの光パルスを BBO 結晶上で時空間的に重畳し、位相整合条件を満たすことで、光パラメトリック発生を行い、アイドラー光が最大波長 2400 nm まで位相整合角の調整によって拡大することを確認した(測定器の限界によって制限されている。)。次にこの光パラメトリック過程で発生したシグナル光とアイドラー光を時空間的に分割したのちに、AGS 結晶上で再び時空間的に重畳することで波長 10 μm 帯の光パルスの発生に挑戦したが、結果的にはこの光パルスの発生を確認することができなかった。そのため、研究当初予定していた研究計画を変更し、波長 2400 nm 近傍で、軸対称光学素子を用いた縦電場の発生実験を行った。波長 10 μm 帯の光パルスが確認できなかった理由としては、手持ちの検出器の感度が十分でなかったために、位相整合角の探索が困難であったためであると考えられる。今後の対策としては、GaAs 結晶などのより変換効率の高い結晶を用いることや検出法の工夫が必要である。

次に、中赤外領域の電子加速構造のシミュレーションを行った。加速器構造には主に、回折格子型とピラー型の 2 つが存在する。回折格子型は構造が比較的シンプルであると同時にレーザー加工によって作成することが比較的容易な構造を持っていることから、本研究では、まず、回折格子型を念頭に研究を展開した。まず、加速器構造を最適化するために、有限差分時間領域 (FDTD) 法を用いて、加速器構造の計算を行った。その計算結果を図 2 に示す。計算構造は計算コストを軽減するために 2 次元的に行った。まず、設定空間は 25 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ の空間を用意し、波長 10.6 μm の光が屈折率 2.0 の媒質に入射することを仮定した。図 2 では 2 対の回折格子構造における回折構造部を向かい合わせに 4 μm の距離に配置し、2 つの回折格子構造の背面方向からそれぞれレーザー光パルスを入射した際、2 つのパルスが格子対の中心で重ね合わさった際の結果を示した。格子数が 4 つの回折格子全てにおいて、電場が反転して加速位相が可視化されている。これにより、波長 10.6 μm 近傍で回折格子型光加速構造が機能することが確認できた。電磁波シミュレーションによる構造決定ができたことで加速動作を保証することができた。今後は、粒子トラッキング計算なども適用することで、Alternating Phase Focusing スキームのような、さらに高度な加速スキームの適用を目指してゆく。

最後に、レーザー加工による加速構造の製作実験を展開した。実験には波長 800 nm、パルス幅 100 fs、繰り返し 1 kHz、出力 3 W の Ti: sapphire laser ベースのレーザー加工システムを採用した。これにより、直接ドライ方式の描画を行うことが可能となり、前述したような各候補材料における加速構造を図 3 のように得た。これらの結果のうち、直接的なレーザー描画に対してはシリコン以外の材料で良好な結果が得られた。シリコンの場合、レーザー加工によって発生するアブレート粉末が再堆積することで表面にスクラッチ型の損傷が見られることや加工溝のエッジ部に微小なクラックが観測された。また、サファイアについては表面の硬度が高いことでシリコンのような損傷は見られなかったが、一方で、描画の直線度が低い結果となった。そこで、追加工の技術として、レーザー光照射技術とエッチング技術を組み合わせたレーザー化学エッチング加工による検討を行った。まず、表面が光学グレードまでに研磨されたサファイアを用意し、表面から奥行方向に向かってレーザーの集光点を走査することでレーザー光による変質状態を形成した(先行研究によると、変質部はアモルファス化している状態である)。その部分を含む基盤全体をフッ化水素酸中に含浸するというエッチング処理を施した。これにより、レーザー照射部分にのみエッチング穴が形成され、達成された加工最小サイズとしては、直径 900 nm の微細孔加工を実現することができた。これにより、サファイアの直接的な加工によって光加速構造の幾何学的な精度が低くとも、エッチングプロセスによってミクロンからサブミクロンスケールでの構造の修正が可能であることを示した。さらに、今回のレーザー化学エッチング加工において、スポットサイズを決定した主な要因は最終的に使用した対物レンズの開口数 (Numerical Aperture) であったが、実験に用いた対物レンズの開口数は 0.7 であり、実験全体のセットアップをさらに最先端なものにすることで開口数 1.2 から 1.4 程度まで高めることが可能となる。これにより、スポットサイズをさらに 1/2 程度まで小さくすることができる。さらに、本実験では、フェムト秒レーザーとしては、固体増幅器ベースとなる Ti: sapphire laser であったが、理想的には、空間モードが理想的なガウシアンであるシングルモードファイバーレーザーベースのレーザー加工を適用するべきであり、さらに 1/2 程度まで加工サイズが小さくなること

期待できる。つまり、これらの組み合わせによってスポットサイズは 250 nm 前後まで小さくなることが想定される。一般的に、加工による表面精度は加工した直径の 1/10 以下となるため、加速器として用いる電磁波周波数の 1/100 となる十分な加工精度を実現することができる。また、はじめに候補材料として挙げていた塩化ナトリウムに関しては、直接的なレーザー加工処理を施したところ、結晶が白濁化して微細加工を施すことが困難であった。これはエキシトンによる中間バンドの形成が原因であると考えられる。レーザー損傷閾値としても、 0.1 J/cm^2 に満たなく、候補材料とはなり得ないことがレーザー加工の観点および励振電界強度の観点から分かった。これらの結果により、これらの新規材料におけるレーザー加工において単結晶特有の難加工性に対する新たな知見が得られた。これらの研究方向性は研究当初予定していたレーザー加工による加速構造成形と加速の原理実証装置の開発という方向性を踏襲しており、研究の発展可能性が期待できる。

本研究の結論として、中赤外光の発生が 2400 nm まで発生させることができた一方で、さらなる中赤外領域の光発生が制限されたことによって、中から遠赤外線領域での加速実験の実現には至らなかった。一方で、加速構造としては、炭酸ガスレーザーを想定した(炭酸ガスレーザーの発振波長: $10.6 \text{ }\mu\text{m}$)加速構造を異なる 4 つの材料を用いて実現することができた。これにより、中赤外領域で動作する光加速器構造をシミュレーションおよび製造方法の観点から、確立できた。今後、中赤外領域で動作する、レーザー加工で成形された加速器構造の登場が期待できる結果となった。

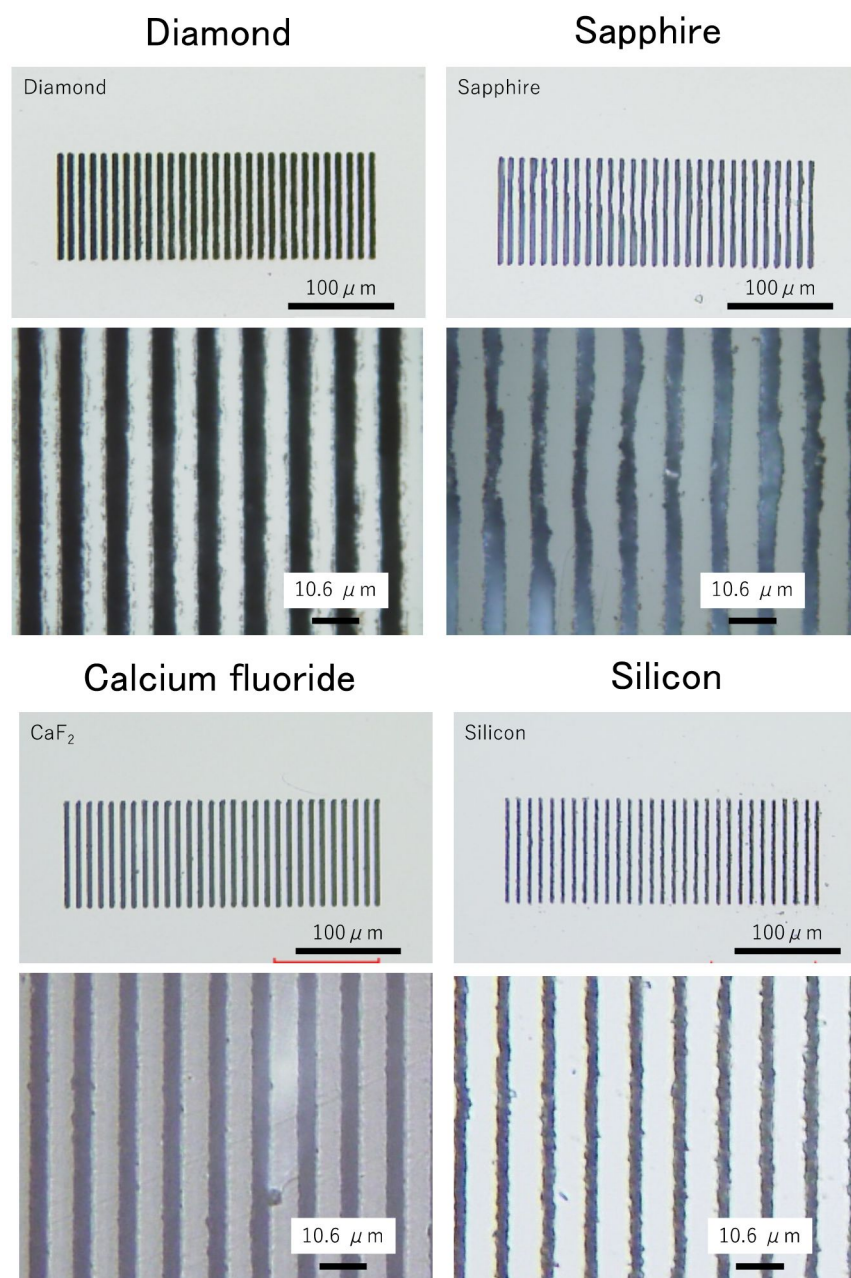


図 3: レーザー加工によって製造された誘電体加速構造。材料は、ダイヤモンド、サファイア、フッ化カルシウム、シリコンを用いて、構造周波数はレーザー波長 $10.6 \text{ }\mu\text{m}$ に最適化された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 澁谷達則
2. 発表標題 フェムト秒光加工によるレーザー誘電体加速構造の製作
3. 学会等名 日本加速器学会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------