

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360022

研究課題名(和文) レーザ励起による焦電体からの電子放出と微小X線源への応用

研究課題名(英文) Electron emission from pyroelectric crystal excited by laser light and its miniature X-ray source application

研究代表者

高井 幹夫 (TAKAI, Mikio)

大阪大学・極限量子科学研究センター・名誉教授

研究者番号：90142306

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円、(間接経費) 4,470,000円

研究成果の概要(和文)：焦電体結晶の自己分極をレーザー光により制御し、高電圧の発生と表面補償電荷の放出を利用した電子源の開発、および対向電極を用いた微小X線源への応用を試みた。焦電効果の制御にレーザー光を用いることで、X線源の小型化、高速化、低消費電力化を可能とし、光ファイバーと同時に用いることで内視鏡への組み込みも可能となる。

0.89 WのNd:YLFレーザー光の結晶への照射では、最大234 MBq、平均78 MBqのX線量を得た。また、5 Wのファイバーレーザー光では、最大線量が9.8倍、平均線量が3.2倍となった。また、内視鏡への組み込みのためのX線ヘッドの構造設計を行った。

研究成果の概要(英文)：A miniature X-ray source using electron emission from a pyroelectric crystal excited by a laser light was developed without an external high voltage power supply. Electron emission from the crystal and X-ray generation from the counter electrode were observed with a continuous wave (CW) infra-red (IR) laser light. The peak and average X-ray yields using a 0.89 W CW Neodymium-doped yttrium lithium fluorides (Nd:YLF) laser light were 234 and 78 MBq, respectively, while those using a 5 W CW fiber laser light were 9.8 and 3.2 times higher than those using a CW Nd:YLF laser light. The miniature X-ray source capsule was designed for mounting on an endoscope.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 薄膜・表面界面物性

キーワード：微小X線源 焦電体 分極 焦電係数 レーザ励起 電子放出 X線分析応用 X線2次元イメージング

## 1. 研究開始当初の背景

従来の X 線源では、電子源および高電圧加速に付加電源を必要としており、X 線イメージングや局所部位への照射・診断には熱陰極と電子の高電圧加速による励起 X 線を用いた大面積照射が利用されている。これらの X 線源では、不要部位への照射による被爆等の問題点があるが、これを回避する点光源的な局所照射可能な X 線源は実用化されていない。本研究グループは、電界電子放出を用いた種々の電子源の開発と応用を中心とした真空ナノエレクトロニクス分野の研究に携わってきており、応用の一つとして、局所部位の照射・分析・診断ができ、内視鏡やカテーテルに装着できる冷陰極を用いた微小 X 線源の開発に着眼した。しかし、冷陰極を用いた X 線源であっても、熱陰極を用いた場合と同様に電界放出した電子を加速するため、高圧電源と高耐電圧ケーブルが必要である。そこで、自発分極による高圧発生が可能な焦電体結晶に注目した。

焦電体結晶は、キュリー点以下では自発分極により強誘電特性を示すが、熱平衡状態では表面補償電荷により自発分極が打ち消されている。この結晶に数 10 の温度変化を与えることにより、自発分極を制御し非補償の分極による高電圧発生(焦電効果)や対向電極による電子の電界放出が可能で、ペルチェ素子を温度制御に用いた手のひら大のポータブル X 線源が実用化されている。

本研究では、ペルチェ素子等を用いた温度制御の欠点である制御レスポンスの悪さ、電気配線の必要性、小型化の限界等の問題点を解決するために、結晶の自発分極をレーザー光で制御することにより、高電圧の発生と微小焦電体結晶表面からの電子放出、およびこれを利用した微小 X 線源と X 線イメージング装置技術を開発する。この方法によれば、外部印加電源を必要とせず、数 10 kV 以上の高電圧発生と電子放出および対向電極からの X 線放出が可能となるため、ファイバーレーザーを用いれば、局所部位への X 線照射・診断分析や内視鏡等への組み込みによる治療照射・診断が可能な X 線源が実用化できる。

## 2. 研究の目的

焦電体結晶の自発分極をレーザー光により制御し、高電圧の発生と表面補償電荷の放出を利用した電子源および微小 X 線源応用を試みる。ペルチェ素子等による焦電体の温度制御では無く、レーザー光制御により、分極変化の高速応答や外部高圧電源を必要としない高電圧発生により電界電子放出と電子励起 X 線を利用した X 線源は、数ミリサイズの超小型で超低消費電力の X 線源となり、微小焦電結晶とファイバーを通したレーザー光を用いることにより、局所部位への選択的照射・診

断分析や内視鏡ヘッドへの装着が可能と考えられ、生体内局所照射治療や診断への応用も可能となる。

KrF エキシマレーザー、Nd:YLF レーザーおよびファイバーレーザーを用いて種々のサイズの焦電体結晶を励起制御し、電子放出と X 線量の真空依存性、放出電流強度、放出 X 線強度、X 線放射発散角の基礎特性を明らかにする。さらに X 線強度の 2 次元イメージングを行い、局所部位の可視化と局所照射・分析技術の確立を行う。また、得られた結果を基に、内視鏡への取付を前提とした、光ファイバー先端で脱着可能な焦電体 X 線ヘッドの設計を行う。

## 3. 研究の方法

ペルチェ素子による焦電特性制御の欠点である制御レスポンスの悪さ、電気配線の必要性、小型化の限界等の問題点を解決するために、結晶の自発分極をレーザー光で制御する。焦電体結晶は焦電係数が大きく単結晶 Z カットで高電圧発生に適した LiNbO<sub>3</sub>(40 μC/m<sup>2</sup>K) および LiTaO<sub>3</sub>(190 μC/m<sup>2</sup>K)を用いる。高電圧発生と電子放出の基礎パラメータである励起レーザー波長、レーザー強度、焦電体結晶サイズ、雰囲気真空度、対向電極距離等を明らかにする。励起レーザーは、焦電体結晶が光吸収端を持つ UV レーザー(KrF エキシマレーザー: 266 nm) と赤外レーザー(Nd:YLF レーザー: 1047 nm、ファイバーレーザー: 1062 nm)を用いるが、LiNbO<sub>3</sub> と LiTaO<sub>3</sub> は 1 μm 程度の赤外光を吸収しないため、カーボンのバックコーティングを施す。これらの基礎データをもとに、微小 X 線ヘッド設計のパラメータ抽出を行う。

以上の実験を通して、ペルチェ素子を用いた従来技術に対して電子放出および X 線放出の制御レスポンスの優位性を持ち、電気配線不要で超小型の X 線ヘッドの設計を行う。

## 4. 研究成果

電子放出および X 線計測装置に焦電体結晶を取り付け、高電圧発生と電子放出の基礎パラメータである励起レーザー波長、レーザー強度、焦電体結晶サイズ、雰囲気真空度、対向電極距離等を明らかにした。励起レーザーは、パルス UV レーザー (KrF エキシマレーザー: 266 nm) と CW 赤外レーザー (Nd:YLF レーザー: 1047 nm) を用いた。

0.89 W (142 W/cm<sup>2</sup>) の Nd:YLF レーザーで厚さ 4 mm、直径 5 mm の円柱状 LiTaO<sub>3</sub> 結晶の-Z 面を照射すると、レーザー照射開始から 10 秒後には、+Z 面の温度が約 20 上昇、焦電効果により発生した高電圧で電子放出が始まった。また、電子放出と同時に銅対向電極からの X 線が観測された。その後、結晶からの放出電流と銅対向電極からの X 線発生量は徐々

に減少した。レーザ照射開始から 120 秒後のレーザ停止と同時に電子放出と X 線発生は停止した。この結果は、ペルチェ素子を用いた焦電体 X 線源では、加熱開始から X 線発生までに数十秒の時間が必要であり、加熱停止後も、同程度の時間 X 線の発生が継続することに対して、レーザによる焦電効果の制御が時間応答に優れていることを示している。

次に、ターゲットに蛍光体を設置し、焦電体表面からの放出電子のパターン評価を行い、結晶と銅対向電極間距離が 6 mm でスポットサイズが最小になることを明らかにした。ターゲットの蛍光体を銅薄膜に変更し、発生する X 線の計測を行ったところ、蛍光体でスポットサイズが最小となった焦電体結晶・ターゲット間が 6 mm で X 線の強度 (図 1)、エネルギー共に最大となった。これらの結果は、結晶エッジ部分の電界が局所的に高くなり静電レンズとして作用すること (自己集束) が原因であり、小型の X 線源を作製する上で不可欠な結果である。

LiNbO<sub>3</sub> 結晶を用いた場合の最大 X 線エネルギー

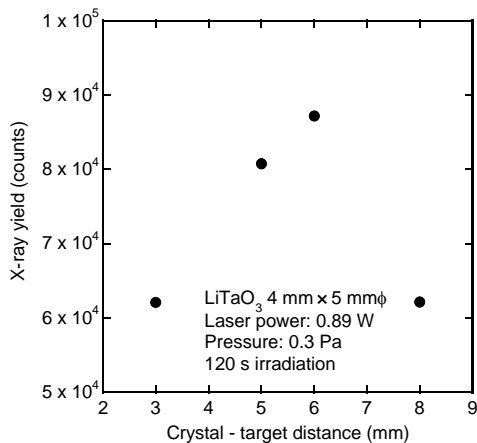


図 1 焦電体結晶・銅対向電極の距離と X 線量の関係

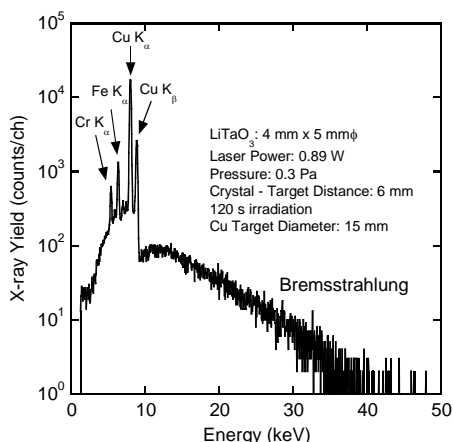


図 2 LiTaO<sub>3</sub> 結晶を用いた X 線源のエネルギースペクトル

ギーは、36 keV、LiTaO<sub>3</sub> 結晶を用いた場合には、47 keV であった (図 2)。この最大エネルギーの差は、LiTaO<sub>3</sub> の焦電係数が LiNbO<sub>3</sub> と比較し大きいためである。0.89 W (142 W/cm<sup>2</sup>) の Nd:YLF レーザ照射での LiTaO<sub>3</sub> 結晶を用いた場合の最大および平均 X 線量は、234 MBq、78 MBq であった。

5.0 W のファイバーレーザ励起による X 線発生では、0.89 W の Nd:YLF レーザ励起の場合と比較し、平均 X 線量が 3.2 倍、ピーク X 線量が 9.8 倍となった。

二次元イメージングの検証のため、これまでに明らかにした最適条件で、X 線の大气取り出しを試みた。90 秒間のレーザ照射による加熱と、90 秒間のレーザ停止による冷却サイクルにより、大気中に取り出した X 線で膜厚の異なる金属試料の透過イメージングが可能であった。

以上の基礎データを基に内視鏡への取付のため、光ファイバー先端で脱着可能なガラスハウジングを用いた焦電体 X 線ヘッドの設計を行った。

## 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 5 件)

Kosuke Nakahama, Michiaki Takahashi, Satoshi Abo, Fujio Wakaya, and Mikio Takai, "Effect of electron focusing in x-ray source using LiTaO<sub>3</sub> crystals excited by neodymium-doped yttrium lithium fluoride laser light", Journal of Vacuum Science & Technology B, 査読有, Vol. 32 (2014) 02B108-1-5, DOI: 10.1116/1.4864307

阿保 智, 中浜 公介, 高橋 理明, 若家 富士男, 高井 幹夫, "赤外レーザ励起による焦電結晶からの電子放出と X 線源への応用", 信学技報 (IEICE Technical Report), 査読無, Vol. 113 (2013) 41-45,

<http://www.ieice.org/ken/paper/20131023vBg8/>

Mikio Takai, Kosuke Nakahama, Eiichi Kaga, Toshiya Kisa, Satoshi Abo, Fujio Wakaya, "Development of a tiny X-ray source controlled by laser light for medical application", Technical Digest of 25th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IEEE Catalog No. CFP12VAC-PRT), 査読無, (2012) 68-69

Kosuke Nakahama, Eiichi Kaga, Toshiya Kisa, Satoshi Abo, Fujio Wakaya, Mikio Takai, "Electron emission from LiTaO<sub>3</sub> crystal excited by Nd:YLF laser light and its X-ray source application",

Technical Digest of 25th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IEEE Catalog No. CFP12VAC-PRT), 査読無, (2012) 44-45

E. Kaga, T. Kisa, K. Nakahama, S. Abo, F. Wakaya, M. Takai, "Electron emission from  $\text{LiTaO}_3$  and  $\text{LiNbO}_3$  crystals excited by Nd:YLF laser light and its X-ray source application", Proceedings of the 24th International Vacuum Nanoelectronics Conference, 査読無, (2011) 109-110

〔学会発表〕(計 14件)

阿保 智、上里 鷹寛、若家 富士男、高井 幹夫、"Nd:YLF レーザ励起による焦電結晶からの電子放出と X 線源への応用"、第 11 回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム、2014 年 3 月 5 日~6 日、大阪大学中之島センター(大阪府大阪市)

阿保 智、中浜 公介、加賀 英一、木佐 俊哉、高橋 理明、若家 富士男、高井 幹夫、"LiTaO<sub>3</sub>/LiNbO<sub>3</sub>の焦電効果を使った X 線発生"、2013 年度 第 3 回光材料・応用技術研究会、2013 年 11 月 15 日、関西セミナーハウス(京都府京都市)

阿保 智、中浜 公介、高橋 理明、若家 富士男、高井 幹夫、"赤外レーザ励起による焦電結晶からの電子放出と X 線源への応用"、電子情報通信学会 電子デバイス研究会、2013 年 10 月 22 日~23 日、北海道大学エンレイソウ(北海道札幌市)

Satoshi Abo, Kosuke Nakahama, Michiaki Takahashi, Fujio Wakaya, and Mikio Takai, "Electron emission from pyroelectric crystals excited using laser light and its X-ray source application", The 5<sup>th</sup> Japan-Korea Vacuum Nanoelectronics Symposium, 4th - 5th, October, 2013, Hana square, Korea University, Seoul, Korea

K. Nakahama, M. Takahashi, S. Abo, F. Wakaya, M. Takai, "Effect of electron focusing in X-ray source using  $\text{LiTaO}_3$  crystal excited by Nd:YLF laser light", The 26th International Vacuum Nanoelectronics Conference, 8th - 12th, July, 2013, Hotel Roanoke, V.A., USA  
中浜 弘介、加賀 英一、木佐 俊哉、阿保 智、若家 富士男、高井 幹夫、"レーザ励起による  $\text{LiTaO}_3$  からの電子放出と X 線源への応用(III)"、第 73 回応用物理学学会学術講演会、2012 年 9 月 11 日~14 日、愛媛大学・松山大学(愛媛県松山市)

Mikio Takai, Kosuke Nakahama, Eiichi Kaga, Toshiya Kisa, Satoshi Abo, Fujio Wakaya, "Development of a tiny X-ray

source controlled by laser light for medical application", The 25th International Vacuum Nanoelectronics Conference, 9th - 13th, July, 2012, Hyatt Regency Jeju Hotel, Jeju, Korea  
Kosuke Nakahama, Eiichi Kaga, Toshiya Kisa, Satoshi Abo, Fujio Wakaya, Mikio Takai, "Electron emission from  $\text{LiTaO}_3$  crystal excited by Nd:YLF laser light and its X-ray source application", The 25th International Vacuum Nanoelectronics Conference, 9th - 13th, July, 2012, Hyatt Regency Jeju Hotel, Jeju, Korea

中浜 弘介、加賀 英一、木佐 俊哉、阿保 智、若家 富士男、高井 幹夫、"周期的なレーザ照射による  $\text{LiTaO}_3$  からの電子放出と X 線源への応用"、第 59 回応用物理学会関係連合講演会、2012 年 3 月 15 日~18 日、早稲田大学早稲田キャンパス(東京都)

真鍋 知弥、加賀 英一、阿保 智、若家 富士男、高井 幹夫、"CNT 電子源およびレーザ励起焦電体を用いた X 線源の開発"、第 9 回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム、2012 年 3 月 5~6 日、大阪大学中之島センター(大阪府)

加賀 英一、中浜 弘介、木佐 俊哉、阿保 智、若家 富士男、高井 幹夫、"レーザ誘起焦電結晶からの電子放出と X 線源への応用"、電子情報通信学会 電子デバイス研究会、2011 年 10 月 20 日~21 日、八戸ポータルミュージアム「はっち」(青森県)

中浜 弘介、加賀 英一、木佐 俊哉、阿保 智、若家 富士男、高井 幹夫、"赤外レーザ励起による  $\text{LiNbO}_3$  と  $\text{LiTaO}_3$  からの電子放出と X 線源への応用"、第 72 回応用物理学学会学術講演会、2011 年 8 月 29 日~9 月 2 日、山形大学小白川キャンパス(山形県)

E. Kaga, K. Nakahama, T. Kisa, S. Abo, F. Wakaya and M. Takai, "Electron emission from Pyroelectric crystals excited by Nd:YLF laser light and their X-ray source application", The 3rd Japan-Korea Vacuum Nanoelectronics Symposium, 26-28 August 2011, Seoul, Korea

Eiichi Kaga, Toshiya Kisa, Kosuke Nakahama, Satoshi Abo, Fujio Wakaya and Mikio Takai, "Electron emission from  $\text{LiTaO}_3$  and  $\text{LiNbO}_3$  crystals excited by Nd:YLF laser light and their X-ray source application", 24th International Vacuum Nanoelectronics Conference, 18th-22nd July 2011, Wuppertal, Germany

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0件）

取得状況（計 0件）

〔その他〕

ホームページ等

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高井幹夫 (TAKAI, Mikio)

大阪大学・極限量子科学研究センター・名誉教授

研究者番号：90142306

### (2) 研究分担者

若家 富士男 (WAKAYA, Fujio)

大阪大学・極限量子科学研究センター・准教授

研究者番号：60240454

阿保 智 (ABO, Satoshi)

大阪大学・極限量子科学研究センター・助教

研究者番号：60379310

### (3) 連携研究者

石田稔幸 (ISHIDA, Toshiyuki)

アドテックサイエンスリサーチ