

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00145

研究課題名(和文) NVセンター多量子ビット形成を目指したレーザー冷却イオン超精密単一注入技術の実現

研究課題名(英文) Realization of ultraprecise single-ion implantation using laser-cooling for formation of NV-center arrays

研究代表者

齋藤 勇一 (Saitoh, Yuichi)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先進ビーム利用施設部・部長

研究者番号：40360424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：ダイヤモンド中の点欠陥の一つである窒素(N)-炭素空孔(V)の対(NVC)をイオン注入により作製する新たな技術として、Nイオンを標的に1個ずつ、ナノスケールの位置精度で照射する技術開発に関する研究を行った。具体的には、Caイオンとの共同冷却により超低エミッタンスでNイオンを引き出すことができる線形ポルトラップ型(LPT)イオン源を開発し、Nイオンの共同冷却に成功した。また、トラップに捕捉されたCaイオンを連続的に1個ずつ取り出すことに成功した。加えて、取り出したNイオンを加速すると同時に、ナノメートルサイズに収束可能な加速レンズを設計、製作し、室温で動作する量子ビットの作製に目途を立てた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1個のイオンを10数keVのエネルギーでナノメートルの位置精度で注入する技術の開発に目途を立てたことにより、これまで多くの材料開発に利用されてきたイオン注入法の注入精度を極限まで高めることに貢献し、量子もつれ等を利用する量子材料開発の扉を開く成果である。また、本研究開発により、室温で動作する量子コンピュータや量子暗号通信、超高感度量子センサへの応用の期待が高いダイヤモンド中の窒素-空孔センターの多量子ビット化を大きく前進させる。

研究成果の概要(英文)：As a new technology for producing nitrogen atom (N) - carbon atom vacancy (V) pairs (NVC), which are one of the point defects in diamond and are expected to operate at room temperature as a quantum device, by ion implantation, we carried out the development of a technology to implant nitrogen ions accelerated to 10 keV one by one with nanoscale positional accuracy. To be concrete, we have succeeded in developing a linear pole trap (LPT) type ion source that can extract nitrogen ions with ultra-low emittance by sympathetic cooling with Ca ions. We succeeded in continuously extracting one Ca ion at a time from the LPT-type ion source. In addition, we designed and fabricated an acceleration lens that can accelerate the extracted nitrogen ions to 10 keV and at the same time converge to a nanometer size, aiming to fabricate Qubits that operate at room temperature.

研究分野：加速器科学

キーワード：イオントラップ レーザー冷却 単一イオン引出し NVセンター 多量子ビット

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンド中の点欠陥の一つである窒素原子(N) - 炭素原子空孔(V)の対 (NVセンター)は、室温で動作する量子ビットとして注目され、複数個の NV センターを近接して配列させることによって、新たな量子情報素子の開発が期待されている。この配列の製作には、ダイヤモンド中の狙った場所に数十ナノメートルスケールの位置精度で 1 個の窒素イオン (N^+) または窒素分子イオン (N_2^+) を確実に注入することが求められている。従来のイオンビームを用いたビーム集束では、イオン源でプラズマ状態からイオンを取り出すため、低エミッタンス化は難しく、さらにイオンを 1 個ずつ制御することは困難であった。そこで、電場中に閉じ込めたイオンをレーザーで mK 程度のドップラー冷却限界まで超低温化できるリニアポルトトラップ (LPT) をイオン源として使用する方法を採用した。ダイヤモンド中に N^+ を 10 nm 以上の深さに注入するためには、加速する必要があるとともに、上記の位置精度が求められる。そこで、LPT をイオン源として N^+ や N_2^+ を 1 個 1 個選択的に取り出し、イオンビームの加速と集束を同時に行うことにより高い縮小率が得られる静電加速レンズを使用することを検討した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、イオン注入法によりダイヤモンドに NV センターの多量子ビットを形成するために、ドップラーレーザー冷却(以下、レーザー冷却)と線形ポルトトラップ(LPT)を組み合わせたトラップ型イオン源と加速レンズ技術を融合し、イオン照射の制御性を極限まで高めること、さらに数 nm の精度で任意の位置に任意の個数の N イオンを照射し、多量子ビットを形成することである。

3. 研究の方法

本研究は、目的達成のため、(1)イオンのトラップ、冷却、引き出しに関するシミュレーション、(2)LPT の設計・製作、(3)加速レンズの設計・製作、(4)実証実験を実施した。今回の研究では NV センター生成と多量子ビット形成の実施に至らなかったが、形成するための装置としては完成したため、今後も研究を継続していく。

(1)イオンのトラップ、冷却、引き出しに関するシミュレーション

LPT および後段に接続された静電加速レンズの電極配置・形状から決定される電氣的ポテンシャルの 3 次元分布を CST STUDIO SUITE で計算し、そのデータを基に多粒子シミュレーションコードを用いてイオンの挙動を追跡した。レーザー冷却後の紐状クーロン結晶状態における Ca^+ と N_2^+ の個数と配列が取り出し後のイオンの特性に及ぼす影響を調べるため、初期条件として LPT 内でトラップするイオン種や数、それらの位置と運動量を設定した。また、LPT でのイオンのトラップは軸方向に閉じ込めを行う 2 つの端板電極の電圧を 0.5 V とし、取出す方向(下流側)と反対の上流側端板電極の電圧を 20 V に増加してイオンを加速し、LPT から取り出されたイオンのエミッタンスを求めた。さらに、LPT から射出されたイオンを静電加速レンズによりナノメートルスケールへ集束する過程を詳しく調べた。注入対象である N_2^+ イオンのみを選択的に加速レンズに導く手法を検討するとともに、LPT や加速レンズの電圧等のパラメータ依存性や本装置のイオン集束特性を調べた。

(2) LPT の設計・製作

イオントラップ装置を図 1 に示す。オープン加熱によって気化した Ca 原子を電子衝撃法によってイオン化する。直径 6.88mm の 4 本の RF ロッドに高周波電圧を印加する構造となっており、そのロッドを覆うような形で 2 個の端板電極が配置されている。端板電極間距離は 6mm で RF ロッドからトラップ中心までは 3mm であり、この領域でイオンを捕捉しレーザー冷却を行う。また、機械加工によって磁性を持つことを防ぐために金属部はすべて SUS316 としている。

レーザー冷却用の 2 つのレーザー (397 nm、866 nm) は、ダイクロミックミラーにより光路を同軸化した上でトラップ領域に入射される。

(3)加速レンズの設計・製作

ビーム径 10 nm 以下のビームの形成には、高縮小率が必要である。少ない印加電圧で大きな縮小率が得られる独自に開発した加速レンズを採用し、その設計、製作を行った。

(4)実証実験

(i) Ca^+ クーロン結晶生成実験

図 2 に実験セットアップの概要を示す。423 nm と 390 nm の 2 色のレーザー光により Ca 原子

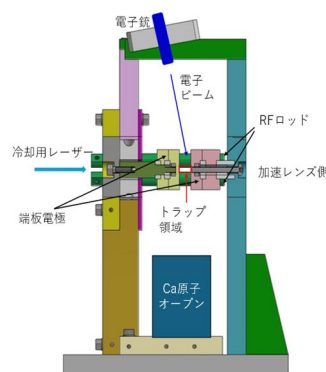


図 1: イオントラップ装置

を光イオン化する。生成した Ca^+ は、4本の円柱電極内の領域に高周波電圧を用いて捕捉し、さらに2色のレーザー光(397 nm、866 nm)によるドップラー冷却で、熱運動を mK レベルまで冷却する。イオンの熱運動が、イオンの感じるクーロン力(高周波電圧による閉じ込め力、イオン間の反発力)よりも十分に小さくなると、トラップ中の各 Ca^+ は静止し、クーロン結晶状態を示す。クーロン結晶の生成は、レーザー冷却過程で発生する 397 nm 蛍光(LIF)の発生位置局在化により、CCD カメラを用いて観測する。

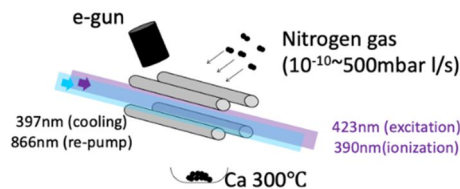


図2: 実験セットアップの概要。4本のレーザー光は同軸化し、4本の円柱電極内の中央を通過させる。

(ii) $(\text{Ca}^+ - \text{N}_2^+)$ 混合クーロン結晶生成実験

レーザー冷却された Ca^+ 集団内に、他種イオン(今回は N_2^+)を導入すると、イオン間のクーロン相互作用により、レーザー冷却されない N_2^+ も冷却され、 Ca^+ と N_2^+ の混合クーロン結晶が生成する。本研究では、冷却 Ca^+ と中性 N_2 分子がトラップ内に存在する条件下で電子線を照射し、 N_2 分子をイオン化する。電子線照射により加熱された Ca^+ 、 N_2^+ 混合イオン集団を再びレーザー冷却することで、混合クーロン結晶を生成する。

(iii) 混合クーロン結晶の生成と結晶の押し出し実験

図3(a)に実験に使用したLPTの模式図を示す。円柱電極は直径6.88 mm、長さ88 mmでトラップの中心軸から電極表面までは3 mmである。4本の円柱電極に周波数2 MHz、振幅数十Vの高周波電圧を印加することで断面方向にイオンを捕捉する。軸方向閉じ込めはEnd電極とGate電極に数Vの直流電圧を印加することで行う。クーロン結晶はGateとEnd-Bの間で生成するがそのギャップ長は7.1 mmである。

以下に実験手順を示すが、全ての過程で冷却用レーザーと高周波電圧は照射、印加している。まず、End-AとBに直流電圧を印加する。原子オープンで発生したCa蒸気を電子銃からの電子ビームによりイオン化し捕捉する(図3(b))。次にGateに直流電圧を印加しEnd-Aを0Vに下げる。イオンをGateとEnd-Bの間で捕捉・冷却し、クーロン結晶を生成する(図3(c))。クーロン結晶化はICCDカメラによるLIF観測で確認する。最後に、Gateの直流電圧を上げることでクーロン結晶を押し出し、二次電子増倍管(SEM)で計数を行う(図3(d))。なお、 N_2 ガスを導入してCaと同時にイオン化し、捕捉することで共同冷却により Ca^+ と N_2^+ の混合結晶も生成できる。

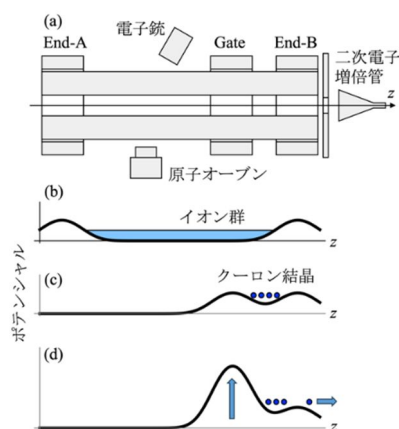


図3: イオントラップ (a) とイオン生成 (b)、冷却 (c)、押し出し (d) の各過程におけるポテンシャルの模式図。

4. 研究成果

研究の方法の(2) LPTの設計・製作については、作製したものを(4)実証実験で用いたので、本研究成果では(1)イオンのトラップ、冷却、引き出しに関するシミュレーション、(2)加速レンズの設計・製作、(3)実証実験について成果を報告する。

(1)イオンのトラップ、冷却、引き出しに関するシミュレーション

シミュレーションでは、混合クーロン結晶の配列として、3個の Ca^+ と1個の N_2^+ の4粒子からなる紐状クーロン結晶を対象に、次の4通りの配列で、取出後の N_2^+ の規格化 rms (root mean square) エミッタンス (σ_n) と光速で規格化した速度 (v/c) を求めた。1: (N_2^+ , Ca^+ , Ca^+ , Ca^+)、2: (Ca^+ , N_2^+ , Ca^+ , Ca^+)、3: (Ca^+ , Ca^+ , N_2^+ , Ca^+)、4: (Ca^+ , Ca^+ , Ca^+ , N_2^+)。配列とLPTの端板電極の関係は、配列1の N_2^+ の位置は加速に用いる20Vに印加した端板電極に最も近く、配列4の N_2^+ の位置は取出す方向(下流側)の端板電極に最も近い。シミュレーションの結果、 Ca^+ の質量は N_2^+ より重いため、図4に示すように、端板電極で加速された Ca^+ の速度は N_2^+ より遅くなり、 N_2^+ が先頭の配列4以外では N_2^+ が前方の Ca^+ と衝突して加熱された。そのため、配列4の N_2^+ の σ_n が他の4つの配列より小さくなった。従って、紐状クーロン結晶中の Ca^+ と N_2^+ の配列から低エミッタンスの N_2^+ を取り出すためには、 N_2^+ が先頭に配置する必要があることがわかった。

配列4の先頭の N_2^+ の σ_n が最も小さいことから、紐状クーロン結晶中に N_2^+ が2つ以上あった場合、 N_2^+ 同士で衝突することが予想される。そこで、2個の Ca^+ と2個の N_2^+ の4粒子の紐状クーロン結晶で先頭に N_2^+ 、その次も Ca^+ の差が最も小さくなるように N_2^+ を配置した配列 (Ca^+ , Ca^+ , N_2^+ , N_2^+) でシミュレーションを行い、 N_2^+ 同士の衝突の有無と N_2^+ の σ_n を求めた。図5は、先頭の N_2^+ に対するすぐ後の N_2^+ のエネルギー差および距離について、冷却終了後からの時間変化を示す。端板電極による加速によって、先頭の N_2^+ よりその後の N_2^+ のエネルギーが高いため、両者の距離が縮まり、加速開始から約1 μs 後に衝突し始めた。その後、先頭の N_2^+ は後の N_2^+ からエネルギーが付与されて、両者のエネルギーの差は正になった。これにより先頭の N_2^+ が加速され、両者の距離は開き始めた。LPTから取り出された先頭とその後ろの N_2^+ の σ_n は、それぞれ 4.5×10^{-15} 、

$3.3 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{rad}$ であった。この値は単一の N_2^+ の配列 4 の場合の $4.6 \times 10^{-16} \text{ m} \cdot \text{rad}$ に比べて、約 1桁悪い。従って、LPT からの低エミッタンスの N_2^+ の取り出しには、共同冷却後の紐状クーロン結晶中で先頭に N_2^+ を配列する必要があることがわかった。

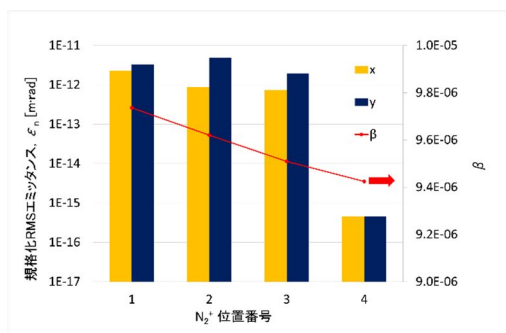


図 4: LPT から取り出した 4 つのイオンの配列中の N_2^+ 位置に対する規格化 RMS エミッタンスと

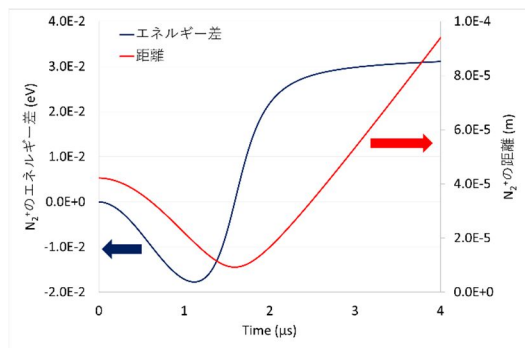


図 5: LPT から取り出された配列 (Ca^+ , Ca^+ , N_2^+ , N_2^+)の N_2^+ 間のエネルギー差と距離。横軸は冷却終了後からの経過時間。先頭の N_2^+ は後ろの N_2^+ に追突された。

以上の結果に基づいて、LPT から超低エミッタンスのまま射出した先頭 N_2^+ のみを後続の Ca^+ と分離し下流の静電加速レンズにて集束する過程について詳しく調べた[6]。この先頭イオンの選択的射出の手法として、以下の 2 つのケース（早い射出、遅い射出）を提案し、検討した：(1) 上流側端板電極の昇圧後、イオンが取出側（下流側）端板電極を通過する適切なタイミングで端板電極を 1~2 kV へ高速にスイッチし、先頭の N_2^+ を加速するとともに後続の Ca^+ を上流側へ追い返す。(2) 上流側端板電極を 10 ms 程度以上の時間でゆっくりと 10 V 程度まで昇圧することで、先頭の N_2^+ のみを断熱的に引き出す[7]。

前者(1)の手法で射出し加速レンズで集束した N_2^+ の集束点近傍での分布を図 6 に示す。取出側端板電圧を 1.8 kV に昇圧することで 0.7 keV の引出エネルギーを付与し、その後、2 段加速レンズ（ギャップ電位差：2.15 kV および 11.15 kV）にて 14 keV へ加速・集束した。集束点にてイオンのスポットサイズは 1 nm (rms 値) に縮小された。集束点でのイオンの規格化 rms エミッタンスは LPT 射出直後のエミッタンスと同程度 ($5 \times 10^{-16} \text{ m} \cdot \text{rad}$) であり、レンズ系の収差の影響を受けることなく集束できることがわかった。後者の射出方法(2)を用いても同様に 1 nm への集束が可能であることを確認した。

さらに、上記の電圧に応じて、10~20 mm 程度のワーキングディスタンスが得られること、(目標である)直径 20 nm の照射精度を達成するには、クーロン結晶状態にあるイオンの温度を 4 mK 以下に冷却しなければならないこと、それ以上の温度の場合、第 2 レンズにおける収差の影響で集束イオンの位相空間が歪み、rms エミッタンスが増大すること等、本装置におけるイオンの集束特性を明らかにした。

(2)加速レンズ

加速レンズの設計では、縮小率、焦点等のレンズパラメータ及び収差のうち、色収差と球面収差はレンズ形状に依存して変わるため、集束点でのビーム径を決める際に予め求めておく必要がある。この設計においては、これまで QST で開発してきた二段加速レンズを基に二段目の加速レンズの形状を中心に検討した。図 7 に加速レンズの設計に必要なパラメータを示す。これらのパラメータを系統的に変えて、レンズパラメータとの関係を求めた。加速レンズは、電極間隔 (d) が短い方が、電極単孔部での電場の歪みによる電場勾配が大きくなるため、縮小率が大きくなる。しかし、 d を小さくしすぎると電極間で放電が発生する。そこで、これまで 10 kV で、 $d = 10 \text{ mm}$ 、 $r = 6.25 \text{ mm}$ であったことと、今回の最大印加電圧が 30 kV でこれまでの約 1/3 であること、工作精度を考慮して、 $r = 3.125 \text{ mm}$ 、 $d = 5 \text{ mm}$ とした。その後、ボア径 (b) をパラメータとして、様々なレンズ形状に対してレンズのパラメータ（縮小率、焦点距離、収差）を求め、最適値を探索した。その結果、第 1 加速レンズ： $r = 1.5 \text{ mm}$ 、 $t = 2 \text{ mm}$ 、 $b = 1 \text{ mm}$ 、第 2 加速レンズ： $r = 3.125 \text{ mm}$ 、 $t = 5 \text{ mm}$ 、 $b = 5 \text{ mm}$ 、 $d = 5 \text{ mm}$ として加速レンズを作製した。

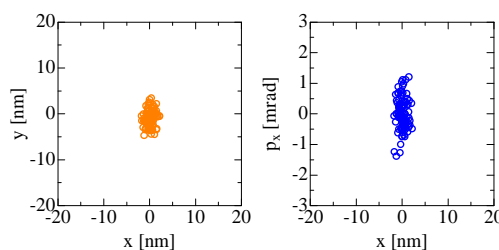


図 6: LPT から射出された N_2^+ イオンの集束点近傍 (LPT 中心からの距離 315.938 mm) における実空間および位相空間分布。多数回の独立した単一イオン射出のシミュレーションを実施し、その結果を重ねてプロットしたものである。

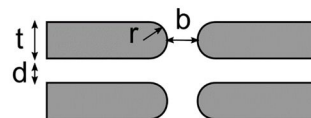


図 7: 加速レンズの設計のためのパラメータ

(3)実証実験

(i) Ca⁺クーロン結晶の生成

図8にクーロン結晶からのLIF像の例を示す。図中の白くなっている所(輝点)がCa⁺からのLIFが多い所、すなわちCa⁺が存在する場所である。図8(a)は上の3-(4)-(i)で計測したLIF像であり、6個のCa⁺が一列に並んでいる。各輝点は横方向と比べ、縦方向が長く、円柱電極に直交した軸方向がまだ十分には冷却できていないことを示している。今後はトラップ電位の補正等により、イオンのレーザー冷却を更に進める。

(ii) (Ca⁺ - N₂⁺) 混合クーロン結晶の生成

図8(b)、(c)は上の3-(4)-(ii)で計測したLIF像であり、矢印の箇所イオン間隔が明らかに広がっている。ここにはLIFを発しないN₂⁺イオンが捕捉されており、Ca⁺4個とN₂⁺1個の混合クーロン結晶が生成されたことを示している。各LIF画像の露光は2秒間であり、図8(b)の2秒後に図8(c)を撮像した。この2秒間でN₂⁺の位置が左に一つ移動した。このイオンの位置交換はホッピングと呼ばれ、この実験では熱運動の冷却が不十分なために起こった。紐状クーロン結晶からのイオンの射出・注入実験では、このホッピングを積極的に利用したイオン配列の制御も検討している。

(iii) 混合クーロン結晶の生成と結晶の押し出し実験

(iii-1) 混合クーロン結晶生成実験

図9に混合結晶からのLIF像の例を示す。図中の白くなっている所がCa⁺からのLIFが多い所、すなわちCa⁺が存在する場所である。図9(a)では3個のCa⁺が一列に並んでいるが、矢印の箇所イオン間隔が明らかに広がっている。ここにはCa⁺とは異なるLIFを発しないイオンが捕捉されている。即ち、2種イオンによる紐状の混合クーロン結晶を形成している。窒素ガスを導入して生成したCa⁺とN₂⁺の混合クーロン結晶を図9(b)に示す。LIFが楕円状に分布していることから殻状のクーロン結晶となっていることがわかる。ただし、楕円の上部和下部でLIFが多く、中心付近はLIFが少なくなっている。これはN₂⁺が中心軸付近に分布し、その周りを囲むようにCa⁺が分布するためである。質量電荷比の違いにより分布が分離するのは数値シミュレーションの結果ともよく一致する。

(iii-2) クーロン結晶押し出し実験

Ca⁺とN₂⁺で構成される混合クーロン結晶からN₂⁺のみを引き出す方法として、クーロン結晶の後方のポテンシャルをゆっくりと上げて、ポテンシャル井戸からN₂⁺を溢れさせる方法を提案している。図3に示すEnd-B電圧は変えずに、Gate電圧を上げることでクーロン結晶をトラップから取り出せるか検証した。結果の例を図10に示す。結晶を押し出す直前(End-B電圧、Gate電圧共に0.5V)のLIF像を図10のグラフ内のパネルに示す。この状態から10msでGate電圧を0.5Vから30Vまで上げると48個の信号がイオン検出器で検出された。グラフに信号の時間間隔を示す。時間間隔はおおよそ7msであるので、1ms程度の時間で電圧を操作すれば、引き出すイオン数を制御することができる。この程度の時間と電圧の操作であれば特別な装置を必要としないので、実用上有益である。また、Gate電圧を引き上げる時間を変えれば、時間間隔を変化できることも確認している。グラフ中に時間間隔が広がっている箇所があるが、その時間間隔は前後の時間間隔のおおよそ整数倍となっている。つまり時間間隔が広がるのは、その前のイオンが検出できなかったためである。装置の配置上、排出されたイオンは必ずイオン検出器に届くので、検出に失敗する理由はイオン検出器のイオン検出効率にあると考えられる。

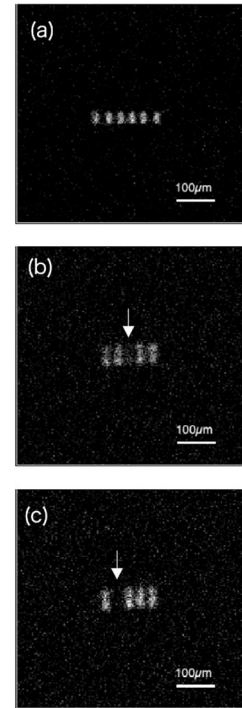


図8: クーロン結晶のLIF像。(a)Ca⁺のみ。(b)、(c)Ca⁺4個とN₂⁺1個の混合結晶。

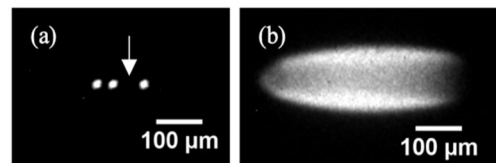


図9: 混合結晶のLIF画像。(a)紐状クーロン結晶。(b)殻状クーロン結晶。

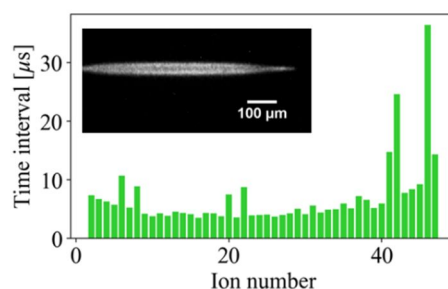


図10: Gate電極への印加電圧を変化させて結晶を押し出した場合のイオン検出器へのイオン到着時間の間隔。押し出し直前の結晶からのLIF像を図中に示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Miyawaki Nobumasa, Ishii Yasuyuki, Yuri Yosuke, Narumi Kazumasa, Muroo Kento, Ito Kiyokazu, Okamoto Hiromi	4. 巻 542
2. 論文標題 Calculation study of selective ion extraction from ion source with Paul-trap-type laser cooling device	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 183 ~ 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2023.06.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishii Y., Ohkubo T., Miyawaki N., Yuri Y., Onoda S., Narumi K., Saitoh Y.	4. 巻 541
2. 論文標題 Design of an apertureless two-stage acceleration lens for a single-ion implantation system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 200 ~ 204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2023.05.021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Muroo Kento, Okamoto Hiromi, Miyawaki Nobumasa, Yuri Yosuke	4. 巻 2023
2. 論文標題 Simulation study of ultrahigh-precision single-ion extraction from a linear Paul trap	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 063G01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 宮脇信正, 石井保行, 百合庸介, 鳴海一雅, 室尾健人, 伊藤清一, 岡本宏己	4. 巻 -
2. 論文標題 線形ポルトラップイオン源からの選択的イオン取出しに関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 61 ~ 64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 百合庸介, 宮脇信正, 穂坂綱一, 細谷青児, 石井保行, 柏木啓次, 島田紘行, 山縣諒平, 佐藤隆博, 齋藤勇一, 小野田忍, 鳴海一雅, 室尾健人, 伊藤清一, 岡本宏己	4. 巻 -
2. 論文標題 超精密単一イオン注入装置におけるイオンダイナミクス研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 470 ~ 474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また, その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 百合 庸介, 室尾 健人, 宮脇 信正, 岡本 宏己
2. 発表標題 3次元混合クーロン結晶からの単一イオン精密射出に関する多粒子シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石井 保行, 宮脇 信正, 百合 庸介, 小野田 忍, 鳴海 一雅, 齋藤 勇一
2. 発表標題 単一イオンビーム注入装置用二段階加速レンズの設計
3. 学会等名 第70回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 百合 庸介, 宮脇 信正, 石井 保行, 細谷 青児, 穂坂 綱一, 柏木 啓次, 島田 紘行, 山縣 諒平, 横田 渉, 佐藤 隆博, 齋藤 勇一, 小野田 忍, 鳴海 一雅, 室尾 健人, 伊藤 清一, 岡本 宏己
2. 発表標題 レーザー冷却イオンの超精密注入に関するシミュレーション研究
3. 学会等名 2022年度ビーム物理研究会・若手の会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮脇 信正 , 石井 保行 , 百合 庸介 , 鳴海 一雅 , 室尾 健人 , 伊藤 清一 , 岡本 宏己
2. 発表標題 線形ポールトラップイオン源からの選択的イオン取出しに関する研究
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石井 保行 , 宮脇 信正 , 鳴海 一雅 , 小野田 忍 , 齋藤 勇一
2. 発表標題 Design of a collimator-less two-stage acceleration lens for a single ion implantation system
3. 学会等名 18th International Conference of Nuclear Technology and Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮脇 信正 , 石井 保行 , 百合 庸介 , 鳴海 一雅 , 室尾 健人 , 伊藤 清一 , 岡本 宏己
2. 発表標題 Calculation study for the selective ion extraction from an ion source with Paul-trap-type laser cooling device
3. 学会等名 18th International Conference of Nuclear Technology and Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石井保行、大久保 猛、宮脇信正、鳴海一雅、齋藤勇一
2. 発表標題 単一イオン注入装置における静電レンズの比較
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 室尾健人, 伊藤清一, 岡本宏己, 宮脇信正
2. 発表標題 共同冷却された単一イオンの超高精度射出に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 室尾 健人、伊藤清一、岡本宏己、宮脇信正
2. 発表標題 線形ポールトラップからの単一カルシウムイオンの超高精度射出に関する研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳴海 一雅
2. 発表標題 Introduction of the Ion-Trap Project of QST/Takasaki
3. 学会等名 TRiAC workshop
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 百合 庸介, 宮脇 信正, 穂坂 綱一, 細谷 青児, 石井 保行, 飯澤 正登実, 柏木 啓次, 山縣 諒平, 齋藤 勇一, 小野 田 忍, 鳴海 一雅, 室尾 健人, 伊藤 清一, 岡本 宏己
2. 発表標題 レーザー冷却イオンの100keV級ナノビーム集束 - 精密イオン注入装置開発のためのシミュレーション研究
3. 学会等名 ビーム物理研究会・若手の会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 細谷 青児, 柏木 啓次, 齋藤 勇一, 百合 庸介, 穂坂 綱一, 島田 紘行, 宮脇 信正, 石井 保行, 山縣 諒平, 佐藤 隆博, 小野田 忍, 鳴海 一雅
2. 発表標題 精密単一イオン注入のためのイオン供給用スパッタイオン源の開発
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮脇 信正, 石井 保行, 百合 庸介, 穂坂 綱一, 細谷 青児, 柏木 啓次, 島田 紘行, 山縣 諒平, 佐藤 隆博, 齋藤 勇一, 小野田 忍, 鳴海 一雅, 室尾 健人, 伊藤 清一, 岡本 宏己
2. 発表標題 リニアポルトラップからの超低エミッタンスイオンの選択的取出しの検討
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 百合 庸介, 宮脇 信正, 穂坂 綱一, 細谷 青児, 石井 保行, 柏木 啓次, 島田 紘行, 山縣 諒平, 佐藤 隆博, 齋藤 勇一, 小野田 忍, 鳴海 一雅, 室尾 健人, 伊藤 清一, 岡本 宏己
2. 発表標題 レーザー冷却イオンに基づいた精密単一イオン注入に関する多粒子シミュレーション
3. 学会等名 QST高崎研サイエンスフェスタ2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 穂坂 綱一, 細谷 青児, 柏木 啓次, 百合 庸介, 宮脇 信正, 石井 保行, 島田 紘行, 山縣 諒平, 佐藤 隆博, 齋藤 勇一, 小野田 忍, 鳴海 一雅, 室尾 健人, 伊藤 清一, 岡本 宏己
2. 発表標題 超高精度の単一イオン注入に向けたレーザー冷却イオン源の開発
3. 学会等名 QST高崎研サイエンスフェスタ2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 百合 庸介, 宮脇 信正, 穂坂 綱一, 細谷 青児, 石井 保行, 柏木 啓次, 島田 紘行, 山縣 諒平, 佐藤 隆博, 齋藤 勇一, 小野田 忍, 鳴海 一雅, 室尾 健人, 伊藤 清一, 岡本 宏己
2. 発表標題 超精密単一イオン注入装置におけるイオンダイナミクス研究
3. 学会等名 第20回日本加速器学会年会
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
研究分担者	岡本 宏己 (Okamoto Hiromi) (40211809)	広島大学・先進理工系科学研究科(先)・教授 (15401)	
研究分担者	伊藤 清一 (Ito Seichi) (70335719)	広島大学・先進理工系科学研究科(先)・助教 (15401)	

	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
研究協力者	鳴海 一雅 (Narumi Kazumasa)		
研究協力者	百合 庸介 (Yuri yosuke)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	穂坂 網一 (Hosaka Koichi)		
研究協力者	宮脇 信正 (Miyawaki Nobumasa)		
研究協力者	石井 保行 (Ishii Yasuyuki)		
研究協力者	細谷 青児 (Hosoya Seiji)		
研究協力者	柏木 啓次 (Kashiwagi Hirotsugu)		
研究協力者	山縣 諒平 (Yamagata Ryohei)		
研究協力者	室尾 健人 (Muroo Kento)		

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
---------	---------