

トラップしたマグネシウムイオンの生成と操作のための VECSEL システム

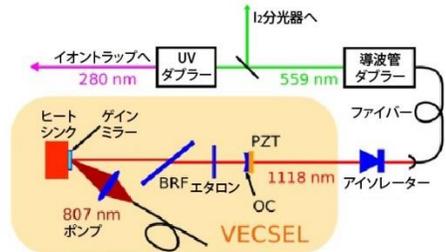
S. C. BURD,^{1,*} D. T. C. ALLCOCK,¹ T. LEINONEN,² J. P. PENTTINEN,² D. H. SLICHTER,¹ R. SRINIVAS,¹

A. C. WILSON,¹ R. JÖRDENS,¹ M. GUINA,² D. LEIBFRIED,¹ AND D. J. WINELAND¹

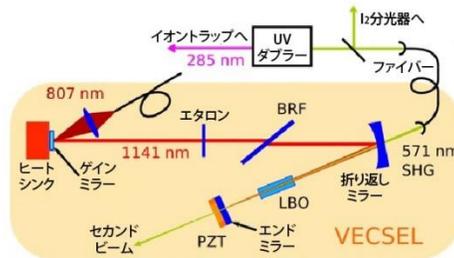
¹Time and Frequency Division, National Institute of Standards and Technology, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80305, USA

²Optoelectronics Research Centre, Tampere University of Technology, PO Box 692, FIN-33101 Tampere, Finland *Corresponding author: shaun.burd@nist.gov

Received 10 June 2016; revised 11 September 2016; accepted 4 October 2016 (Doc. ID 268119); published 8 November 2016



(a)



(b)

原子、分子、および光(AMO)物理学の実験では、さまざまな波長のレーザーが使用され、スペクトル線幅、出力、および強度安定性に関する要件もさまざまです。垂直外部共振器面発光レーザー(VECSEL)は、非線形周波数変換と組み合わせると、現在使用されている多くのレーザーシステムを置き換えることができます。ここでは、トラップされたマグネシウムイオンを使用した量子情報処理実験のすべてのレーザーベースのタスクを実行できる VECSEL システムを紹介し、その特性を説明します。中性マグネシウムの光イオン化では、リチウム三ホウ酸塩結晶を含む共振器内周波数倍増 VECSEL を使用して 570.6nm の光が生成されます。外部周波数倍増により、中性 Mg の $^1S_0 \leftrightarrow ^1P_1$ 遷移との共鳴相互作用のために 285.3nm の光が生成されます。外部周波数 4 倍化 VECSEL を使用して、 $279.6\text{nm}^2 S_{1/2} \leftrightarrow ^2P_{3/2}$ サイクル遷移での $^{25}\text{Mg}^+$ のドップラー冷却、 $280.4\text{nm}^2 S_{1/2} \leftrightarrow ^2P_{1/2}$ 遷移での再ポンピング、コヒーレント状態操作、および運動基底状態に近い分解サイドバンド冷却を実装します。当社のシステムは、複数の波長で単一周波数、出力スケラブルなレーザーソースを必要とする AMO アプリケーションのプロトタイプとして機能します。

©2016OpticalSocietyofAmerica

OCIS コード:(140.5960)半導体レーザー、(140.3515)レーザー、周波数倍増、(020.3320)レーザー冷却、(270.5585)量子情報および処理、(300.6320)分光法、高解像度、(300.6520)分光法、トラップイオン。

<http://dx.doi.org/10.1364/OPTICA.3.001294>

1. はじめに

捕捉されたイオンは、量子情報処理[1-4]、量子シミュレーション[5-8]、および精密計測[9,10]の研究のための多目的実験プラットフォームを提供します。単一イオン化されたマグネシウムは、イオントラップ実験に望ましい特性をいくつか備えています。マグネシウムは循環遷移を持つため、ドップラー冷却には1つのレーザーのみが必要です。原子質量が低いため、比較的低いトラップ駆動電圧で高い運動周波数を実現できます。核スピン $I=5/2$ を持つ同位体 $^{25}\text{Mg}^+$ には、磁場の変動に対して第一に鈍感な一連の中間磁場超微細「クロック」量子ビットがあります。これらの量子ビットの約 $\sim 1.7\text{GHz}$ の超微細分裂により、市販のマイクロ波電子機器で簡単に操作できます[11]。マグネシウムイオンは、レーザー冷却の最も初期のデモンストレーションの1つ[12]やマイクロ波駆動の2量子ビット量子論理ゲート[11]などの実験に使用されています。しかし、必要な高出力の紫外線を生成するには、多くの技術的な課題があります。

Mg^+ イオンのトラッピング用途では、 7.646eV (162.6nm に相当) の連続光への直接励起の代わりに共鳴2光子イオン化が一般的に使用されます(この研究でリストされているすべての波長は真空波長です)[13]。図1(a)に示すように、光イオン化(PI)レーザーは、 285.3nm での中性マグネシウムの $3s^2\ ^1\text{S}_0 \leftrightarrow 3s3p\ ^1\text{P}_1$ 遷移と共鳴して、原子を励起します。PIレーザーまたは 280nm 付近の別のレーザー(ドップラー冷却 Mg^+ イオン用)からの光子は、励起された原子をイオン化するのに十分なエネルギーを持ちます。ドップラー冷却、再ポンピング、および量子状態操作に使用されるエネルギーレベルを図1(b)に示します。 $3s^2\text{S}_{1/2} \leftrightarrow 3p^2\text{P}_{3/2}$ 遷移は、ドップラー冷却と状態検出のための循環遷移を提供します。 $^{25}\text{Mg}^+$ を用いた量子情報実験では、 $3s^2\text{S}_{1/2}|F=3\rangle$ および $|F=2\rangle$ 多様体内の適切なゼーマンサブレベルのペアが量子ビットとして機能します。コヒーレントな量子ビット操作は、2つのラマンレーザービーム間の周波数差が量子ビット周波数の近くに設定される誘導ラマン遷移によって実現できます[図1(b)]。誘導ラマン遷移により、イオンの内部自由度と運動自由度の結合が可能になります[1]。これは、量子論理ゲートとサブドップラー冷却の実装に不可欠です。分解サイドバンド冷却を使用して、トラップされたイオンを運動基底状態の近くまで冷却できます[1]。多くの量子情報実験やトラップイオン原子時計では、特定の運動状態に高い確率で量子システムを準備する必要があります[9]。分解サイドバンド冷却中は、イオンを初期の超微細状態まで再ポンプする必要があります。

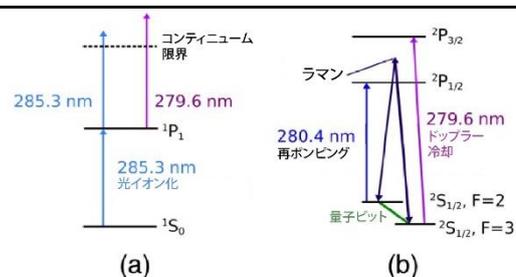


図 1. 光イオン化に関連する(a)中性マグネシウムのエネルギーレベルと、ドップラー冷却、再ポンピング、誘導ラマン遷移に関連する(b) $^{25}\text{Mg}^+$ のエネルギーレベル。

これは、 $3s^2\text{S}_{1/2} \leftrightarrow 3p^2\text{P}_{1/2}$ 遷移と共鳴するレーザーを使用することで効率的に達成できる[14]。

マグネシウムイオントラッピング実験は、従来、周波数2倍進行波色素レーザーを使用して行われてきました。最近では、周波数4倍イッテルビウムファイバーレーザー[15,16]が、ドップラー冷却と量子ビット操作の光を生成するために使用されています。ただし、これらのファイバーレーザーは増幅曲線の長波長端近くで動作するため、通常は 1118nm の赤外線 (IR) で約 2W に制限されます。私たちの知る限りでは、 $2\text{S}_{1/2} \leftrightarrow 2\text{P}_{1/2}$ 遷移の再ポンピング用の 1120nm または光イオン化用の 1141nm に到達できる市販のファイバーレーザーシステムは現在入手できません。マグネシウムイオン実験に必要なすべての波長をカバーする周波数4倍ダイオードレーザーシステムが利用可能です[17]。これらのシステムは現在、テーパ増幅器を使用してダイオードシードレーザーを増幅する場合、IR出力が約 2W に制限されています。より高い出力を得るために、単一周波数シードレーザーの増幅はラマンファイバー増幅器[18]で達成することができます。高出力で広範囲に調整可能な光パラメトリック発振器(OPO)システムも利用可能ですが、単一周波数ポンプ光源が必要です。

ここでは、垂直外部共振器面発光レーザー(VECSEL)技術に基づくマグネシウムイオントラッピング実験用のレーザーシステムを紹介します。VECSELは、高精度分光法のアプリケーションに望ましい特性を多数示します[19]。ゲイン材料は、広範囲の波長での放射用に設計することができ、紫外線の 390nm と可視光の 674nm から赤外線の $5\mu\text{m}$ までの複数の波長での放射が実証されています[20]。VECSELの形状により、回折限界に近い出力ビーム品質と数十ナノメートルの調整範囲で単一周波数放射が可能になります。外部または共振器内の高調波発生により、達成可能な波長範囲が可視光と紫外線にさらに拡張されます。VECSELアーキテクチャは、本質的に出力スケールリングに適しています[20]。近赤外域で最大 23.6W の出力を持つ単一周波数VECSELが報告されています[21]。最近、 916nm VECSELの第4高調波から 0.56W 、 229nm の光源が開発されました[22]。外部高調波発生を備えたVECSELシステムは、中性水銀[23]と中性ル

ビジウム[24]のドップラーフリー分光法を実行するために使用されています。

当社のシステムは、図2に示す2つのレーザー設計で構成されています。1つ目は、外部で周波数を4倍にしたVECSELで、1117nmで $3.0 \pm 0.1W$ の出力を生成できます。この出力は、レーザー冷却、再ポンピング、または Mg^+ イオンの誘導ラマン遷移のいずれかに合わせて波長を調整できます。光イオン化に使用される2つ目のシステムは、571nmで最大 $2.4 \pm 0.1W$ (2つの出力ビームの合計出力)を放射し、外部で285nmに倍増する、共振器内周波数倍増VECSELです。両方のシステムとも、ポンプソースとして市販のマルチモードダイオードレーザーを使用します。

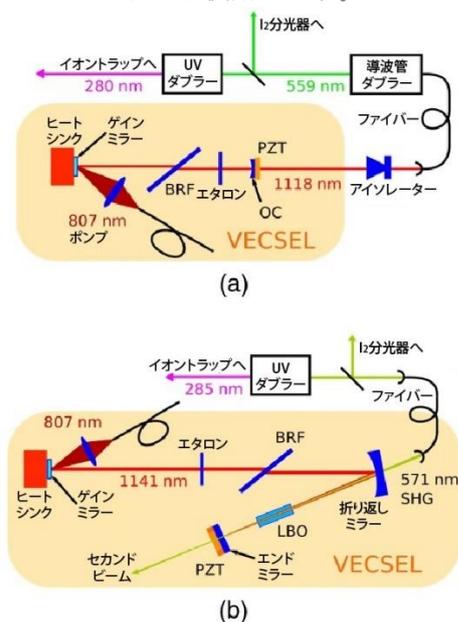


図2.VECSELシステム。(a)ドップラー冷却、再ポンピング、および誘導ラマン遷移の実行に使用される外部4倍化IキャビティVECSELシステム(ICシステム)。(b)光イオン化用のVキャビティ、キャビティ内周波数倍増システム(VCシステム)。PZT:ピエゾトランスデューサー、OC:出力カップラ、BRF:複屈折フィルター、LBO:リチウム三ホウ酸塩結晶、SHG:第2高調波発生。

2. レーザーのセットアップと特性評価

まず、図2(a)に示す外部周波数4倍化IキャビティVECSEL(ICシステム)について検討します。ゲインミラーはフリップチップ設計(基板が除去された逆さまの成長構造)を採用しており、GaAsP層によって歪みが補償されたGaInAs/GaAs量子井戸で構成されています[25]。ゲインチップは、銅板にはんだ付けされたダイヤモンドヒートスプレッダーに取り付けられています。熱電冷却器(TEC)モジュールは、熱管理と温度制御のために、ゲインチッププレートと水冷式マイクロチャンネルクーラーの間にクランプされています。長さ125mmの共振器は、ゲインミラーと曲率半径(ROC)が200mmの2%出力カップラで構成されるIジオメトリを備えています。エンドミラーは、キャビティ長を制御するためにリングピエゾ電気トランスデューサー(PZT)に接着されています。ゲインチップは、ファイバー結合された807nmマルチモードレーザーダイオードでポンピングされます。ゲインチップ上の $1e^2$ 強度

のポンプスポット径は、およそ $400\mu m$ です。単一モード動作を保証し、波長選択を可能にするために、ブリュスター角で挿入された3mm厚の石英複屈折フィルター(BRF)プレートと1mm厚のイットリウムアルミニウムガーネット(YAG)エタロンがキャビティ内に配置されます。エタロンは、周波数の安定性と波長調整のために温度制御オープン内に配置されます。VECSELは、音響および熱絶縁のために絶縁筐体に収められています。このシステム設計により、1117nmで $3.0 \pm 0.1W$ のIR出力と807nmのポンプ出力 $21 \pm 1W$ (スロープ効率 $19 \pm 1\%$)を達成しました。レーザーからの光は、後方反射を防ぐために光アイソレータを介して伝播し、市販のファイバー結合型擬似位相整合ニオブ酸リチウム導波路周波数ダブラーに結合されます。導波管への潜在的な損傷を避けるため、周波数ダブラーは300mW未満の第2高調波(SH)出力で動作させます。1118nmから559nmへの全体的な変換は $22 \pm 2\%$ です(ファイバー結合損失を含む)。SH光は、 β -ホウ酸バリウム(BBO)結晶を含むビルドアップキャビティに結合され、280nmへの周波数通倍が行われます。キャビティ設計の詳細はWilsonら[26]によって提供されています。IRで $1160 \pm 40mW$ 、結果として $260 \pm 10mW$ のSH出力が得られ、UVで $23 \pm 2mW$ を生成し、可視からUVへの変換効率は $9 \pm 1\%$ です。

精密分光法やドップラー冷却に使用するには、UVのレーザー線幅は、関連する原子遷移の幅(通常は数十MHz)よりもはるかに狭くなければなりません。さらに、UV光を生成するための共鳴周波数ダブラーは、レーザー周波数ノイズを強度ノイズに変換し、誘導ラマン遷移を使用して実行される量子操作の忠実度を低下させます[27]。図3は、280nmで $13 \pm 1mW$ を生成するときのICシステムの相対強度ノイズ(RIN)スペクトルを示しています。この実験は、ObarskiとSplett[28]によって説明された基本手順に従って、高速フーリエ変換アナライザーに接続されたフォトダイオードを使用して実行されました。図3のRINは、10kHz以上で $-75dBc/Hz$ 未満です。

「三角帽子」法[29]は、赤外線におけるICVECSELの短期周波数変動を測定するために使用されました。VECSEL、シングルモードファイバーレーザー、および外部キャビティダイオードレーザーからのビームが結合され、単一のフォトダイオードに向けられました。レーザーの周波数は、各レーザーペアのビート音の時間領域測定を記録できるように十分に近い値に設定されました。各レーザーの周波数は、Snyderら[30]によって説明された分光法のバリエーションを使用して、ドップラーフリーのヨウ素分光特性(閉ループ帯域幅 $< 2Hz$)にロックすることにより、低速時間スケールで安定化されました。データは、図4に示すように、異なる平均時間での各レーザーの周波数偏差が得られるように処理されました。VECSELは、すべての平均時間にわたって20kHz未満の周波数偏差を示しています。レーザー冷却および再ポンピング実験では、レーザー周波数を安定させて、ゆっくりとしたドリフト(分単

位)を減らす必要がありました。これは、VECSEL を分子ヨウ素のドップラーフリー分光特性にロックするか、ヨウ素ロックファイバーレーザーに周波数オフセットロック[31]を実行することで実現しました。誘導ラマン遷移の場合、フリーランニング VECSEL 周波数は十分に安定しており、アクティブな周波数制御は必要ありませんでした。

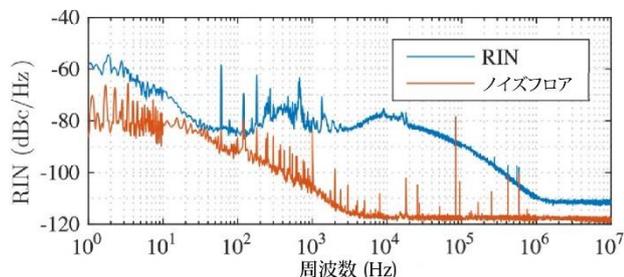


図 3 .280nm RIN スペクトル。ノイズフロアは、レーザーがブロックされ、他のすべての実験パラメータが同じである状態で取得されたスペクトルです。

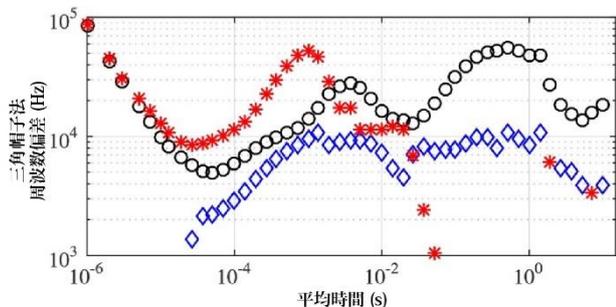


図 4. IC VECSEL システム(青いダイヤモンド)とファイバーレーザー(赤い星)および外部共振器ダイオードレーザー(黒い円)を比較した三角帽子法周波数偏差(周波数分散の平方根)。

ここで、図 2(b)に示す光イオン化用キャビティ内周波数倍増 VECSEL システム(VC システム)について検討します。IC システムと同じゲインチップの機械的マウントと熱管理が利用されています。フリップチップゲインミラーは、GaAsP によって歪みが補償された 10 個の GaInAs 量子井戸で構成されています。ゲインミラー設計のより詳細な説明は、Kantola ら[32]によって提供されています。ファイバー結合された 807nm マルチモードダイオードレーザーポンプは、 $1/e^2$ 強度直径が約 $380\mu\text{m}$ のゲインチップに焦点を合わせます。キャビティは、ゲインミラー、100mm ROC を備えたフォールドミラー、および平面端ミラーによって形成される V 形状です。ミラーは、1116~1142nm で高い反射率と、第 2 高調波波長での高い透過率のためにコーティングされています。温度安定化された $3\times 3\times 15\text{mm}$ リチウム三ホウ酸塩(LBO)結晶は、1141nm と 571nm の二重反射防止コーティングが施され、タイプ I 位相整合用にカットされており、第 2 高調波発生用にキャビティの 65mm 短腕に配置されています。1mm 厚の YAG エタロンと 3mm 厚の石英 BRF は、ブリュースター角で挿入され、波長選択用にキャビティの 125mm 長腕に配置されています。キャビティ長の微調整には PZT が使用されます。ほぼ等しい出力の 2 つの別々の 571nm ビームがフォールドミラーとエンドミラーを通過してキャビティから出ます。ゲインミラーが 8°C に冷

却されると、レーザーは 571nm で各出力ビームで最大 $1.2\pm 0.1\text{W}$ を生成できます。571nm の光は、BBO 結晶を使用したビルドアップキャビティを使用して 285nm に周波数倍増されます。長期的な周波数ドリフトを低減するために、VC レーザーはドップラー効果のない分子ヨウ素遷移にロックすることができます。525.4050THz 付近のドップラー効果のないヨウ素線のスキャンを図 5 に示します。ロックされたエラー信号から、ロックイン時間定数が 10ms の場合、6 分間で 180kHz の二乗平均平方根(RMS)周波数偏差を推定します。短期的な周波数変動は、レーザーを基準キャビティ(フィネス 250 ± 10)との共振に調整することによって測定しました。電子的な Hänsch-Couillaud エラー信号[33]から、検出器帯域幅 470kHz を使用して $50\pm 10\text{kHz}$ のレーザー線幅を推定します。

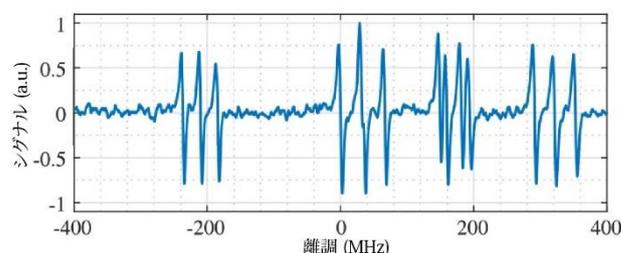


図 5. キャビティ内二重 VC システムを使用した 525.4050THz に対するヨウ素線のドップラーフリースキャン。

3. イオントラッピングと分光法

我々の Mg イオントラッピング装置では、同位体濃縮 Mg を含む電気加熱オープンを使用して、 ^{25}Mg 原子の熱ビームを生成します。光イオン化のために、VC システムからの 285nm のレーザー光約 1mW が、耐ソラリゼーションシングルモードファイバー[34]に結合され、Ospelkaus ら[11]が使用したのと同様の表面電極 RF ポールトラップのトラッピング領域を介して、計算上の $1/e^2$ 強度直径 $26\mu\text{m}$ に焦点が当てられます。ドップラー冷却用の 280nm の光もトラッピング領域に適用されます。オープンが定常動作温度に達した後、10 秒以内に単一の Mg^+ イオンをトラップに確実に繰り返しロードします。

$^2\text{S}_{1/2}\leftrightarrow^2\text{P}_{3/2}$ 遷移の分光法では、IC システムは、ドップラーフリーのヨウ素線に安定化されたファイバーレーザーに周波数オフセットロックされています。IC システムからの UV 光はファイバー結合され、約 $24\mu\text{m}$ の $1/e^2$ 強度直径でイオンに焦点を合わせます。光の周波数は、音響光学変調器 (AOM) に適用される駆動周波数を調整することによってスキャンされます。スキャンの各周波数ポイントでは、捕捉されたイオンによって散乱された光子が高開口数対物レンズで収集され、光電子増倍管 (PMT) でカウントされました。実験は、各周波数ポイントで 200 回繰り返されました。VECSEL からの UV 光は、周波数が青色に離調されている(線の中心周波数より上)ときにイオンの運動状態が大幅に変化しないように、各実験中に $25\mu\text{s}$ パルスで照射されました。図 6 は、共鳴上のレーザー周波

数のスキャンを示しています。原子線幅は 69 ± 3 MHz と測定された。自然線幅 41.8 MHz [35] より上の残留幅は、残留ドップラー広がりによるものと考えられます。レーザー冷却を実証するために、レーザーは線の中心周波数より約 10 MHz 低い周波数でデチューンされました。ファイバーレーザーシステムによるドップラー冷却と比較して、イオンはイオン寿命に変化を与えることなくトラップ内に閉じ込められます。デコヒーレンス支援分光法 [35] を使用して、 $^2S_{1/2} \leftrightarrow ^2P_{1/2}$ 遷移を調べた。図 6 に結果のスペクトルを示す。IC システムは、 $^{25}\text{Mg}^+$ の ≈ 2.74 THz 微細構造分裂にわたって調整できます。

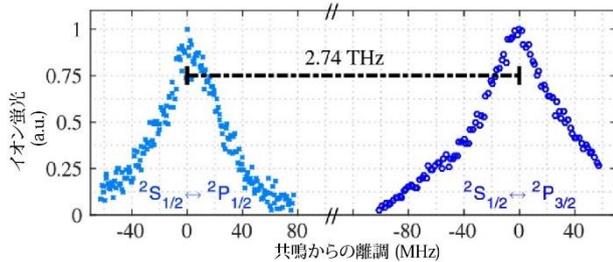


図 6. 単一のトラップされた $^{25}\text{Mg}^+$ イオンの $^2S_{1/2} \leftrightarrow ^2P_{1/2}$ および $^2S_{1/2} \leftrightarrow ^2P_{3/2}$ 遷移の分光法。 $^2S_{1/2}$ から $^2P_{1/2}$ および $^2P_{3/2}$ レベルへの遷移のゼロ離調点は、それぞれ 1069.34 および 1072.08 THz を基準としています [35]。微細構造の分離は約 2.74 THz です。各スペクトルは独立して正規化されています。

誘導ラマン遷移を伴う実験では、2 つの超微細状態 $|\uparrow\rangle = ^2S_{1/2}[F=2, M_F=2]$ と $|\downarrow\rangle = ^2S_{1/2}[F=3, M_F=3]$ で構成される量子ビットを選択します。IC システムを使用して、ドップラー冷却されたトラップイオンをトラップの量子基底状態に近い位置で分解サイドバンド冷却 [1] を実行します。2 つのラマンビーム間の周波数差は、赤色サイドバンド (RSB) 周波数、つまり $|\downarrow\rangle \leftrightarrow |\uparrow\rangle$ 遷移周波数から冷却される運動モードの周波数を引いた値に設定されます。RSB パルスは、 $|\downarrow, n\rangle \leftrightarrow |\uparrow, n-1\rangle$ からの遷移を促進します。ここで、 n はトラップイオンの運動状態を表す量子数です [1]。その後、再ポンピングにより、量子ビットは運動量子が 1 つ少ない基底電子状態 $|\downarrow, n-1\rangle$ になります。このシーケンスは、イオンが $|\downarrow, n=0\rangle$ 状態に達するまで繰り返されます。イオンが基底状態に近い場合、赤色サイドバンド周波数でのイオンの励起は強く抑制されますが、 $|\downarrow, n\rangle \leftrightarrow |\uparrow, n+1\rangle$ 青色サイドバンド (BSB) 遷移の励起は抑制されません。図 7 は、IC システムを使用して基底状態を冷却した後のトラップの放射状運動モードの最初の赤色サイドバンドと青色サイドバンドの周波数スキャンを示しています。冷却後に運動状態の占有が熱分布を持つと仮定すると、特定の運動モードの平均運動状態占有数 $\langle n \rangle$ は、そのモードの RSB ピークと BSB ピークの高さの比から計算できます [1]。図 7 のデータから、 $\langle n \rangle = 0.008 \pm 0.013$ を計算しました。これは、このラジアルモードが運動基底状態にある確率が高いことと一致しています。基底状態冷却後の量子ビットの $|\uparrow, n\rangle \leftrightarrow |\downarrow, n\rangle$ キャリア遷移での Rabi フロップは、3

つの運動モードすべてを図 8 に示します。この実験では、Rabi 周波数は 191.1 ± 0.1 kHz、 $1/e$ 減衰時間は 77 ± 3 μs でした。デコヒーレンスは、共鳴外の光子散乱、磁場ノイズ、および近くのトラップ表面からの運動加熱の組み合わせによるものです。

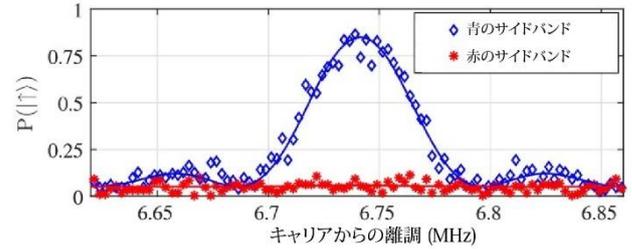


図 7. 基底状態冷却後の最初のラジアル運動モードの赤と青のサイドバンドの $|\uparrow\rangle$ 状態分布。ここから平均運動状態占有数 $\langle n \rangle = 0.008 \pm 0.013$ を抽出した。

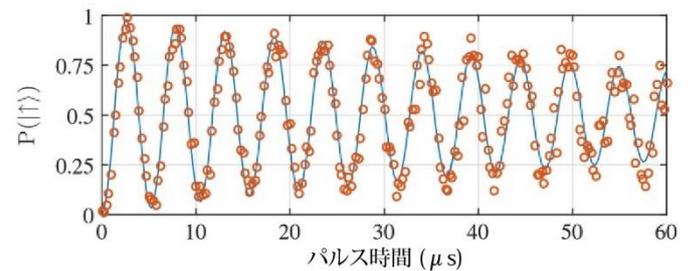


図 8. 基底状態冷却された $^{25}\text{Mg}^+$ イオンの $|\downarrow\rangle \leftrightarrow |\uparrow\rangle$ キャリア遷移における Rabi フロッピング。実線は指数関数的に減少する正弦曲線で、データにフィッティングして Rabi 周波数 191.1 ± 0.1 kHz、 $1/e$ 減衰時間 77 ± 3 μs を得ています。

4. 結論

我々はマグネシウムイオンの生成、冷却、および操作に必要な波長を生成するための光ポンピング VECSEL システムを開発しました。将来的には、より高い光損傷閾値を持つ $1118\text{nm} \rightarrow 559\text{nm}$ 周波数倍増ステージを使用することで、我々のシステムは、誘導ラマン遷移によるフォールトトレラントな 2 量子ビットエンタングルメントゲートを実現するのに十分な UV パワーを生成できるようになります [36]。これは、我々の VC レーザーセットアップのようにキャビティ内周波数倍増によって、または外部共鳴増強第二高調波発生によって実現できます [16]。通常、キャビティ内第二高調波発生は、外部共鳴周波数倍増よりも、比較的高い第二高調波パワーをより単純な光学システムで生成できるという利点があります。しかし、我々のアプリケーションに必要な周波数安定性と調整可能性を備えたキャビティ内周波数倍増 VECSEL を確実に構築することはより困難であることがわかりました。私たちの今後の研究は、2 つの周波数倍増方式の使用に伴う課題をより深く理解することを目指しています。

VECSEL アーキテクチャの出力スケール Rabi リティにより、複数の量子システムの個別のレーザーアドレス指定を必要とするシステムにとって有望な候補となります。VECSEL システムは、波長調整範囲が広く、線幅が狭く、強度ノイズが低いため、原子および分子物理学の実験に使用されるレーザーシステムの複雑さとコストを大幅に削減できる可能性があります。

資金提供: NIST 量子情報プログラム、国家情報長官室、情報高等研究プロジェクト活動(IARPA)、海軍研究局(ONR)、SuomenAkademia プロジェクト QUBIT(278388)、Tekes(フィンランド革新資金提供機関)プロジェクト ReLase(40064/14)。

謝辞: 三角帽子法のデータ収集と分析にご協力いただいた JeffSherman 博士に感謝します。また、本論文にコメントをいただいた DavidHume 博士と YongWan 博士にも感謝します。

参考文献

- D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe, and D. J. Wineland, "Quantum dynamics of single trapped ions," *Rev. Mod. Phys.* 75, 281–324 (2003).
- A. Steane, "The ion trap quantum information processor," *Appl. Phys. B* 64, 623–643 (1997).
- D. F. V. James, "Quantum dynamics of cold trapped ions with application to quantum computation," *Appl. Phys. B* 66, 181–190 (1998).
- R. Blatt and D. J. Wineland, "Entangled states of trapped atomic ions," *Nature* 453, 1008–1015 (2008).
- J. W. Britton, B. C. Sawyer, A. C. Keith, C. C. J. Wang, J. K. Freericks, H. Uys, M. J. Biercuk, and J. J. Bollinger, "Engineered two-dimensional Ising interactions in a trapped-ion quantum simulator with hundreds of spins," *Nature* 484, 489–492 (2012).
- R. Blatt and C. F. Roos, "Quantum simulations with trapped ions," *Nat. Phys.* 8, 277–284 (2012).
- C. Monroe, W. C. Campbell, E. E. Edwards, R. Islam, D. Kafri, S. Korenblit, A. Lee, P. Richerme, C. Senko, and J. Smith, "Quantum simulation of spin models with trapped ions," in *Proceedings of the International School of Physics 'Enrico Fermi,' Course 189*, M. Knoop, I. Marzoli, and G. Morigi, eds. (2015), pp. 169–187.
- C. Schneider, D. Porras, and T. Schaetz, "Experimental quantum simulations of many-body physics with trapped ions," *Rep. Prog. Phys.* 75, 024401 (2012).
- T. Rosenband, D. B. Hume, P. O. Schmidt, C. W. Chou, A. Brusch, L. Lorini, W. H. Oskay, R. E. Drullinger, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker, S. A. Diddams, W. C. Swann, N. R. Newbury, W. M. Itano, D. J. Wineland, and J. C. Bergquist, "Frequency ratio of Al⁺ and Hg⁺ single-ion optical clocks; metrology at the 17th decimal place," *Science* 319, 1808–1812 (2008).
- S. Kotler, N. Akerman, N. Navon, Y. Glickman, and R. Ozeri, "Measurement of the magnetic interaction between two bound electrons of two separate ions," *Nature* 510, 376–380 (2014).
- C. Ospelkaus, U. Warring, Y. Colombe, K. R. Brown, J. M. Amini, D. Leibfried, and D. J. Wineland, "Microwave quantum logic gates for trapped ions," *Nature* 476, 181–184 (2011).
- D. J. Wineland, R. E. Drullinger, and F. L. Walls, "Radiation-pressure cooling of bound resonant absorbers," *Phys. Rev. Lett.* 40, 1639–1642 (1978).
- D. N. Madsen, S. Balslev, M. Drewsen, N. Kjærgaard, Z. Videsen, and J. W. Thomsen, "Measurements on photo-ionization of 3s3p¹P₁ magnesium atoms," *J. Phys. B* 33, 4981–4988 (2000).
- Y. Wan, F. Gebert, F. Wolf, and P. O. Schmidt, "Efficient sympathetic motional-ground-state cooling of a molecular ion," *Phys. Rev. A* 91, 043425 (2015).
- B. Hemmerling, F. Gebert, Y. Wan, D. Nigg, I. V. Sherstov, and P. O. Schmidt, "A single laser system for ground-state cooling of ²⁵Mg⁺," *Appl. Phys. B* 104, 583–590 (2011).
- A. Friedenauer, F. Markert, H. Schmitz, L. Petersen, S. Kahra, M. Herrmann, T. Udem, T. W. Hänsch, and T. Schätz, "High power all solid state laser system near 280 nm," *Appl. Phys. B* 84, 371–373 (2006).
- J. Zhang, W. H. Yuan, K. Deng, A. Deng, Z. T. Xu, C. B. Qin, Z. H. Lu, and J. Luo, "A long-term frequency stabilized deep ultraviolet laser for Mg⁺ ions trapping experiments," *Rev. Sci. Instrum.* 84, 123109 (2013).
- Y. Feng, L. R. Taylor, and D. B. Calia, "150 W highly-efficient Raman fiber laser," *Opt. Express* 17, 23678–23683 (2009).
- S. C. Burd, D. Leibfried, A. C. Wilson, and D. J. Wineland, "Optically pumped semiconductor lasers for atomic and molecular physics," *Proc. SPIE* 9349, 93490P (2015).
- M. Kuznetsov, "VECSEL semiconductor lasers: A path to high-power, quality beam and UV to IR wavelength by design," in *Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology*, O. G. Okhotnikov, ed. (WileyVCH, 2010), Chap. 1.
- F. Zhang, B. Heinen, M. Wichmann, C. Möller, B. Kunert, A. Rahimi-Iman, W. Stolz, and M. Koch, "A 23-watt single-frequency vertical-external-cavity surface-emitting laser," *Opt. Express* 22, 12817–12822 (2014).
- Y. Kaneda, J. M. Yarborough, Y. Merzlyak, A. Yamaguchi, K. Hayashida, N. Ohmae, and H. Katori, "Continuous-wave, single-frequency 229 nm laser source for laser cooling of cadmium atoms," *Opt. Lett.* 41, 705–708 (2016).
- J. Paul, Y. Kaneda, T.-L. Wang, C. Lytle, J. V. Moloney, and R. J. Jones, "Doppler-free spectroscopy of mercury at 253.7 nm using a high-power, frequency-quadrupled, optically pumped external-cavity semiconductor laser," *Opt. Lett.* 36, 61–63 (2011).
- B. Cocquelin, D. Holleville, G. Lucas-Leclin, I. Sagnes, A. Garnache, M. Myara, and P. Georges, "Tunable single-frequency operation of a diode-pumped vertical external-cavity laser at the cesium D₂ line," *Appl. Phys. B* 95, 315–321 (2009).
- S. Ranta, T. Hakkarainen, M. Tavast, J. Lindfors, T. Leinonen, and M. Guina, "Strain compensated 1120 nm GaInAs/GaAs vertical external-cavity surface-emitting laser grown by molecular beam epitaxy," *J. Cryst. Growth* 335, 4–9 (2011).
- A. C. Wilson, C. Ospelkaus, A. P. VanDevender, J. A. Mlynek, K. R. Brown, D. Leibfried, and D. J. Wineland, "A 750-mW, continuous-wave, solid-state laser source at 313 nm for cooling and manipulating trapped ⁹Be⁺ ions," *Appl. Phys. B* 105, 741–748 (2011).
- D. J. Wineland, C. Monroe, W. M. Itano, D. Leibfried, B. E. King, and D. M. Meekhof, "Experimental issues in coherent quantum-state manipulation of trapped atomic ions," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 103, 259–328 (1998).
- G. E. Obarski and J. D. Splet, "Transfer standard for the spectral density of relative intensity noise of optical fiber sources near 1550 nm," *J. Opt. Soc. Am. B* 18, 750–761 (2001).
- J. E. Gray and D. W. Allan, "A method for estimating the frequency stability of a single oscillator," in *Proceedings of the 28th Annual Symposium on Frequency Control* (1974), pp. 243–246.
- J. J. Snyder, R. K. Raj, D. Bloch, and M. Ducloy, "High-sensitivity nonlinear spectroscopy using a frequency-offset pump," *Opt. Lett.* 5, 163–165 (1980).
- A. Castrillo, E. Fasci, G. Galzerano, G. Casa, P. Laporta, and L. Gianfrani, "Offset-frequency locking of extended-cavity diode lasers for precision spectroscopy of water at 1.38 μm," *Opt. Express* 18, 21851–21860 (2010).
- E. Kantola, T. Leinonen, S. Ranta, M. Tavast, and M. Guina, "High efficiency 20 W yellow VECSEL," *Opt. Express* 22, 6372–6380 (2014).
- T. W. Hänsch and B. Couillaud, "Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity," *Opt. Commun.* 35, 441–444 (1980).
- Y. Colombe, D. H. Slichter, A. C. Wilson, D. Leibfried, and D. J. Wineland, "Single-mode optical fiber for high-power, low-loss UV transmission," *Opt. Express* 22, 19783–19793 (2014).
- G. Clos, M. Enderlein, U. Warring, T. Schaetz, and D. Leibfried, "Decoherence-assisted spectroscopy of a single Mg⁺ ion," *Phys. Rev. Lett.* 112, 113003 (2014).
- R. Ozeri, W. M. Itano, R. B. Blakestad, J. Britton, J. Chiaverini, J. D. Jost, C. Langer, D. Leibfried, R. Reichle, S. Seidelin, J. H. Wesenberg, and D. J. Wineland, "Errors in trapped-ion quantum gates due to spontaneous photon scattering," *Phys. Rev. A* 75, 042329 (2007).