

紫外光源を用いた捕獲イオンの高分解能分光

占部 伸二

High-Resolution Spectroscopy of Trapped Ions by Using Ultraviolet Light Sources

Shinji URABE

Recent developments of the ultraviolet light sources for high-resolution spectroscopy of trapped ions are described. All-solid-state ultraviolet light sources have been developed for laser cooling of Cd^+ and Zn^+ ions and new spectroscopic data of these ions are obtained. Ca^+ ions can be laser-cooled by using a grating-stabilized ultraviolet laser diode and it has become possible to construct a compact light-source system for high-resolution spectroscopy of this ion.

Key words: trapped ions, laser cooling, ultraviolet light source, ultraviolet laser diode, high-resolution spectroscopy

イオントラップ中のイオンをレーザー冷却すると空間の微小な領域に擾乱の少ない状態で長い時間閉じ込めておくことができるため、高分解能分光実験などが可能になる。冷却イオンを用いた新しい周波数標準の研究が精力的に進められており、新しい周波数標準の実現の可能性が高まっている。光領域における周波数標準の最近の発展は著しい。冷却された1個の Sr^+ 、 Hg^+ 、 In^+ イオンの光領域における禁制遷移のスペクトルが14桁の分解能で測定され、これを用いた安定化レーザーの絶対周波数も12桁の精度で決められるようになってきた。また、量子計算への応用などの量子光学分野でも活発に研究が行われ、冷却イオンのもつれ合った量子状態の発生や基本ゲート実験などが Be^+ あるいは Ca^+ イオンを用いて行われている。捕獲イオンのレーザー冷却やそれに関連する各種の実験では紫外域の光源が必要になることが多い。このため、紫外域の光源技術の進展によってこの分野の研究の可能性がより拡大する。本稿では、これらの実験に必要な紫外域の光源技術を中心に最近の研究のいくつかを紹介する。

捕獲イオンを用いた実験では、光源として単一モードで波長可変な連続コヒーレント光が必要である。イオンの基底状態からの遷移は紫外あるいは深紫外域に存在することが多い。レーザー冷却を行うには数十 μW 程度のパワーが必要である。狭い空間に局在するイオンに対して光を絞

込んで照射することによって、容易に飽和強度以上にすることができる。このため、連続波レーザーの波長変換により必要な光を得ることができる。捕獲イオンのレーザー冷却が始まった初期の実験では、色素レーザーおよびその第二高調波を用いて冷却ができる Mg^+ や Ba^+ について実験が行われた。その後、光源の開発によって多くのイオン(Hg^+ 、 Sr^+ 、 Yb^+ 、 Ca^+ 、 Cd^+ 、 In^+ 、 Zn^+)が研究の対象となってきた。最近では、半導体レーザー(LD: laser diode)の発振波長域の拡大や高出力化、LD励起YAGレーザーやチタンサファイアレーザーなどの固体レーザーの開発、および非線形結晶を用いた波長変換技術の発展により、紫外あるいは深紫外域において小型で信頼性の高い連続コヒーレント光が得られるようになってきた。このため、適当な光源がなく実験の対象とならなかった深紫外域に遷移をもつイオンについても実験が可能になり、新たな分光データなどが得られるようになった。これらのうち代表的なイオンは Cd^+ 、 Zn^+ イオンなどである。

Cd^+ イオンは214.5 nmに基底状態からの遷移があり、レーザー冷却に用いることができる。このイオンは質量数が111と113という2つの奇数同位体を持ち、超微細構造準位間のマイクロ波遷移の周波数は約15 GHzと比較的高い。また、核スピンのために1/2でエネルギー準位の構造が簡単であるため、冷却イオンをマイクロ波の周波数標準

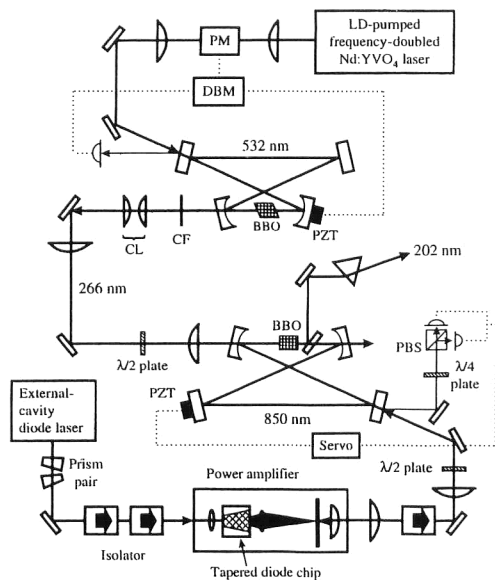


図1 Zn⁺イオンのレーザー冷却用全固体 202 nm 光源システム⁴⁾.

に応用する場合には有力な候補となる。冷却に必要な 214.5 nm 光は、半導体レーザーのみを用いたシステムで発生することが可能である。半導体レーザーからの 858 nm 光をテーパー型の LD アンプで約 500 mW まで増幅し、外部共振器内に置いた非線形結晶 KNbO₃ に入射して第二高調波の 429 nm 光を発生させる。さらに、これを外部共振器内に置いた非線形結晶 β -BaB₂O₄ (BBO) を用いて 214.5 nm 光を発生させる。この方法により、約 400 μ W の出力が得られている¹⁾。イオンを冷却するとドップラー広がりを除くことができるため高分解能分光が可能になり、同位体シフトなどを容易に測定することができる。イオントラップ中に冷却された Cd⁺ イオンを用いて同位体シフトの測定が行われ²⁾、また光とマイクロ波の二重共鳴法によって超微細構造定数が約 11 桁の精度で測定されている³⁾。

Zn⁺ イオンを冷却するためには 202 nm のレーザー光が必要である。紫外光発生のためには波長変換に使われる BBO の第二高調波の発生限界が 205 nm であるため、波長変換で発生させるには複雑な構成が必要になる。この光源も全固体化することが可能である。図 1 は、Zn⁺ イオンの冷却に必要な 202 nm 光の発生システムを示したものである⁴⁾。202 nm 光は和周波混合により発生させる。和周波混合のための 1 つの光は、単一モードの LD 励起 Nd:YVO₄ レーザーの第二高調波の 532 nm 光を外部共振器内に置かれた BBO を用いて波長変換して、第二高調波の 266 nm を発生させる。5 W の 532 nm 光の入力に対して約 800 mW の出力が可能である。もう 1 つの光には、半導体レーザーからの 850 nm 光をテーパー型の LD アンプで増幅した約 500 mW の出力を用いる。和周波発生用の BBO は、850 nm 光

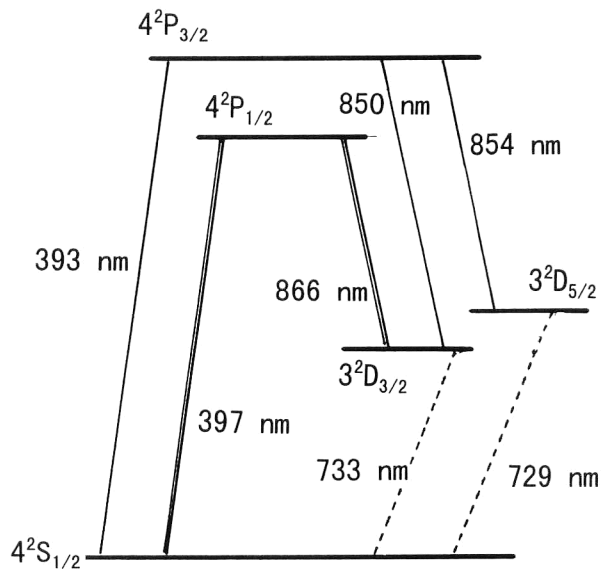


図2 Ca⁺ イオンのエネルギー準位図。

を蓄積する外部共振器内に置かれている。この共振器内に置かれた結晶に 266 nm 光を重ねることにより 202 nm 光を発生させ、出力として約 100 μ W が得られている。半導体レーザーの周波数を掃引することにより、Zn⁺ イオンのレーザー冷却用の光源として十分用いることができる。この光源を用いて、リニア型のイオントラップ中の Zn⁺ イオンをレーザー冷却することにより、202 nm 遷移の同位体シフトが実験的に初めて測定されている。

最近、紫色半導体レーザーが開発され入手可能となってきた。この光源は紫外光源というには適切でないかもしれないが、400 nm 以下の紫外域の光源も 390 nm 程度までは入手することができる。Ca⁺ イオンはレーザー冷却に必要な光の波長は 397 nm と 866 nm、また光の周波数標準などに使われる電気四重極子遷移の励起に必要な光の波長は 729 nm であるため、比較的实验しやすいイオンのひとつである。これまでは冷却に必要な 397 nm 光はチタンサファイアレーザーあるいは赤外半導体レーザーの第二高調波で発生させていたが、半導体レーザーを直接用いることも可能になってきた。しかしながら、半導体レーザーを使う場合には、それに特有の新たな問題も発生する。図 2 は、Ca⁺ イオンのエネルギー準位図を示している。Ca⁺ イオンのレーザー冷却は、397 nm の $^2S_{1/2} - ^2P_{1/2}$ 遷移と 866 nm の $^2P_{1/2} - ^2D_{3/2}$ 遷移とで閉じたサイクルを作って行う。397 nm の遷移の近くには、393 nm に $^2S_{1/2} - ^2P_{3/2}$ 遷移が約 4 nm 離れて存在する。この遷移が励起されると、イオンは $^2P_{3/2}$ 準位を経て寿命が約 1 秒である準安定状態 $^2D_{5/2}$ にシエルピングされて、レーザー冷却サイクルからはずれる。半導体レーザーの出力には、レーザー発振によるコヒーレントな

成分に加えてレーザー媒質からの自然放出光成分も含まれる。この自然放出光は非常に弱く、またスペクトル幅は約数 nm 程度であるが、393 nm の微量な成分が含まれているとこの遷移が励起される。この遷移を励起する確率は非常に小さいが、 $^2D_{5/2}$ 準位の寿命が長いので、イオンは冷却サイクルから離れる時間が長くなって、レーザー冷却に大きな影響を及ぼす。紫外半導体レーザーを用いる場合には回折格子を用いた外部共振器によって単一モード化することが必要であるが、さらに出力に干渉フィルターあるいは回折格子などを挿入して自然放出光を取り除くことが必要である。取り除かない場合には冷却が不安定になり、イオンからの蛍光が時間的に大きく変動することなどが観測される。非常に狭い干渉フィルターを出力光に挿入すると、蛍光の時間的な変動が消えてガス状態から低温化を示す結晶状態へのきれいな相転移を観測することができる⁵⁾。このような対策を施すと紫外半導体レーザーをレーザー冷却に使用することが可能であり、半導体レーザーの基本波のみを用いてレーザー冷却、高分解能分光や量子光学実験を行うことができる。今後は、小型で安価な構成で実験を行うことができるため、イオントラップを用いた各種の実験の進展に大きく寄与していくものと考えられる。

本稿をまとめるにあたりご協力いただいた通信総合研究所の渡辺昌良博士に深く感謝する。

文 献

- 1) K. Matsubara, U. Tanaka, H. Imajo, K. Hayasaka, R. Ohmukai, M. Watanabe and S. Urabe: "An all-solid-state tunable 214.5 nm continuous-wave light source by using two-stage frequency doubling of a diode laser," *Appl. Phys. B*, **67** (1998) 1-4.
- 2) H. Imajo, K. Hayasaka, R. Ohmukai, U. Tanaka, M. Watanabe and S. Urabe: "High-resolution ultraviolet spectra of sympathetically-laser-cooled Cd^+ ions," *Phys. Rev. A*, **53** (1996) 122-125.
- 3) U. Tanaka, H. Imajo, K. Hayasaka, R. Ohmukai, M. Watanabe and S. Urabe: "Determination of the ground-state hyperfine splitting of trapped $^{113}Cd^+$ ions," *Phys. Rev. A*, **53** (1996) 3982-3985.
- 4) K. Matsubara, U. Tanaka, H. Imajo, M. Watanabe and S. Urabe: "All-solid-state light source for generation of continuous-wave coherent radiation near 202 nm," *J. Opt. Soc. Am. B*, **16** (1999) 1668-1671.
- 5) K. Toyoda, A. Miura, K. Hayasaka, M. Watanabe and S. Urabe: "Laser cooling of calcium ions by using ultraviolet laser diodes: Significant induction of electron-shelving transitions," *Opt. Lett.*, **26** (2001) in press.

(2001年7月25日受理)