レーザー解説

イオン蓄積技術とそのレーザーの開発

占部伸二*・渡辺昌良*・今城秀司*・早坂和弘*

(1991年5月13日 受理)

Stored Ion Techniques and the Developments of Lasers
for Their ApplicationsShinji URABE*, Masayoshi WATANABE*, Hidetsuka IMAJO*
and Kazuhiro HAYASAKA*

(Received May 13, 1991)

This paper describes the studies on ion traps and laser cooling techniques and presents typical results of ion detection and laser cooling experiments. Preliminary results are also presented of generating continuous-wave coherent VUV radiation for ion storage.

Key Words : Stored ion, Ion traps, Laser cooling, VUV CW coherent radiation.

1. はじめに

イオン蓄積技術は電磁場を用いて、イオンを超高真空中の空間にため込み、マイクロ波や光領域のイオンの分光特性や他の粒子との相互作用の研究等に用いられてきた¹⁾。特に、粒子を長く空間に蓄積できるため、電磁波との長時間の相互作用が期待でき、高分解能のスペクトルが得られることに特徴がある。イオントラップ内のイオンの場合、空間の微小領域にレーザーを用いて1 K以下に比較的容易に冷却できるため、ドップラー効果によるスペクトルの広がり、シフトを除去でき、超微細構造の精密測定等の高分解能な分光測定が可能である^{2, 3)}。最近では、一個あるいは数個のイオンをため込み、量子跳躍⁴⁾、イオンクラスターの観測⁵⁾等の基礎物理

に関する新しい実験結果も報告されている。また、高精度のスペクトルが得られることから、これを用いたマイクロ波、光領域の高確度な新しい周波数標準も提案されており、実用的観点からも大きな注目を集めている⁶⁻⁹⁾。

イオントラップを用いて高分解能分光実験を行うには、レーザー冷却技術を併用することが必要である。これまで主に実験されているイオンはスペクトル構造が簡単なアルカリ土類金属のイオン及びそれと類似の構造を持つイオンである。これらのイオンを冷却するには、イオンの共鳴線に一致した、可視から紫外域にかけての波長可変で周波数の安定な連続発振レーザーを準備することが必要である。用いるレーザーとしては現在のところ波長可変な色素レーザーが中心であるが、イオンのスペクトルは紫外域

* 郵政省通信総合研究所関西支所 (〒651-24 神戸市西区岩岡町岩岡588-2)

* Kansai Advanced Research Center, Communications Research Laboratory (588-2 Iwaoka, Iwaoka-cho, Nishi-ku, Kobe 651-24)

に多く存在しているため、非線形光学結晶を用いた第二高調波発生あるいは複数のレーザーを用いた周波数混合による発生が必要となる。

本文では、rfトラップ及びペニングトラップ技術の概要、これらを用いた蓄積イオンの検出とレーザー冷却実験、及び水銀イオンのレーザー冷却のための真空紫外域の連続発振コヒーレント光の開発について、最近の我々のグループの成果を中心に紹介する。

2. イオントラップ技術とレーザー冷却

2.1 イオントラップ技術

イオントラップは電磁場を用いることにより、イオンを空間の一定の領域内に蓄えるもので、rf電場と静電場を用いるrfトラップ(ポールトラップ)及び静磁場と静電場を用いるペニングトラップが主に用いられている¹⁾。イオントラップは、Fig. 1に示すように三枚の回転双曲面の電極により構成される。図に示すようにポテンシャル U を半径 r_0 のリング電極と $2z_0$ の間隔を持つキャップ電極の間に加えた場合には、トラップ内のポテンシャルは以下になる。

$$\phi = U(2z^2 - r^2) / 2r_0^2 \quad (1)$$

ただし、 $r_0^2 = 2z_0^2$ である。静電ポテンシャルのみを加え、回転対称軸方向(z 軸)に磁場を加えて動作させるのがペニングトラップである。運

Fig. 1 Electrode configuration of an ion trap.

動方程式を解くことにより、イオンの運動は z 軸方向の調和振動、それと垂直な面内の大きな回転角速度を持つサイクロトロン運動、ゆっくりとした回転角速度を持つマグネトロン運動の合成で表される(Fig. 2 (a))。一方、rfポテンシャル $V\cos\Omega t$ 、及び静電ポテンシャル U_0 を加えて $U = U_0 + V\cos\Omega t$ として動作させるのがrfトラップで、このトラップは、(1)式から導かれるトラップ内の不均一な電場内で、イオンがrf電場により強制振動を受けた場合に、一周期平均の力が常に三次元方向とも中心に向かう性質を利用する。平均の運動に対しては、楕円型のポテンシャルが生じ、イオンの運動は小さなリップル(外から加えたrf周波数で振動する)の加わった三次元の調和振動で表される(Fig. 2 (b))。

Fig. 2 (a) Schematic representation of a typical ion motion in a Penning trap. (b) Schematic representation of a typical ion motion in an rf trap.

イオントラップを高分解能分光実験に用いる場合には、各々のトラップの特徴を考慮して使い分ける必要がある。ペニングトラップは強い磁場(1 T程度)を必要とすることから、装置が大型になること、及び大きなゼーマンシフトが生ずることなどの欠点を持つが、レーザー冷却が比較的容易で、多くのイオンを同時に冷却することができ、光検出等において高いS/Nの信号が得られる。一方、rfトラップは装置が小型となるが、常にrf電場を加えて動作させるため、イオンの温度が高くレーザー冷却が困難で、トラップの中心に少数個のイオンしか冷却できない。一個のイオンを蓄積するミニトラップの実験にはこのトラップが用いられる。

イオントラップを安定に動作させるには、各々のトラップに対する安定条件を満足させる必要がある。これはイオントラップの大きさ、イオンの質量、加えるポテンシャル、磁場の大きさ及びrf周波数等で決められる^{10,11)}。イオントラップの実験には、 1×10^{-7} Paから 1×10^{-8} Pa程度の超高真空が必要である。これは、蓄積されたイオンを他の粒子との衝突により失わないためである。特に、ペニングトラップの場合には注意が必要である。

2.2 蓄積イオンのレーザー冷却

レーザーを使って原子を冷却しようという考えは、空間を自由に運動している原子に対して最初に提案された¹²⁾。その後、この方法は空間に束縛されているイオンを冷却するほうが実験的に容易であったため、蓄積イオンの冷却に最初に試みられた^{13,14)}。最近では、中性の原子の冷却実験も盛んに行われている¹⁵⁾。詳細な解説は他の文献^{16,17)}にゆずり、ここではレーザー冷却の基本的な考えと蓄積イオンの冷却に必要なレーザーの性能について簡単にまとめる。

光の吸収の中心角周波数が ω_0 で、熱運動によりドップラー幅 ω_D を持つ質量 M の二準位系の原子群に、ドップラー幅内の低周波側に同調した角周波数 ω を持つレーザー光を一つの方向からあてた場合を考える。このとき光を吸収する

原子は、 $\omega + kv = \omega_0$ を満足する光の方向に向かっていく原子群である。一方、光を吸収した原子が自然放出により元の状態にもどる場合には等方的に光を放出するため、平均すると原子は、 ω_0 の光を放出することになる。このため、原子はレーザー光を吸収、放出するたびに平均として $\hbar kv$ のエネルギーを失い、 $\Delta v = \hbar k / M$ の減速を受けることになる。したがって、光の吸収、放出を繰り返し、減速される割合に応じて光の周波数をドップラー幅の低周波側から共鳴の中心に向かって掃引すると、この方向に進む原子を冷却することができる。空間を飛び回っている原子の場合、光と同一方向、あるいは他の方向の運動に対しては、冷却できないので、 $\pm x$, $\pm y$, $\pm z$ の6方向からレーザーを照射するなどの工夫が必要になる。一方、空間的に束縛された蓄積イオンの場合には条件が緩和される。イオンが三次元の調和振動を行い、その角周波数を Ω_x , Ω_y , Ω_z とすると、イオンの上準位の自然幅 γ が振動の角周波数より十分小さい場合には、イオンは光と相互作用をしている間に多くの振動を繰り返す。このため、イオンの吸収、放出する光は周波数変調をうけ、多くの側帯波を生ずることになる。レーザー光を低周波側の一つの側帯波 $\omega_0 - n\Omega_z$ に同調させた場合、イオンは光を吸収し上準位へ励起され、自然放出により光を等方的に放出し、基底状態へもどる。光の放出はすべての側帯波にわたるため、平均すると中心の周波数の光を放出する。このため、一回の光の吸収、放出で、平均して $n\Omega_z$ のエネルギーを失うことになり冷却される。イオンの上準位の自然幅が振動の角周波数より十分大きな場合には、自由原子の場合と扱いはほぼ同じになるが、蓄積イオンの場合には一方向のレーザー光のみで、すべての自由度を同時に冷却することが可能である。これは、イオン間のクーロン相互作用によって、一つの自由度を冷却すると複数個のイオンの場合、他の自由度も同時に冷却できること、及び斜めの方向(例えば $x+y+z$ 方向)から光を入射させることにより、三次元のすべての側帯波にレーザーを同調させることが可

能になるためである。

レーザー冷却を行う場合には、連続発振の単一モードレーザーが必要である。効率的に冷却を行うにはレーザーのスペクトル幅は原子の自然幅より狭いことが要求される。最近の実験では参照共振器で安定化された数MHz以下のものが使われている。一方、レーザーの出力については、大きな出力は要求されず、10 μ W程度のパワーでも冷却可能である。レーザー冷却の冷却速度は、ドップラー広がりスペクトルを仮定した場合、一つの自由度に対し、

$$dE/dt = (I \sigma_0 / \hbar \omega) \hbar (\omega - \omega_0) (\gamma \pi^{1/2} / 2 \omega_0) \cdot \exp(-((\omega - \omega_0) / \omega_0)^2) \quad (2)$$

で与えられる¹⁶⁾。ここに、 I はレーザーの強度、 $\sigma_0 = \lambda^2 / 2\pi$ は散乱断面積である。一つの例として $\omega - \omega_0 = \omega_0 / 2^{1/2}$ 、 $\lambda = 400$ nm、 $\gamma = 1.4 \times 10^8$ 、及びレーザーの出力10 μ Wを1mm ϕ のスポットに絞った場合を考えると、 dE/dt は約0.022 eV/sとなり、3 eVのイオンに対してドップラー広がり近似した場合には、約130秒で冷却できることになる。実際には、他の自由度との相互作用やその他のイオンへの加熱機構のため更に長い時間が必要となる。冷却時間を短くするためには出力を増加させることが必要である。

2.3 用いられる主なイオン

イオン蓄積実験には、スペクトルの構造が簡単なことから、最外殻に一個の電子を持つアルカリ土類金属のイオン及びそれに類似のイオンが用いられている。Table Iにそれらの一覧表を、レーザー冷却に必要な波長、超微細構造分離とともに示す。一つのレーザー波長が示される2準位系のイオンの場合には一台のレーザーでよいが、二つのレーザー波長を示した3準位系のイオンの場合には、基底準位からの遷移が許される第一励起状態のP準位の下に準安定状態のD準位が存在し、そこにイオンがポンピングされるために、この準位からポンピングバックするレーザーを含めた二台のレーザーが必要である。これまでに、Be⁺, Mg⁺, Sr⁺, Ba⁺, Yb⁺, Hg⁺については、レーザー冷却を含めた高分解能分光実験が報告されている^{3,8,18-21)}。また、Be⁺, Yb⁺, Hg⁺は将来の周波数標準の候補と言われている⁶⁻⁸⁾。

2.4 蓄積イオンの検出とレーザー冷却実験例

2.4.1 rfイオントラップ

Fig. 3に我々の開発したrfイオントラップ装置を示す。回転双曲面の電極はアルミニウムで作られており、大きさはリング電極半径が14.1 mmである。イオンは、オープンから射出

Table I Ions used for ion storage experiments.

Ion	Mass number	Laser wavelength		Hyperfine splittings
B _c ⁺	9	313 nm		1.25 GHz
M _g ⁺	24, 25, 26	280 nm		1.79 GHz (25)
C _a ⁺	40 and other 5 isotope	397 nm	866 nm	
S _r ⁺	88 and other 3 isotope	422 nm	1092 nm	5.0 GHz (87)
B _a ⁺	138 and other 6 isotope	493 nm	650 nm	7.2 GHz (135) 8 GHz (137)
Y _b ⁺	174 and other 6 isotope	369 nm	2.44 μ m	12.6 GHz (171) 10.5 GHz (173)
H _g ⁺	202 and other 6 isotope	194 nm		40.5 GHz (199) 30.6 GHz (201)

Fig. 3 Ion trap equipment and an electrical detection circuit for an rf trap.

される原子ビームと電子銃から射出される電子ビームをトラップの中心に導入し、電子衝撃によってトラップ中心で作られる。トラップ装置はステンレス製の真空槽内に設置され、イオンポンプにより 1×10^{-7} Pa以下まで排気される。rfイオントラップの場合は、軽い緩衝気体によりイオンを室温近くまで冷却できるので¹¹⁾、可変バルブにより、Heガスの導入ができるようになっている。イオントラップを駆動するために、430 kHzのrf電圧と10V程度の静電圧をキャップ電極とリング電極間に加える。rf電圧はシンセサイザの出力を増幅し、トランスの昇圧で作られ、振幅500 Vまでの出力が可能である。

蓄積されたイオンを検出するためには、電気的方法とレーザーを用いた光による方法が主として用いられる。ここでは、Ybイオンを用いた電気的検出法の例を示す。電気的検出法はトラップ内で振動しているイオンにより引き起こされる誘導電流を利用するものである^{22,23)}。図に示すように、LC並列共振回路をキャップ電極間に接続し、イオンのz軸方向の振動周波数と共振周波数を一致させる。弱いrfのプロープ電圧を抵抗を介して共振回路に加え、その両端の電圧を測定する。イオンがトラップ内に蓄積され、プ

ローブ周波数とイオンの振動が一致した場合には、イオンの振動による吸収により、並列共振信号の中に鋭いくぼみが観測される。この信号の高さや幅を測定することにより、蓄積されたイオンの総数を見積もることができる。Fig. 4は、Ybイオンの蓄積実験で得られた典型的な吸収曲線の例である。蓄積されたイオンの個数は 2×10^6 程度と見積もられる。イオンがどのくらい長く蓄積されているかを測定するためには、イオンを生成したのち、イオンの個数の減衰する様子を測定すればよい。Fig. 5は、Heガスを 8×10^{-4} Paまで導入し、イオンを冷却した場合のイオンの個数をイオン生成から60秒、及び3600秒後に測定したものである。この結果により、蓄積時間は約3時間程度と推定される。このように、イオントラップの場合長い蓄積時間が可能で、長い場合には、一日程度の蓄積も可能である。

rfトラップ内のイオンの光検出については、さらに小さなrfイオントラップを開発し、これまでに観測されていないCaイオンの光検出実験を進めている²⁴⁾。

2.4.2 ペニングトラップ

Fig. 6にはBeイオンの蓄積のために開発した

Fig.4 Typical resonance absorption curve obtained in Yb^+ storage experiments. Fig.5 RF absorption signals of Yb^+ obtained after stopping ion creation, a, measured at $T=60$ s b, at $T=3600$ s.

Fig.6 Ion trap equipment for a Penning trap.

ベニングトラップ装置を示す²⁵⁾。トラップ電極は同じくアルミニウム電極で作られ、リング電極の半径は11.3 mmである。イオンはrfトラップの場合と同様に電子衝撃によりトラップ中心で作られる。真空槽はアルミニウムで作られ、イオンポンプにより排気され、到達真空度は 1×10^{-7} Pa以下である。トラップの駆動のための磁場は、ポールピースの間隔が70 mmで、1.2 Tまで発生可能な電磁石により作られる。静電圧は数V程度加えて動作させる。

ベニングトラップ内のBeイオンについても電気的検出が可能である²⁵⁾が、ここではレーザーによる光検出とレーザー冷却実験結果の例を示す²⁶⁾。Fig. 7は、冷却されていない蓄積イオンの蛍光信号を測定したものである。光検出には、Beイオンの $^2S_{1/2} - ^2P_{3/2}$ 遷移(313 nm)を用いた。313 nmの紫外光は、周波数安定化された単一モードのリング色素レーザー(626 nm)の LiIO_3 を用いた第二高調波で得ている。リング共振器内の発生により、数mWまでの出力が可能で、スペクトル幅は1 MHz程度である。イオンからの蛍光は微弱なため、蛍光の検出には光電子増倍管による光子計数法を用いた。図の蛍光スペクトルによるとイオンの温度は約1000 K程度と推定される。Fig. 8は、レーザー冷却を行ったあとに得られた冷却イオンの蛍光スペクトルである。レーザー冷却を行うために、最初にレー

Fig. 7 Fluorescence of hot Be^+ in a Penning trap. Fig. 8 Fluorescence of laser cooled Be^+ in a Penning trap.

ザーの波長をイオンの共鳴中心から 1 GHz 程低い側に設定し、またレーザービームをトラップの中心から 0.5 mm だけ、マグネトロン運動方向に一致するようにずらして設定した。イオンが冷却されるにしたがって、それぞれ中心へ移動させる。図に示すように、蛍光強度が大きく増加し、また狭いスペクトル幅が得られていることがわかる。イオンの温度はこの信号から約 100 mK 以下と推定される。このように冷却されたイオンを用いると、光とマイクロ波の二重共鳴実験などにおいて、精度の高い測定が可能となる。

3. Hg イオン用真空紫外コヒーレント光の発生

蓄積イオンのレーザー冷却には、主として紫外域のレーザーが必要となることが多い。Table II にこれまでに実験が報告された各イオンに対するコヒーレント光の発生方法の一覧を示す。このうち Hg イオンは、大きな超微細構造分離を持ち、将来のマイクロ波の周波数標準の候補の一つであるが、分光実験を行うには、発生の困難な真空紫外域に達する 194 nm の光を準備することが必要である。これまで、NIST のグループによる非線形結晶 KB5 を用いた周波数混合による発生が唯一であり²⁷⁾、それを用いて同グループによる高分解能分光実験が行われている。我々は、Hg イオンの分光への応用、及び連続光でどこまで短波長のものが得られるかという興味のもとに、190 nm 台のコヒーレント連続光の開発を進めている。

Fig. 9 に周波数混合による発生のための実験配置を示す²⁸⁾。周波数混合用の非線形結晶としては BBO を用いた。BBO は透過が 190 nm 以下までであり、しかも位相整合範囲が広く、紫外域の光の発生に適していることが知られている。更に、従来この波長域で用いられてきた KB5 より非線形光学定数が大きいため効率の良い発生が期待できること、及び角度位相整合により広い周波数範囲の光の発生が期待できるためである。基本波レーザーの一つはアルゴンレーザーの第二高調波 (257 nm) を用いた。第二高調波はリング共振器内に置いた ADP を用い、温度位相整合 (約 -12°C) により発生させる。単一モード、1 W の 514 nm 光の入力に対し約 15 mW の出力が可能である。もう一つの基本波レーザーはチタンサファイアレーザーを用いた。このレーザーは赤外域で広い波長可変範囲を持ち、約 1 W 程度の十分な出力が得られる。波長が 792 nm のとき、194 nm の発生が期待され、このときの BBO の位相整合角はセルマイヤーの公式で計算すると 69° となる。二つのレーザー光は Type I の位相整合を満たすように偏光方向を一致させ、厚さ 2.9 mm の BBO に入射させる。発生光はプリズ

Table II Methods of generating the coherent radiation for laser cooling experiments on ion storing.

Be ⁺	313 nm	Second harmonic generation of a CW dye laser (Kiton-red) in LiIO ₃ ^{8,26)}
Mg ⁺	280 nm	Second harmonic generation of a CW dye laser (Rhodamine-110) in AD*P ¹³⁾ .
Ca ⁺	397 nm	Second harmonic generation of a CW Ti:sapphire laser in LiIO ₃ ²⁴⁾ .
	866 nm	GaAlAs laser
Sr ⁺	422 nm	Second harmonic generation of a CW dye laser (sty.9) in KNbO ₃ ¹⁸⁾ .
	1092 nm	Nd ³⁺ -doped fiber laser ¹⁸⁾ .
Ba ⁺	493 nm	CW dye laser (Coumarine 102) ^{14,19)} .
	650 nm	CW dye laser (DCM)
Yb ⁺	370 nm	Second harmonic generation of a CW dye laser (LD 700) in LiIO ₃ ²⁰⁾ .
	2438 nm	Difference-frequency mixing of a 477 nm Ar ⁺ laser and a 592 nm dye laser (R6G) in LiNbO ₃ ²⁰⁾ .
Hg ⁺	194 nm	Sum-frequency mixing of a frequency-doubled 514 nm Ar ⁺ laser and a 792 nm dye laser (LD700) in KB5 ²⁷⁾ .

Fig. 9 Experimental arrangement for generation of continuous-wave coherent radiation at 194 nm.

ムを用いて基本波と分離し、マルチチャンネル光検出器の付いた分光器で検出を行う。

Fig.10は、発生した光の波長を位相整合角に対してプロットしたものである²⁾。チタンサファイアレーザーの波長を738 nmから825 nmまで変えることにより、190.8 nmから196.1 nmまでの発生が観測されている。190.8 nmは非線形光学結晶を用いた連続光としてはおそらく最短波長であると考えられる。図に示される点線はセルマイヤーの公式を用いた位相整合角の計算値を示したものである。計算値より2°から5°ほど大きな値が観測されている。この波長域では結晶の吸収が大きく、屈折率がセルマイヤー

の式からずれるためと考えられる。

現在、更に効率良く発生させるため外部共振器内の周波数混合を進めている。Fig. 9の構成の場合、194nmにおける出力は約数十nWと見積もられるが、最終的にはレーザー冷却に必要な10 μWの出力を目標に研究を進めている。

4. おわりに

イオン蓄積技術及びそれに必要なレーザー開発について、最近の我々のグループの成果を中心に紹介した。蓄積イオンを用いて高分解能分光実験を行うには、現在のところ、高価で大きなレーザー装置が必要である。しかしながら、

Fig.10 Measured phase matching angles vs. sum-frequency wavelength for type-I SFG in BBO. The dotted line is the prediction from the Sellmeire equation.

将来の周波数標準などへの応用を目指す場合には、より簡便で小型のレーザーの開発が是非とも必要である。最近では、半導体レーザーの高出力化、高性能化が図られ²⁹⁾、また波長変換の研究も活発になってきている³⁰⁾。今後はこれらの技術を積極的に取り入れ、小型で高性能なレーザーを開発し、応用していくことが必要になってくると考えられる。

参考文献

- 1) H. Dehmelt: *Radiofrequency Spectroscopy of Stored Ions* (Advanced in Atomic and Molecular Physics Vol.3, Academic Press, 1967) p.53.
- 2) W. M. Itano, J. C. Bergquist and D. J. Wineland: *Science* **237** (1987) 612.
- 3) W. M. Itano and D. J. Wineland: *Phys. Rev.* **A24** (1981) 1367.
- 4) Th. Sauter, W. Neuhauser, R. Blatt and P. E. Toschek: *Phys. Rev. Lett.* **57** (1986) 1696.
- 5) Diedrich, E. Peik, J. M. Chen, W. Quint and H. Walther: *Phys. Rev. Lett.* **59** (1987) 2931.
- 6) G. Werth: *Metrologia* **22** (1986) 190.
- 7) D. J. Wineland, W. M. Itano, J. C. Bergquist and F. L. Walls: *Proc. 35th Ann. Freq. Control Symposium, Ft. Monmouth, May 1981*, p. 602.
- 8) J. J. Bollinger, J. D. Prestage, W. M. Itano and D. J. Wineland: *Phys. Rev. Lett.* **54** (1985) 1000.
- 9) 依田 潤: *応用物理* **58** (1989) 1445.
- 10) R. Iffländer and G. Werth: *Metrologia* **13** (1977) 167.
- 11) F. G. Major and H. G. Dehmelt: *Phys. Rev.* **170** (1968) 91.
- 12) T. W. Hänsch and A. L. Schawlow: *Opt. Commun.* **13** (1975) 68.
- 13) D. J. Wineland, R. E. Drullinger and F. L. Walls: *Phys. Rev. Lett.* **40** (1978) 1639.
- 14) W. Neuhauser, M. Hohenstatt, P. Toschek and H. Dehmelt: *Phys. Rev. Lett.* **41** (1978) 233.
- 15) 清水富士夫: *数理科学* **306** (1988) 27.
- 16) D. J. Wineland and W. M. Itano: *Phys. Rev.* **20** (1979) 1521.
- 17) W. M. Itano and D. J. Wineland: *Phys. Rev.* **25** (1982) 35.
- 18) A. A. Madej and J. D. Sankey: *Opt. Lett.* **15** (1990) 634.
- 19) G. Janik, W. Nagourney and H. Dehmelt: *J. Opt. Soc. Am.* **B2** (1985) 1251.
- 20) H. A. Klein, A. S. Bell, G. P. Barwood and P. Bell: *Appl. Phys.* **B50** (1990) 13.
- 21) J. C. Bergquist, W. M. Itano and D. J. Wineland: *Phys. Rev.* **A36** (1987) 428.
- 22) M. N. Gaboriaud, M. Desaintfuscien and F. G. Major: *Int. J. Mass Spectrum. & Ion Phys.* **41** (1981) 109.
- 23) 占部伸二, 梅津純, 石津美津雄: *応用物理* **54** (1985) 964.
- 24) S. Urabe, H. Imajo, K. Hayasaka and M. Watanabe: *Jpn. J. Appl. Phys.* **30** (1991) L1532.
- 25) H. Imajo and S. Urabe: *Jpn. J. Appl. Phys.*

- 30 (1991) 591.
- 26) H. Imajo and S. Urabe: *19th INS International Symposium on Cooler Rings and their Applications*, Tokyo, Nov. 1990 (World Scientific Publishing Co. PTE LTD).
- 27) H. Hemmati, J. C. Bergquist and W. M. Itano :
Opt. Lett. **8** (1983) 73.
- 28) M. Watanabe, K. Hayasaka, H. Imajo, J. Umezu
and S. Urabe : Appl. Phys. **B53** (1991) 11.
- 29) 大津元一, 中川賢一 : 応用物理 **58** (1989)
1428.
- 30) 佐々木孝友 : 応用物理 **58** (1989) 895.