

Ca イオントラップのための光イオン化用光源の開発

量子・物質工学科 向山研究室
0713087 松田 マリック隆磨

1. 背景と目的

極低温における原子やイオンの物理現象の解明を行う上で、トラップ技術は効率的な実験系として展開できる。研究室では極低温の原子とイオンの混合系の振る舞いを観測しようとしている。両者を狭い領域に同時に捕獲することが前提条件であり、イオンの生成を逐一行うためレーザー照射による Ca 原子の光イオン化を導入した。

2. 原理

2-1 光イオン化

従来の電子線照射によるイオン化では、電子線がトラップ電場を揺るがす影響を考慮する必要があったが、光イオン化では電子線を用いずレーザー照射を行うのでその必要がない。他の利点を挙げるとすれば、必要なイオンの同位体のみを選択的に生成することや、単一のイオンのみを観測することができる。さらに表 1 のように、電子線照射のときよりも短い露光時間で多量のイオン数を得られることがわかっている。

表 1. 露光時間とイオン数の比較 [1]

イオン化光源	露光時間	イオン数
電子線	数分	1～数個
レーザー照射	10秒	数千個

実験では $^{40}\text{Ca}^+$ を生成するため、図 1 の初段の準位 423nm 帯にレーザー光を照射して第一励起を起こさせる。励起に必要な飽和強度は、Ca 原子の 422.673nm 準位におけるスペクトル線幅 34.7MHz から、以下の飽和強度の理論式より計算できる。

$$I_{\text{sat}} = 2 \pi^2 h c \Gamma / 3 \lambda^3$$

h はプランク定数、 c は光速、 Γ はスペクトル線幅、 λ は共鳴光波長となる。計算では $60\text{mW}/\text{cm}^2$ の励起光が必要となることが分かった。

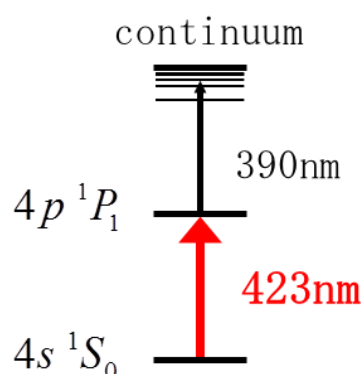


図 1. Ca 原子の励起準位

2-2 第 2 高調波

非線形光学結晶は、レーザーのように強い光を結晶に入射すると誘電媒質が非線形な分極を生じる。非線形な分極とは、生じた電気分極が電場の高次の項に比例する成分を持つことである。ここでは簡単に結晶内での電場と分極の関係について触れる。 $P(0)$ を静的な分極、 ϵ_0 を真空中の誘電率、 χ_1 、 χ_2 、 χ_3 をそれぞれ一次、二次、三次の電気感受率とすると、結晶内での電気分極 P は入射した電場 E と次のような関係をもつ。

$$P = P(0) + \epsilon_0 (\chi_1 E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots)$$

ここで電場 E を、 $E = E_0 \cos \omega t$ と置き換え、電場の二次の項のみを考えると、

$$P(2) = \epsilon_0 \chi_2 E^2 \\ = 1/2 \epsilon_0 \chi_2 E_0^2 (1 + \cos 2\omega t)$$

と変形でき、 $\chi_2 \neq 0$ ならば入射電場の2倍の周波数をもつ電場が発生することになる。同様に、出射する光強度は入射した光強度の二乗に比例することが分かっているがここでは厳密な計算は割愛した。

3. 実験

3-1 光学系

846nm の半導体レーザー(LD)を二つ用意し、一方を回折格子を使用した Littman 配置による外部共振器を組み、もう一方は共振器を組まずに置いた。それぞれを master LD, slave LD としてインジェクションさせることで、入力パワー10mW から40mW まで増幅した。

2つの平面ミラーと2つのカーブミラーからなるボウタイ型共振器を組み、カーブミラーの中心に置いた非線形光学結晶(BIBO)に透過光を入射させる。結晶を入れた状態で共振状態をつくり、結晶の入射角度を調整することで、第2高調波(SHG)を発生させ目的の423nmの光源を得る。

図2に使用した光学系を示した。

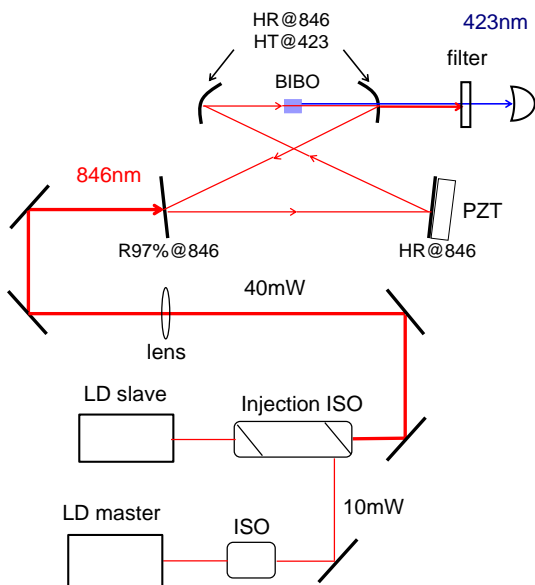


図2. 光学系

3-2 共振器設計

SHG への変換効率を上げるため、結晶中心でのビーム径 ω を最適な大きさに調整する必要がある。結晶長を l 、レイリー長を z_0 としたとき以下の関係式が得られる。^{*}

$$l = 2.84 z_0$$

入射光波長を λ 、結晶の屈折率を n とすればレイリー長は、

$$z_0 = \pi \omega^2 n / \lambda$$

で表される。ビーム径がこれらの関係を満たすとき、より高い変換効率が得られると言われている。[2]

結晶長 10mm、入射光波長 846nm、屈折率を 2 として上式に適用すると、結晶中心でのビーム径 ω は $22 \mu\text{m}$ と見積もることができた。次に、計算によって得られたビーム径を達成するように、共振器長を調整した。具体的には、ビームが結晶へ入射する前のカーブミラー (インプットカップラー) を一つのレンズと考え、このミラーの位置を微調整した。図3の P 点からインプットカップラーまでの距離を $b+100\text{mm}$ 、インプットカップラーから結晶中心までの距離を a 、結晶中心でのビーム径を ω_0 とすれば、P 点でのビーム径 ω_1 は、

$$\omega_1 = \omega_0 (b+100) / a$$

と表せる。

a と b の実測値はそれぞれ 25mm、130.9mm、結晶中心での必要なビーム径が $22 \mu\text{m}$ であるので、上式より P 点でのビーム径は $203 \mu\text{m}$ に調整する必要があることがわかった。実際には、レーザー光が共振器内へ入射する直前でレンズを置き、その位置を調整することで必要なビーム径に絞った。

^{*} レイリー長とは、ビームがガウシアンビームのように広がりをもって進行するとき、ビーム径が最小のときの $\sqrt{2}$ 倍になるまでに進行した距離である。

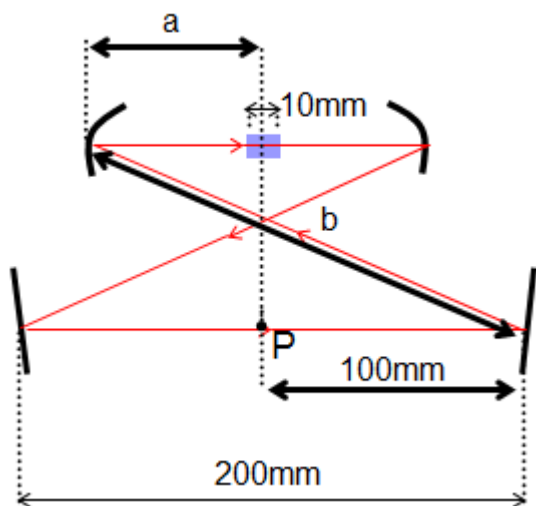


図 3. ボウタイ型共振器

以下、図 4 では P 点でのビーム径の実測値である。ビーム径は約 200 μm に調整した。

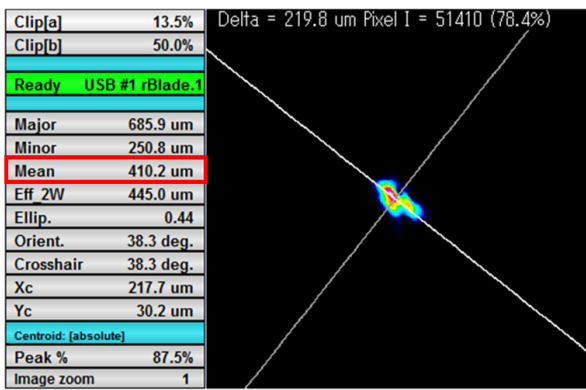


図 4. 図 3 の P 点におけるビームの様子

共振器内に入射したビーム形状は、図 4 で見られるようにシングルモードではないと推測され、結晶での SHG の変換効率を低下させる要因となっていると考えられる。Slave LD のコリメーションレンズの調整をより高い精度で行う必要があると考えられる。

3-3 FM サイドバンドロック

ボウタイ共振器内での共振状態を一定に保つように、FM 変調による feedback 回路を用いた。まず、master LD に予め 15MHz

の変調成分を載せ、共振器からの反射光信号を読み取る。この信号と 15MHz のみの信号を復調する。このとき、共振時の波形は図 5 のように微分信号(error signal)として観測することができる。

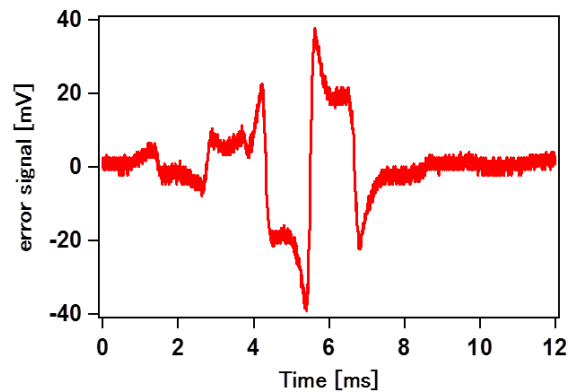


図 5. 微分信号(error signal)

微分信号の観測時には scan 用に 7Hz の三角波をかけておく。lock をかけるときには、三角波の掃引を停止し、feed back に用いる PZT 用 driver を調節して微分信号が見られた瞬間に積分回路のスイッチを導通することで共振状態を保つ。以下に概要を示した。

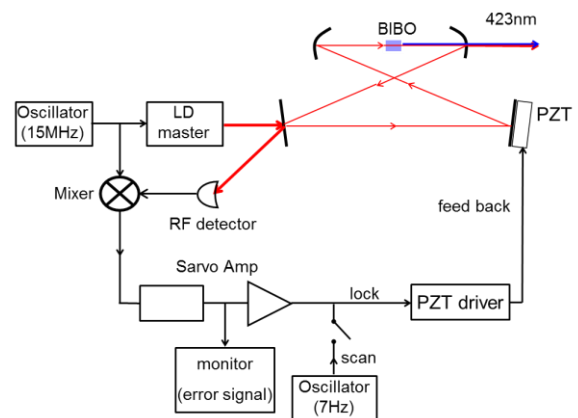


図 6. FM サイドバンドロック概要

lock をかける前後での、SHG 光信号はそれぞれ図 7、図 8 で示した。

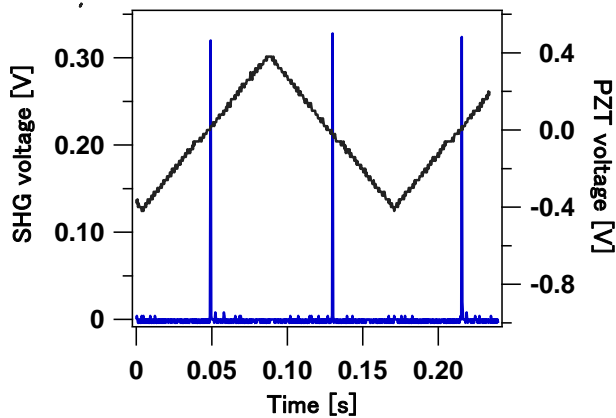


図 7. SHG 光信号と三角波(lock 前)

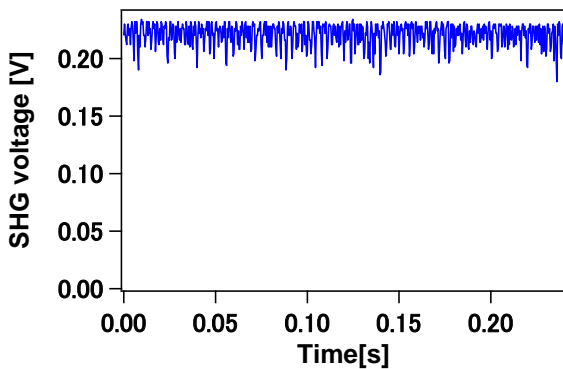


図 8. SHG 光信号(lock 後)

lock 前では PZT に三角波をかけることで、共振時のみ SHG 信号が得られていることが分かる。lock 後では共振器長が共振時の長さで保たれることにより、SHG 光信号が持続して観測される様子が分かる。また、ノイズが見られる原因は二つ考えられ、一つは 100Hz 周期の AC ノイズであり実験装置周辺のグラウンド接続に依存している。使用したデジタルオシロスコープの電源接続を外すことでノイズが除去できることが分かっている。もう一つは、PZT を取り付けた平面ミラーが、PZT の伸縮による振動に対して微小ながらも振動することが挙げられる。ミラーと PZT との接着を見直すことで更なる安定化が図れると考えられる。また周囲の音にも大きく影響を受けるため、外部共振器を箱に格納して騒音対策を行った。

現状での光強度は図 8 より、低下する平均的な度合いから見積もったところ 10% の揺らぎをもつことがわかった。

4. 結果

846nm 光強度 40mW に対して、423nm(SHG)光強度は 300 μ W 得ることができた。入出力特性を図 9 に示した。

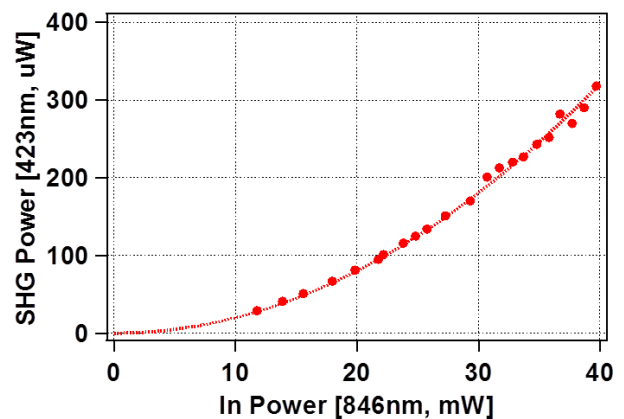


図 9. SHG の入出力特性

プロット点を実測値、点線が二次の fitting である。出力光強度が入力光強度の二乗に比例していることがわかった。SHG 光強度のビーム強度密度 I を計算すると、ビーム強度を P 、ビーム径を ω とすれば、
$$I = P / (\pi/2) \omega^2$$

と表され、ビーム径を 100 μ m とした場合、ビーム強度密度は 2000 mW/cm² となり、飽和強度の 30 倍以上の光強度が得られることになる。今後の展開は、得られた 423nm 光を必要に応じてレンズで絞り、真空容器内の Ca 原子に照射して、イオンの生成過程に移行する予定である。

5. 参考

- [1] S.Gulde et al., Appl. Phys. B, **73**, 861 (2001).
- [2] G. D. Boyd·D. A. Kleinman· J. Appl. Phys. 39, 3597 (1968)