

Be⁺イオンのレーザー分光のための LDを使った313nm光源の製作 大谷研究室 飯田竜一

1：研究目的

研究目的はBe⁺イオンの超微細構造分光のための光源の開発である。その光源は313nmの単一周波数発振で連続波のレーザーが要求される。

我々のグループではBe⁺イオンの超微細構造異常の測定により、Be原子核内の価中性子の分布の研究を行っている。このは同位体間でその値が異なるため、超微細構造定数Aと核磁気モーメントμ_lを10⁻⁶の精度で測定し、

$$\frac{A^{(a)}}{A^{(b)}} = \frac{\mu_l^{(a)}/I^{(a)}}{\mu_l^{(b)}/I^{(b)}} = \frac{I^{(b)}}{I^{(a)}} \quad I: \text{核スピンの角運動量} \quad (1-1)$$

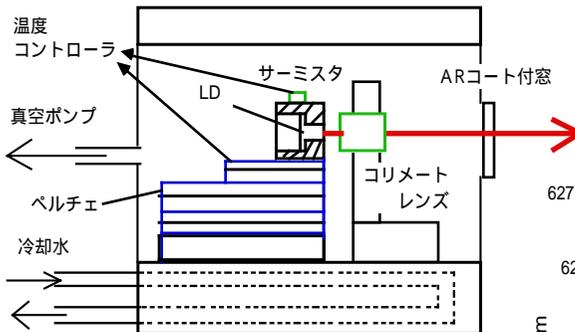
この(1-1)式のような同位体間の比をとることにより、議論する。

我々はそのBe同位体(共鳴線: 2s²S_{1/2} - 2p²P_{3/2}: 313nm)として、⁹Beの測定を終え、現在⁷Be(T_{1/2}=53d)の測定を進め、今年末には¹¹Be(T_{1/2}=13.8s)の測定を予定している。この¹¹Beを測定するためには、加速器で¹¹Beを生成し、オンラインでつながれたイオントラップでそのイオンをトラップし、即分光を行うという装置が必要となる。このような加速器実験ではコンパクトで機動性が高く、かつ高安定な光源が要求される。その光源としてLD(半導体レーザー)に着目し、実験に必要な313nmを直接発振するLDは無いので、分光用光源としてLDを使った第二高調波発生(SHG)システムを製作することにした。

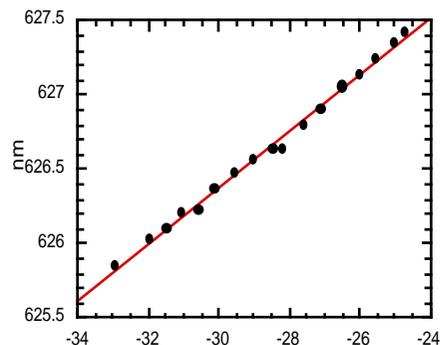
2：LD

SHGによる313nmの発振には626nmを発振するLDが必要である。しかし626nmを中心波長に持つLDは無いため、現在もっとも短波長である中心波長635nmのLDを使い、そのLDを約-30℃に冷却することにより626nmの波長を得ることを考えた。そのためのLDを収める真空チャンバーを設計・製作した<図2-1>。

LDはアルミのブロックに熱的に接触するように差し込まれており、3段に積まれたペルチェによって段階的に冷却される。一番上のペルチェはアルミブロックに付けられたサーミスタとともに温度コントローラにつながれ温度の制御を行っている。これらにより約-30℃で626nmの波長を得た<図2-2>。



<図2-1>
: LDマウント



<図2-2>
: LDの温度-波長特性

3 : SHGシステム

SHGとは例えば本研究では、基本波として626nmの光を非線形結晶に入射するとその光の一部が半分の波長313nmの光に変換され、直接レーザー発振できないような短波長の光が得られるという現象である。これ以降、結晶に入射する光を基本波、その結果得られる光を第二高調波と呼ぶ。本研究で使う結晶は626nm付近でもっとも変換効率の高いLiIO₃であり、角度による位相整合を行っている。

基本波のパワーと得られる第二高調波のパワーの関係は

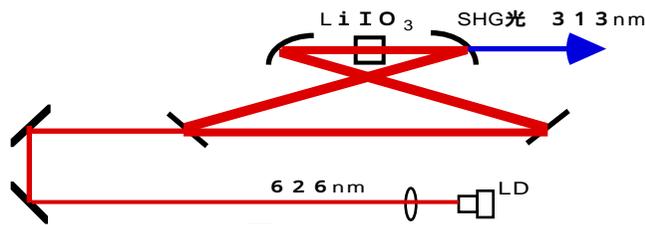
$$P_{SHG} = \eta_{SHG} P_i^2 \quad (3-1)$$

P_{SHG} : 第二高調波パワー

η_{SHG} : 変換効率

P_i : 基本波パワー

と表わされる。本研究でのLiIO₃による626nmから313nmへの変換効率の値は $3.4 \times 10^{-4} W^{-1}$ であり、結晶への直接入射によるSHGを考えると本研究で使うLDのパワー15mWに対して得られる第二高調波のパワーは(3-1)式より77nWと非常に小さい。そこでSHGシステムとして外部リング共振器を使ったSHGシステムを採用した。これはLDビームを外部リング共振器に導き、共振器中に設置された結晶に共振効果によって増強されたLDビームパワーが入射することにより、より強いパワーの第二高調波のパワーが得られる、つまり高効率の波長変換が行えるというものである。

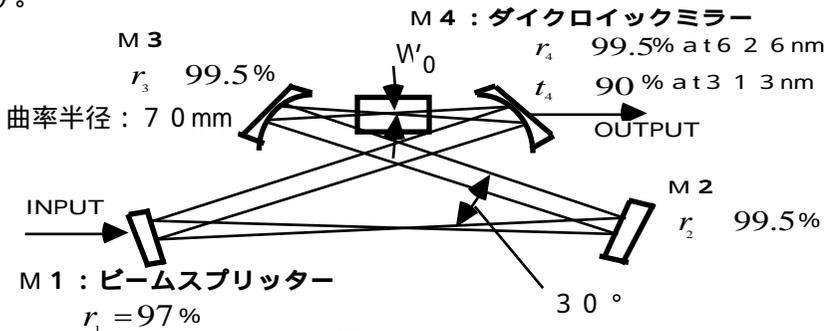


<図 3-1>

: 外部リング共振器を使ったSHGシステム

4 : 外部リング共振器の設計

まず、使う結晶長11mmの結晶に626nmの光を入射することに対するその結晶の中心で結ぶ最適なビームウエスト w_0 を決める。共振器長は w_0 を出発した光が共振器を1周し、再び w_0 のウエストを結ぶ様な光線行列による変換を考え、それぞれのミラーへの入射角を15度、二つの凹面ミラーの曲率半径を70mmと設定し、凹面ミラーに斜めに入射することによる収差の補正、結晶を通ることによる光路長の補正を加える。これらにより共振器長は466mmと決定した。ミラーの反射率 r 、透過率 t は結晶への入射パワーを最大、つまり最大の共振効果が得られるように決定した(インピーダンスマッチング)。



<図 4-1>

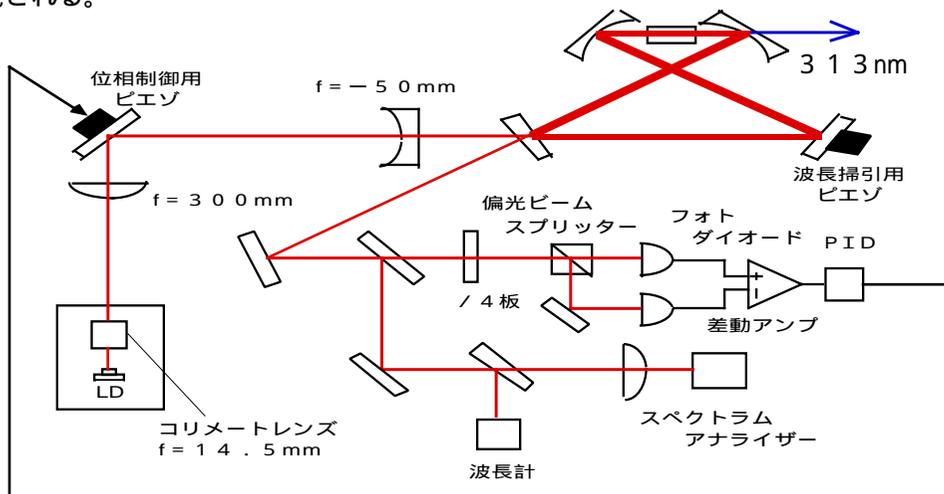
: 外部リング共振器

設計上では、15mWの基本波の共振器への入力に対して33倍の増倍が得られ、83μWの第二高調波のパワーが得られる($t_4 = 100\%$ の時)と期待できる。

5：システムの配置

LDと共振器を組み合わせたシステムの配置を示す<図5-1>。

高い共振効果を得るため、LDビームを共振器にマッチングさせるモードマッチングはコリメートレンズと2枚のレンズでLDビームを整形して共振器に入射することにより達成される。



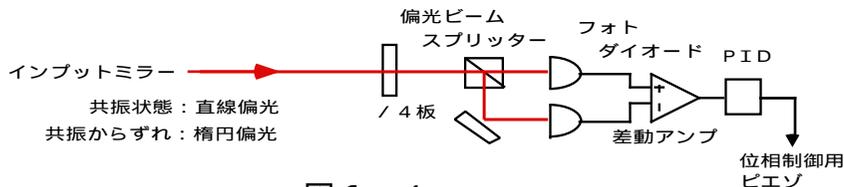
<図5-1>
：システムの配置

6：共振状態の安定化（周波数の安定化）

共振器にただビームを入射しただけではその共振状態は安定せず、得られる第二高調波の周波数やパワーも安定しない。よってその安定化を行う必要がある。

リング共振器中には結晶の散乱や反射によって逆回りに回って共振するモードが発生する。安定化はこのモードの光がインプットミラーから漏れる漏れ光を光フィードバックに使うことにより、共振器の共振周波数にLDの発振周波数を同調させることにより行う。これは例えば回折格子を使った安定化の方法等と比べ、パワーのロスを極力抑え、システムのコンパクトさを失わない方法である。

逆回りのモードの漏れ光は微弱な光であるため、光フィードバックを安定に行うためには、共振器への入射光と光フィードバックの戻り光の位相を調整する必要がある。その位相制御は、LDと共振器間の光路長をピエゾにマウントしたミラー（<図5-1>）により変化させることにより行う。その位相制御のための誤差信号の検出系が<図6-1>の1/4板、偏光ビームスプリッター、フォトダイオード、差動アンプからなるものである（偏光法）。



<図6-1>
：偏光法による誤差信号の検出系

これは、インプットミラーからの反射光が共振器が共振状態のとき直線偏光、共振からずれると楕円偏光になる現象を利用し、入射光と戻り光の位相のずれを縦、横の偏光の強度の差として出力するものである。この差の信号から例えば、ロックインアンプを使った変調法による微分信号に比べ、共振から大きく外れても対応できるような分散曲線が得られる[1]。

7：波長掃引

波長掃引は安定化の方法を利用し、共振器のミラーの一つをピエゾにマウントする（＜図5-1＞）ことにより共振器長を変化させ、その共振周波数の変化にLDの発振周波数を同調させることにより行う。

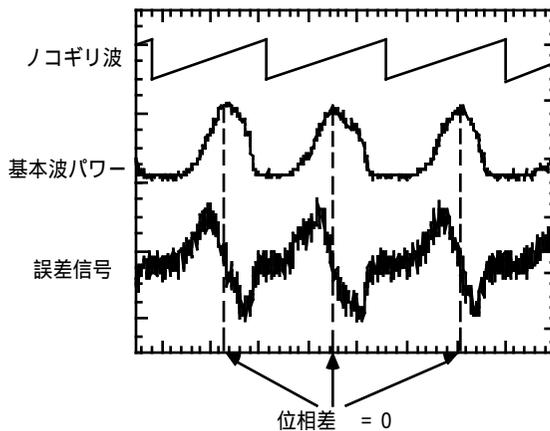
8：システムについてのデータ

（1）安定化

まず、共振状態の安定化のための誤差信号を観測した＜図8-1＞。

中段は位相制御用のミラーのピエゾにノコギリ波電圧をかけ、LDから共振器間の光路長を変化させた時の共振状態の変化を共振器からの基本波の漏れ光のパワーで観測したものである。LDから共振器間の光路長が最適になったところ、つまり共振器への入射光と共振器からの戻り光の位相がそろったところで共振が最大になる周期的な変化をしている。

下段はその周期的な共振状態の変化に対する誤差信号である。共振状態が最大になるところでその値が0になっていることがわかる。この誤差信号をPID制御し、位相制御用のミラーのピエゾにフィードバックすることにより、共振状態が最大になる場所を保つように安定化される。



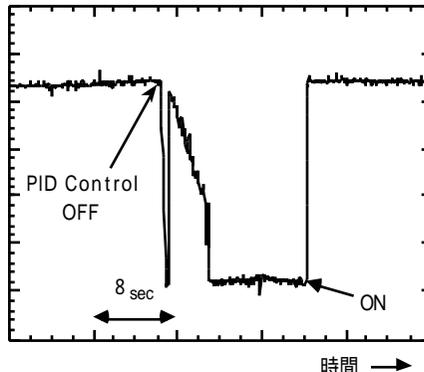
＜図8-1＞
：周期的な共振状態の変化
に対する誤差信号

（2）安定化の様子

＜図8-1＞の誤差信号をLDと共振器間の位相制御用のミラーのピエゾにPID制御しフィードバックすることにより、共振状態のロックを行った。アウトプットからの基本波の漏れ光をパワーメーターで観測したものが＜図8-2＞である。

PIDをOFFにするとロックが外れ、再びONにすると安定する様子が観測でき、共振状態のロックが達成されていることが確認できた。

アウトプットミラーからの
基本波のパワー

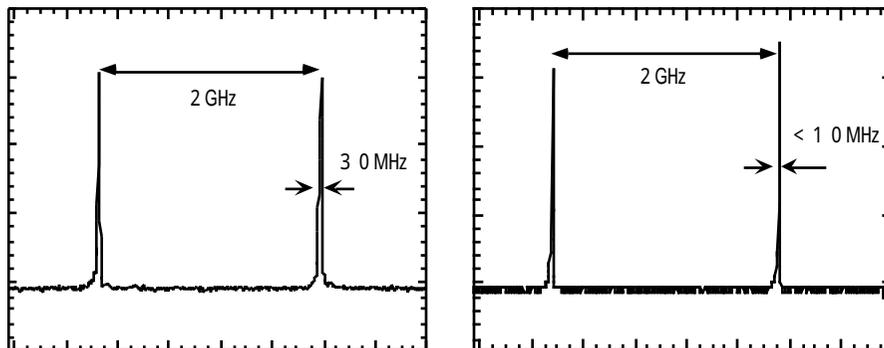


＜図8-2＞
：安定化の様子

(3) LDビームの線幅

スペクトラムアナライザ（FSR：2 GHz、フィネス：200、バンド幅：10 MHz）を使い、フィードバックをかける前と後の基本波の線幅を観測した。フィードバックをかけると光フィードバックによって、数百MHzのモードのゆらぎが抑えられ、さらに線幅が狭窄化される様子が観測できた。

フィードバック後の線幅はスペクトラムアナライザの装置幅によって決まってしまう、10 MHz以下である。

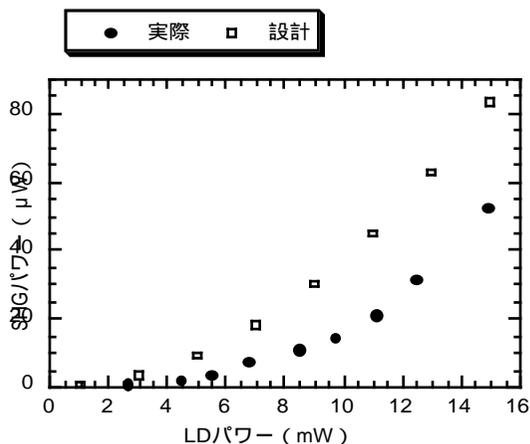


(1) フィードバック前

(2) フィードバック後

< 図 8 - 3 >
: LDビームの線幅

(4) LDのパワー（共振器への入射パワー）に対する第二高調波のパワー
LDのパワーに対して共振器の出力ミラーから取り出された第二高調波のパワーを測定した。設計上期待される値も示す。



< 図 8 - 4 >
: LDのパワーに対する第二高調波のパワー

LDの定格出力である15 mWでは約50 μWのSHGパワーが得られた。しかし、設計上は83 μWの値が期待される。この違いの原因は共振器の増倍係数が小さいかもしくは、結晶の変換効率が悪いことが考えられる。それを確かめるためまず、増倍係数を調べた。

そこで、得られた共振器の増倍係数を共振器のインプットミラーがある（共振している）場合と取り外した時のアウトプットミラーからの基本波の漏れ光を比較すると、約20倍であることがわかった。

この20倍から約50 μ Wの出力は変換効率としてはほぼ計算通りの合理的な値である。よって設計値から多少パワーが下がるのは共振器の増倍が設計通り（設計33倍）得られていないことが大きい。それはモードマッチング、インピーダンスマッチングが完全ではないことが原因として挙げられる。

しかし、約50 μ Wは分光を行うのに十分なパワーである。

9：まとめ

Be⁺イオン、特に¹¹Beのレーザー分光のための313nm光源の製作をLDを使った第二高調波発生システムにより行った。

1. SHGによって313nmの発振を得るには基本波として626nmの波長が必要である。それを、LDを収める真空チャンバーを設計・製作し、現在手に入るもっとも短波長の中心波長635nmのLDを約-30℃に冷却することにより626nmの波長を得た。
2. 使えるLDのパワーは15mWと小さいため、外部リング共振器を設計・製作することにより高効率な波長変換を実現し、約50 μ Wの第二高調波（313nm）のパワーを得た。
3. 光フィードバック、偏光法による誤差信号の検出系により、30分程度（良好な状態のとき）の共振状態の安定化が実現した。
4. 共振器のピエゾによって共振器長の変化させることにより約400MHzの波長掃引ができた。

< 今後の課題 >

本研究は色素レーザーに匹敵する性能を持ち、かつコンパクトな光源を製作することが目標である。しかし今のところ数時間などの長期の安定性やSHGパワー、安定時間、掃引幅の再現性が乏しく色素レーザーに匹敵する性能を持つには至っていない。これは共振器の機械的振動や熱変動による影響が無視できないためだと考えられる。対策として、ミラマウントの固定の方法を変える、ミラマウント自体をもっと強固なものへ変えるなどの共振器の剛性の強化、フィードバックの最適化（PIDパラメータや結晶の動径方向、縦方向の傾きなどのアライメント）により長期の安定化や良い再現性が得られ、加速器実験におけるレーザー光源として機能できると考えられる。

第二高調波のパワーはモードマッチング、インピーダンスマッチングのさらに厳密な最適化を行うことにより共振器の増倍を改善し、上げることができると考えられる。しかし今のところ、設計上に近いパワーが得られているのでさらにパワーを上げるには、本研究に必要な波長のあたりを中心波長にもつLDの高出力化が進んでくれば、飛躍的なパワーの向上が期待できる。例えば、今の2倍の30mWの出力のLDを使えば4倍の出力向上が期待でき、0.2mW近くの第二高調波の発生が可能である。

(Reference)

- [1] : T.W.Hansch, B.Couillaud Opt.comm. 35 (1980) 441