Ybビームコリメート光源安定化用共振器の開発

傳田 晟矢, 藤原 昇平, 畑中 昌平, 大向 隆三

埼玉大学 教育学部(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

Development of Stable Optical Cavity for Controlling the Light Source to Collimate Yb Beam

Seiya DENDA, Syohei FUJIWARA, Syohei HATANAKA and Ryuzo OHMUKAI

Department of Physics, Faculty of Education, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama City, Saitama 338-8570

(Received July 24, 2015)

Stabilizing the resonance frequency of an optical cavity was achieved to obtain a reference signal for the 399-nm light source used for collimating a Yb atomic beam. We attempted cavity control to compensate for laser power by dividing the transmitted light intensity of the cavity by the monitor signal intensity of an incident optical power. As a result, the stability of the resonance frequency for 780-nm light was almost 0.5 MHz, which continued for more than 2 hours. This stabilization was maintained until the incident optical power was decreased to 10% of the initial power. With our technique, highly stable 399-nm light is expected to be generated which enables us to achieve high-performance atomic nanofabrication using Yb atoms.

Key Words: Fabry-Perot cavity, Atom lithography, Ytterbium, Collimation, Optical molasses

1. はじめに

狭帯域で周波数可変のコヒーレント光を発生させる技術の進歩により, レーザー光を利用して原子の運動を制御する研究が大きく進展した¹⁾. 我々はこの技術を用いて基板上に微細な周期構造物を作製する原子リソグラフィ²⁾の研究に取り組んできた. その結果, オープン温度1000 Kで発生させたイッテルビウム(Yb)の熱原子ビームを原子ソースとして双極子力で原子をチャンネルリングし, 約30分をかけてシリコン基板上へYb原子を堆積させ, 周期200 nmの平行な線状パターンを作製することに成功した³⁾. Yb原子は運動制御に必要な399 nm光を市販のレーザーを駆使して得られることに加え, Ybビームのモノパロシティ化・同位体選別⁴⁻⁶⁾や量子縮退状態の達成⁷⁾などレーザー光による様々なハンドリング技術が確立されている. また, 真空槽からYbの微細構造物を空気中に出しても原子間力顕微鏡でそれを観察できる. Ybは電気伝導度を持つので微細回路の配線ワイヤーにも使える. このようにYbはこの種の実験において有望な材料物質である. 当該技術の実用化に向けて, 今までよりも高い分解能での細線描画や細線間隔のチューナブル化⁸⁾などが当面の課題となるが, それには原子ソースとなる熱原子ビームの横広がりを可能な限り抑制することが必須である⁹⁾. 熱原子ビームのコリメーションは1次元光モラセスに通して横方向に冷却することで行うので, この1次元光モラセスで用いるコヒーレント光の周波数を原子堆積時間中一定に保つための工夫

が必要である.

そこで我々はこのコリメーションに使う399 nm光を発生させるレーザー光源において, その発振周波数を安定化するための基準となる参照信号を高安定に供給する共振器の開発を行った. 具体的には, 399 nmと780 nmの2波長で高いフィネスを持つ共振器を用意し, そこへ周波数の安定した780 nm光を入射し, 共振器内で780 nm光が共鳴状態を保つように共振器長を制御することによってその共振器の共鳴周波数を安定化した. そこから安定な399 nm光用参照信号を得る. 一般にレーザーの発振周波数を外部に設けた共振器を利用して安定化する方法は, 共振器で使用するミラーの反射率を様々な波長に対して指定できるので汎用性が高い¹⁰⁾. また, 原子の遷移周波数にロックしたレーザー光源で共振器の共鳴周波数を安定化する方法と組み合わせ, いわゆるトランスファ共振器を作れば, そこから得られる参照信号の安定度を非常に高くできる¹¹⁾. 本研究では780 nmレーザー光源の発振周波数を原子の吸収信号を使って安定化することはしなかったが, この波長域に吸収を持つルビジウム(Rb)の飽和吸収スペクトルから半導体レーザーの発振周波数を安定化する技術は多くの実施例がある¹²⁾ので, そのように改良することは特に支障なく実現できると考えられる. Ybビームのコリメーションに向けて, ここで達成すべき共振器の安定化性能を次の通りとした. まず, 現在のところ原子の堆積に30分を要していること, 原子オープン温度をもう少し下げて真空装置への負担を今よりも軽減した条件で原子堆積に臨みたいこ

となどから、2時間以上はこの共振器の共鳴周波数が安定化され続けていなければならない。ただし、コリメーションで利用するYbの遷移($S_0 - ^1P_1$)の自然幅は28 MHzと比較的広いので、この共振器の安定度は入射780 nm光に対して1.0 MHzを目標とした。これは単純に波長の比だけから399 nm光の参照信号安定度として換算すると2.0 MHzになる。共振器長制御のためのロッキングポイントは、共振器の780 nm透過光強度を反映した信号電圧から一定の直流電圧を差し引いて発生させた。この方法では差し引く電圧値を変えてロッキングポイントを調節できるほか、共振器長や入射光の周波数を変調する必要がなくなり比較的簡単な電子回路構成や光学配置でロッキングポイントを設定できる。ただし、共振器への入射光パワーが変動した時にロッキングポイントがシフトするという欠点があるので、本研究ではこれを解消する工夫を加えた。これは、直接的には共振器へ入射する780 nm光のパワー変動が安定化制御時における共振器の共鳴周波数へ及ぼす影響を補償する試みであるが、将来的にこの共振器で制御対象とする399 nm光の周波数安定化の段階で効果的である。実際、399 nm光は単一周波数で発振するチタンサファイアレーザー光のSHGから得られる³⁾が、ここではレーザーのリング型共振器や高効率なSHG発生のための外部共振器などを使用しているため、実験中に399 nm光パワーの低下が見られた。上記の機能を付与できれば、このような変化が原子堆積中に生じてYbビームの最適なコリメーション条件を維持し続けられるので、所望の原子パターン描画の実現に貢献できる。

2. 実験装置及び配置

今回製作する399 nm光源安定化用共振器として次の通り設計し組み立てた。構造は共焦点型ファブリー・ペロー共振器とし、共振器に用いる2枚のミラーを波長399 nmと780 nmの両方で反射率97%、凹面の曲率半径は300 mm、ミラー間距離も300 mmにした。胴体部はスーパーインバー製の中空円筒(外径15 mm、内径9 mm、長さ283 mm)と、同じく中空円筒の形をしたピエゾ素子(Piezomechanik製 HPS1 150/14 - 10/12)からなる。このピエゾ素子に適切な電圧を印加して共振器長を制御し、共振器の共鳴周波数を安定化させる。この共振器の設計上のFree Spectral Rangeは250 MHz、フィネスは51.6、フリンジピークの半値全幅は4.8 MHzである。

全体の実験配置をFig. 1に示す。光源には発振波長が780 nmの外部共振器型半導体レーザー(ECLD: NewFocus Model 6013)を用いた。この光源は発振周波数を安定化するためにLDへの注入電流やLDを含めた共振器全体の温度の安定化、装置全体のハウジングなどの工夫がなされており、ここからパワーが9 mW、スペクトル線幅300 kHz以下のシングルモード光が出力される。この出力を光アイソレーターとNDフィルタ1(NDF1)に通したあとハーフミラーで2つに分け、一方はNDフィルタ2(NDF2)を通してフォトダイオード1(PD1)で受けて共振

Fig. 1 Experimental setup. (ECLD: External cavity laser diode, PD: Photodiode)

器への入射光パワーのモニタ信号電圧として、他方は共振器へ通してからフォトダイオード2(PD2)で受けて透過光信号電圧として検出した。NDF2の透過率はPD1から得られるパワーモニタ信号電圧が飽和しないよう適切に調節した。そのあと、共振器の透過光信号電圧をモニタ信号電圧で除算した。除算出力信号電圧から一定の電圧(共振器のフリンジピークの半分の電圧)を減算し、共振器内で780 nm光の共鳴を維持できるように共振器長を制御するためのロッキングポイントを設定した。透過光信号は共振器への入射光パワーに応じて変化するが、除算出力信号ならばこの影響を受けないので、これを用いてロッキングポイントを設定すれば入射光パワーが変化しても最初に設定したロッキングポイントを変わずに保つことができる。何らかの理由で制御途中に入射光パワー変動が発生しても安定して399 nm光用の参照信号を供給できると期待される。除算器の回路の概略をFig. 2に示す¹³⁾。この除算出力信号から誤算信号を得て、これを制御回路に入力した。ここでピエゾ素子に印加すべきフィードバック信号電圧を発生させる。本実験で使用したピエゾ素子のストロークは印加電圧範囲0~150 Vで12 μm なので、安定化制御時にこのストローク長を最大限活用できるように、制御回路の出力電圧もこの範囲と同じに設計した。

3. 実験結果と考察

最初に、組み立てた共振器の性能確認のため、ECLDから得られる波長780 nmの単一周波数光を共振器へ入射し、共振器長を掃引してその透過スペクトルを測定した。Fig. 3にその結果を示す。2つのフリンジピークの間隔を250 MHzとしてピークの半値全幅を見積もったとこ

Fig. 2 Block diagram of a divider.

Fig. 3 Transmission spectrum of a cavity.

ろ10.5 MHzであった。設計上の値よりも6 MHz大きな値となった。共振器のミラー、胴体、ピエゾ素子は接着剤で固定したので、実際のミラー間距離とミラーの曲率半径との間に生じた差が、組み立てた共振器のフィネスを設計値よりも低下させた要因と考えられる。しかし、当初目標とした安定度を実現するには影響ないと判断して、このまま実験を行った。

次に、除算出力のスペクトルが入射光パワーを減少させても変化しないかを確認した。Fig. 1の実験配置でNDF1の透過率を2~100%の範囲で変え、共振器長を掃引したときに観測される干渉フリンジを透過出力信号と除算出力信号の両方で測定した。この結果をFig. 4に示す。横軸はNDF1の透過率、縦軸は透過率100%を基準としたフリンジピーク電圧の相対値である。透過光信号から得たフリンジピーク電圧は入射光パワーに比例して小さくなったが、除算出力信号は入射光パワーが当初の20%になるまではほぼ一定に保たれた。しかし、10%未満になると除算出力のピーク電圧は回復しなくなった。Table. 1はNDF1の各透過率で除算出力のフリンジピーク電圧をまとめた結果であるが、これを見ると入射光パワーが当初の20%に減少するまではピーク電圧は誤差の範囲内で一致している。10%よりも低くなるとピーク電圧は100%のそれと比べてわずかに差が生じて小さな値になり始め、2%では100%のピーク電圧の7割以下しか得られなかった。これは、入射光パワーが当初の10%以下まで減るとモニタ信号と透過光信号のS/Nが両方とも悪化していくこと、共振器の透過光信号におけるフリンジピーク電圧がバックグラウンド電圧と同程度になる

Fig. 4 Fringe peak voltage with and without a divider.

Transmittance (%)	Peak voltage of the devided signal (V)
100	1.190 ± 0.002
90	1.191 ± 0.003
80	1.190 ± 0.002
70	1.188 ± 0.002
60	1.189 ± 0.002
50	1.190 ± 0.002
40	1.190 ± 0.002
30	1.192 ± 0.002
20	1.192 ± 0.002
10	1.185 ± 0.002
5	1.157 ± 0.003
2	0.810 ± 0.002

ことなどが原因である。Fig. 5は実際に測定された共振器の透過光スペクトルと除算出力スペクトルの一例である。ここでは比較しやすくするために透過光信号と除算出力信号のフリンジピーク電圧がほぼ同じになるようにNDF2の透過率を設定した。NDF1の透過率が100%と20%における結果を示す。透過スペクトルは入射光パワーが20%に減少すると100%のときと比べてその強度が大幅に低下しているが、除算出力のスペクトルではスペクトルの形状やピークの電圧値が変わっていない。共振器の透過光スペクトルが半値全幅10.5 MHzのローレンツ曲線を描くこと、実際の実験条件に即してNDF1の透過率100%のときのフリンジピークの半分の電圧を減算してロッキングポイントを設定することなどを仮定して、透過光信号だけを用いて安定化制御を行うときのロッキングポイントのシフト量を見積もった。その結果、入射光パワー減少に伴い徐々にロッキングポイントがシフトし、入射光パワーが当初の60%まで減少すると

Fig. 5 Transmission spectra and divided spectra when transmittance of ND filter is 100 % and 10 %.

3 MHzもシフトすると見積もられた。当然ながら、当初の50%以下まで減少するとロッキングポイントは消失し、そもそも安定化制御を行うことができなくなる。これに対し、除算出力信号を使ってロッキングポイントを設定する方法では、入射光パワーが当初の20%に減少するまでロッキングポイントは変動しないと考えてよい。入射光パワーが当初の5%まで低下して除算によりフリンジピーク電圧を回復できなくなる場合でも、上記と同様に見積もったロッキングポイントのシフト量は0.13 MHzであった。これらの結果から、除算出力信号を使うことにより幅広い入射光パワー変動に対して安定したロッキングポイントを設定できることがわかった。

続いて、上記の除算出力信号を使って共振器の共鳴周波数を安定化し、その性能を評価した。最初はFig. 1の実験配置でNDF1の透過率を100%にし、ピエゾ素子へ適切な直流電圧を印加して780 nm光が共振器で共鳴する状態へ近づけたあと、制御回路を動作させて共鳴周波数の安定化を開始した。ロッキングポイントは共振器のフリンジピークの半分の電圧値に設定した。PD1で測定されるパワーモニタ信号、PD2で測定される透過光信号、除算出力信号、ピエゾ素子に印加される信号(フィードバック信号)を測定・記録した。制御開始直後から400秒間における上記の信号をFig. 6に、それから2時間後

Fig. 6 Experimental results after the start of control. (a) Power monitor signal, (b) Divided signal and transmitted signal, and (c) Feedback signal.

に測定した除算出力信号と透過光信号をFig. 7に示す。Fig. 6(b)と(c), Fig. 7を見ると、除算出力信号が一定の電圧に保たれていることがわかり、この電圧はフリンジピークの半分の電圧に相当することも確認した。フィードバック信号電圧も室温などの周囲の環境変化などに伴って0~150 Vの範囲内で連続的に変化する信号になっていた。これらのことから所望の安定化制御が行われていることがわかった。また、制御を開始してから2時間の途中における除算出力信号はFig. 6(b)と同様であったので、少なくとも2時間以上にわたり我々の実験室環境下で共振器の共鳴周波数を安定化したことを確認した。この制御中における共振器の共鳴周波数の安定度については、Fig. 3で示した透過光スペクトルをパワーモニタ信号で除算出力したスペクトルを用い、Fig. 6(b)やFig. 7で示した除算出力信号電圧の最小値と最大値から周波数の変動幅を求めた。その結果、制御開始直後400秒間における共振器の共鳴周波数の変動幅は780 nm光に対して0.45 MHzとなった。また、制御開始から2時間経過した後でもこの値は0.48 MHzとなり、開始直後とほぼ同じく0.5 MHz以下の安定度を維持できていた。2時間経過する途中の除算信号電圧の変動幅もこれらと比べて変わらなかったため、2時間にわたり0.5 MHz以下の安定度を保つことができた。制御の継続時間、安定度とも最初に目標とした性能を達成することができた。この0.45 MHzという安定度を399 nm光用の参照信号の安定度に単純な波長の比だけで換算すると0.88 MHzになる。

最後に、Fig. 1のNDF1により意図的に共振器への入射光パワーを減少させ、それにより共鳴周波数の安定化制御性能がどのような影響を受けるかについて調べた。まず、NDF1の透過率を100%にして上記と同じ方法で共振器の共鳴周波数を安定化したあと、NDF1の透過率を連続的に減少させた。入射光パワー変動の補償をしないとき(共振器の透過光強度信号からロッキングポイントを設定したとき)の透過光信号電圧、除算出力信号電圧、パワーモニタ信号電圧の測定結果をFig. 8(a)に、入射光パワー変動補償をしたとき(除算出力信号からロッキングポイントを設定したとき)のそれらの結果をFig. 8(b)に示す。入射光パワー変動を補償しない場合は、入射光パワーをFig. 8(a)①のように減少させたとき安定化制御中の透過光信号電圧はFig. 8(a)②で示したように一定に保たれていたが、Fig. 8(a)③の除算出力信号電圧は徐々に増加した。つまり、入射光パワー減少に伴いロッキン

Fig. 7 Experimental results in 2 hours after the start of control.

Fig. 8 Experimental results when incident optical power was decreased.

グポイントがフリンジのピークの方へシフトし、そのシフトに追従しながら共振器の共鳴周波数が制御されている。そしてさらに入射光パワーが減少するとついにロックポイントが消失してロックが外れ、その瞬間に透過光信号電圧と除算出力信号電圧が0 Vになった。これに対して入射光パワー変動を補償した場合は、入射光パワーをFig. 8(b)①のように減少させても、Fig. 8(b)③で示した除算出力信号電圧が一定に保たれたままであった。逆にFig. 8(b)②で示した透過光信号のほうが増減した。これらのことから、この制御では入射光パワーの減少の影響を受けず、ロックポイントが一定のまま共振器の共鳴周波数が安定化されていることがわかった。また、共振器の安定化制御時における除算出力信号電圧の変動幅は、入射光パワーを当初の10%まで減少させるまでの間変化しておらず、780 nm光に対する共振器の共鳴周波数の安定度はこの間ずっと上述の安定度(0.5 MHz以下)を維持できていると考えられる。

4. まとめ

共焦点型ファブリー・ペロー共振器を利用して、399 nm光の周波数を安定化させるための高安定な参照信号を発生させる共振器を開発した。399 nmと780 nmの2波長で高い反射率を持つミラーを使い、共振器長をピエゾ素子

への電圧印加により制御し、入射780 nmレーザー光が共振器内で共鳴を保つような制御を施した。同時に、入射光パワーの変動に対して共振器の共鳴周波数がシフトしない工夫として、共振器の透過光信号を共振器への入射光パワーモニタ信号で除算し、その信号から共振器長制御のロッキングポイントを発生させた。実験の結果、共振器内で780 nm光の共鳴状態を2時間以上にわたり維持させることができた。また、共振器の共鳴周波数を入射780 nm光に対して0.5 MHz以下の安定度で制御できた。さらに、入射780 nm光のパワー変動に対しては、当初の10%に減少するまでの間ロッキングポイントのシフトを0.13 MHz以下に抑制することができ、かつ、その間共振器の共鳴周波数の安定度は変わらずに維持できた。これらを単純に足し合わせても、共振器の共鳴周波数の安定度は入射780 nm光に対して0.63 MHzとなり、当初の目標を達成できた。この値を単純に波長の比だけから399 nm光用参照信号の安定度として換算すると1.23 MHzになる。今後はRbの飽和分光を用いた780 nmレーザー光源の発振周波数安定化、399 nm光源に対するこの共振器を使った周波数安定化の試み、Ybビームのコリメーション性能の評価へと進めていく予定であるが、実際には空気屈折率が波長により異なり、さらに各波長の屈折率が温度や気圧の変化の影響を受ける^{11,14)}。この共振器で安定化した場合の399 nm光の絶対周波数のずれは温度変化の割合が20 MHz/°C、気圧の変化に対しては-5 MHz/hPaとなる。コリメーション性能を最大限に発揮するにはこれらの変化を可能な限り抑制する工夫(真空槽内あるいはシールした容器内への共振器の配置など)も将来的に必要なになる。

参考文献

- 1) 例えば、嶺重 慎、高橋 義朗、田中 耕一郎：光と物理学(京都大学学術出版会、2007)p.27.
- 2) G. Timp, R. E. Behringer, D. M. Tennant, and J. E. Cunningham: Phys. Rev. Lett. **69**(1992)1636.
- 3) R. Ohmukai, S. Urabe, and M. Watanabe: Appl. Phys. B **77**(2003)415.
- 4) M. Watanabe, R. Ohmukai, U. Tanaka, K. Hayasaka, H. Imajo, and S. Urabe: J. Opt. Soc. Am. B **13**(1996)2377.
- 5) R. Ohmukai, H. Imajo, K. Hayasaka, U. Tanaka, M. Watanabe, and S. Urabe: Appl. Phys. B **64**(1997)547.
- 6) M. Watanabe, R. Ohmukai, H. Imajo, K. Hayasaka, and S. Urabe: Jpn. J. Appl. Phys. **36**(1997)7189.
- 7) Y. Takasu, K. Maki, K. Komori, T. Takano, K. Honda, M. Kumakura, T. Yabuzaki, and Y. Takahashi: Phys. Rev. Lett. **91**(2003)040404.
- 8) R. Ohmukai, S. Urabe, and M. Watanabe: Sci. Tech. Adv. Mat. **5**(2004)585.
- 9) J. J. McClelland: J. Opt. Soc. Am B **12**(1995)1761.
- 10) R.W.P. Drever, J.L. Hall, F.V. Kowalski, J. Hough, G.M. Ford, A.J. Munkey, and H. Ward: Appl. Phys. B **31**(1983)97.
- 11) E. Riedle, S. H. Ashworth, J. T. Farrell, Jr., and D. J. Nesbitt: Rev. Sci. Instrum. **65**(1994)42.
- 12) K. B. MacAdam, A. Steinbach, and C. Wieman: Am. J. Phys. **60**(1992)1098.
- 13) 岡山 努：ダイオード・トランジスタ回路入門(日刊工業新聞社、2005年)p.171.
- 14) S. Uetake, K. Matsubara, H. Ito, K. Hayasaka, M. Hosokawa: Appl. Phys. B **97**(2009)413.