

交差共鳴を用いたレーザーの発振周波数制御

上敷領 静香	蓮田市立黒浜西小学校
大向 隆三	埼玉大学教育学部理科教育講座
兵頭 政春	独立行政法人情報通信研究機構
近藤 一史	埼玉大学教育学部理科教育講座

キーワード: レーザー、飽和分光、交差共鳴、周波数安定化、ルビジウム

1. はじめに

近年、レーザーの狭帯域化及び波長可変化技術の進展と相俟ってレーザー光と原子の相互作用が詳細に研究されるようになり、今や光を用いて原子の内的・外的自由度を操作する技術が実現しつつある。光を用いて非接触かつ非破壊的に原子の量子状態を制御する技術の確立は、原子の高いデコヒーレンス能力を活かして量子情報処理や量子コンピューティングなど次世代の高度情報処理への展開が大いに期待されており、その実現が強く望まれているところである。当該研究を遂行する上では、光と原子の相互作用時間を十分に確保し、再現性のよいデータを得るために、光源となるレーザーの発振周波数を長時間にわたって所望の周波数値に安定して維持させる技術の開発と整備が差し迫った重要な課題となっている。

従来はレーザーの発振周波数を安定化するために原子の共鳴吸収信号を用いる方法が一般的であった。¹⁾ 原子を異なるエネルギー準位間で遷移させるために照射する光の周波数は原子の種類ごとに厳密に決まっており、それを周波数安定化の参照信号として利用する方法である。この方法は、原子の共鳴周波数が外的な環境（温度の変化や機械的な振動）の影響を受けずに一定であるために高い安定度が得られ、レーザー分光実験で観測対象となる原子遷移の共鳴周波数に一致した発振周波数を得られるなどのメリットがある。しかし、共鳴信号の信号強度が弱いために実験機器の配置や電子回路の設計に多大な調整作業を強いられ、安定化したレーザーの発振周波数が原子の共鳴周波数付近だけに限られてチューナビリティが低いなどの改善すべき課題も残されている。そこで我々は、レーザーの発振周波数安定化において、多準位系の原子の吸収スペクトルに観測される交差共鳴信号を参照信号として利用する新しい試みを行った。交差共鳴信号は、ある周波数の光が原子に照射されたときに異なる複数のエネルギー準位への光励起が同時に生じて観測される信号であり、一般に共鳴信号よりも強く観測される。²⁾ そのため、この交差共鳴信号を使えば信号検出や電子回路による演算処理を比較的簡単に行うことができる。検出信号の S/N 比も高いので、結果としてレーザーの発振周波数安定度も向上することが見込まれる。さらに、交差共鳴信号の強度が大きい分、そこから一定の電圧を減算して得られる周波数のロッキング・ポイントも広い範囲で設定できるので、安定化した発振周波数のチューナビリティも今までより格段に広がると期待される。また我々は、原子の光吸収信号と参照共振器を併用した、簡便で汎用性に優れたレーザーの発振周波数制御技術の開発に取り組んでおり、この中で高安定なチューナビリティの高い発振周波数制御が要請されているので、今回の交差共鳴を用いた発振周波数安定化の確立は上記の研究達成に重要であるといえる。

2. 交差共鳴スペクトルの測定

まず、レーザーの発振周波数安定化のための参照信号となる交差共鳴信号を検出する実験を行った。本実験では、光源の発振波長と原子の共鳴波長のマッチングの観点から、観測対象となる原子をルビジウム (Rb)、レーザー光源を波長 780 nm 帯の外部共振器型半導体レーザー (ECLD) とした。Rbはアルカリ金属で飽和蒸気圧が高く (300 K において 1×10^{-6} Torr)、Rb原子を封入したガラスセルに光を通すことにより室温でRb原子の吸収スペクトルを観測できる。また、Rbは古くから分光学研究で測定対象となった原子種であり、今までに蓄積された分光データを活用できる。^{3, 4)} 現在明らかになっているRb原子のエネルギー構造を図1 に示す。Rbには2種類の同位体があり、基底状態が $5S_{1/2}$ 、励起状態が $5P_{3/2}$ という分光学的記号で表される状態となる。核スピンのため、2つの同位体とも基底状態は2つ、励起状態は4つの超微細構造準位に分裂している。本研究では存在比が大きな⁸⁵Rbを使い、 $5S_{1/2}$ ($F = 3$) から $5P_{3/2}$ ($F' = 2, 3, 4$) への3つの準位への遷移 (共鳴波長 780.245 nm) に関する交差共鳴スペクトルを測定した。ECLDはLDチップからの出力光を回折格子で光フィードバックさせた狭帯域・周波数可変のレーザー光源で、小型・低消費電力であることに加え、注入電流で高速の周波数制御が可能であるという特徴を持つ。^{5, 6)}

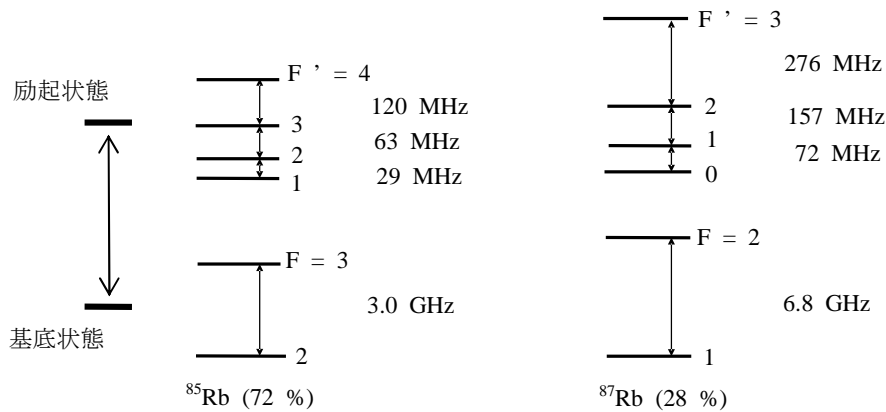


図1 ルビジウム原子のエネルギー構造

交差共鳴信号測定のための実験配置を図2に示す。図中の実線は光ビームの経路を、点線は電気信号の経路を表している。ECLDはNew Focus 社製 TLB-6000 を使用した。ECLDの注入電流は 57 mA とし、そのときの出力は 3 mW であった。発振スペクトル線幅は100 ms あたり300kHz以下であり、連続周波数掃引幅は 75 GHz にも達するのでRbの吸収スペクトルの周波数領域をカバーできる。ECLDからの出力光をアイソレーターに通した後、ウェッジ基板を使って3本のビームに分割した。1本はそのまま波長計に入れてECLDの発振波長をモニターするために使用し、残りの2本はルビジウムのセルに対向させて入射させ、飽和分光の実験配置とした。⁷⁾ これら2本の光ビームはNDフィルターによって光強度を独立に調節できるようにした。また、片方の光ビームは光チョッパーで周波数 1.5 kHzの強度変調をかけた。無変調の光がRbセルを透過した光強度をフォトダイオードで検出した。ECLDの発振周波数をRbの共鳴周波数近辺で掃引し、セル内のRb原子が対向する2つのレーザー光と同時に相互作用したとき得られる飽和吸収信号をロックイン増幅器で位相敏感検波を行った。これにより、原子の熱運動に伴うドップラー広がりを除き、自然幅⁸⁾の広がりでの吸収スペクトルを測定することを試みた。

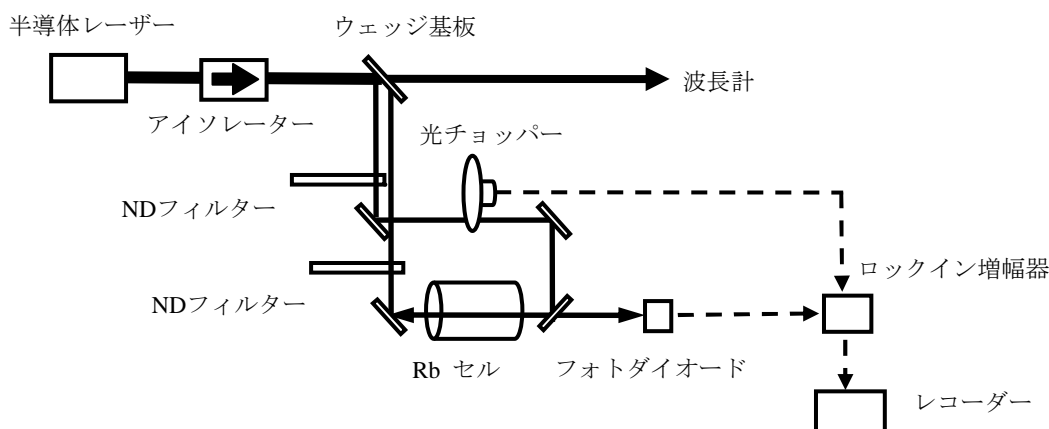


図2 交差共鳴スペクトル測定実験配置

実験結果は図3の通りであった。横軸はレーザー光の周波数、縦軸は飽和吸収強度を表す。図中にはファブリーペロー干渉計を用いて得た100 MHz の周波数幅を参考のため記入した。入射レーザー光強度は2つのレーザー光とも 0.36 mW/cm^2 とした。図3の結果では6個の吸収ピークが観測された。まず超微細構造準位間の共鳴吸収ピークを特定するため100 MHz の周波数幅と各吸収ピーク間の幅を対応させると、6個のピークのうち①と③の間隔が約60 MHz、③と⑥の間隔が120 MHz になることがわかった。図1に示した ^{85}Rb 原子のエネルギー構造と合わせて考えると、①のピークは ^{85}Rb の基底状態 $2S_{1/2} (F = 3)$ から励起状態 $2P_{3/2} (F' = 2)$ 、③のピークは同じく励起状態 $2P_{3/2} (F' = 3)$ 、⑥のピークは励起状態 $2P_{3/2} (F' = 4)$ への遷移に伴う共鳴吸収ピークであることが確認できた。

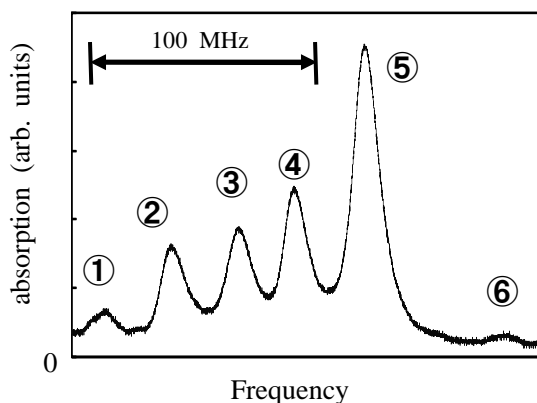


図3 Rb原子の飽和吸収スペクトル

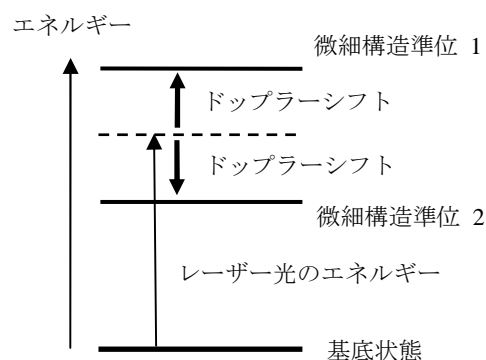


図4 交差共鳴の原理図

図3で観測された①、③、⑥以外の吸収ピーク、すなわち②、④、⑤のピークが、交差共鳴による吸収ピークと考えられる。交差共鳴とは複数のエネルギー準位が関与する光吸収現象である。本研究で測定対象としている遷移（基底状態がひとつの準位で励起状態が複数の超微細構造準位であるエネルギー構造）について考えると、図4のように入射光のエネルギーが原子の基底状態から励起状態の2つの微細構造準位のちょうど中間までに相当するエネルギーを持ち、原子の熱運動によるドップラーシフト量が2つの微細構造準位間の半分のエネルギーに相当するとき、原子は対

向する2つのレーザー光と異なる2つの微細構造準位を通じて共鳴する。このとき原子は2つのレーザー光と相互作用したことになるので光吸収強度は飽和効果が生じ、出力信号として検出される。このように考えると、交差共鳴のピークはスペクトル上で原子の超微細構造間の遷移によるピークのちょうど中間の周波数で出現することになるが、図3の結果を見ると②のピークが①と③のピークの間、④が①と⑥の間、⑤は③と⑥の間にそれぞれ位置していることが確認できる。実際にこの条件を満たす原子の速度を求めると②のピークでは 25 m/s、④は71 m/s、⑤は 47 m/s であり、室温 (300 K) におけるRb原子の熱速度分布幅 (680 m/s) の中にあった。これらより、②、④、⑤のピークが交差共鳴のピークであると結論できた。交差共鳴の信号は、Rbの超微細構造準位間の共鳴吸収信号よりも大きく観測されており、特に⑤のピークは観測された信号の中で最も大きい。

もっとも大きな交差共鳴ピーク⑤のピークの半値全幅を求めたところ約12 MHz であった。当該遷移の自然幅は 6 MHz になることが知られている⁹⁾ が、今回得られた半値全幅は自然幅よりも6 MHz 広くなった。この差を生じた主な原因として、2本の対向するレーザー光経路の重なりによる不完全さによって生じた残留ドップラー幅が考えられる。レーザー光の波長を λ 、2つのレーザー光経路のずれを θ 、それとほぼ垂直方向に進む原子の速度を v とすれば、残留ドップラー幅 (Δv) は

$$\Delta v = \frac{v \sin\theta}{\lambda}$$

で与えられる。前述のRb原子の熱速度分布幅の半分に相当する速度 (340 m/s) を持つ原子を考えると、2つの対向するレーザー光経路が 0.8° ずれるだけで6 MHzの残留ドップラー幅が生じると見積もられる。実際の光学配置は、観測している信号を見ながら手探りで最適な条件を決定しているため、この程度のずれが生じる可能性は十分にあると推測される。実験で得られた交差共鳴信号の12 MHz という半値全幅でも原子の自然幅に匹敵する値であり、レーザーの周波数制御用参照信号として十分な性能を有すると考えられる。

3. 半導体レーザーの発振周波数安定化

今回制御対象となるECLDの、フリーランニング時における発振周波数安定度をまず測定した。そのための実験配置を図5(a)に示す。LD発振周波数のずれは波長計では直接測定できないので、原子の吸収による透過光強度の変化を利用した。ECLDの出力光をアイソレーターに通したあとガラス基板にあてて、透過光と反射光の2つのビームに分割した。透過光は波長計に入れてECLDの発振波長をモニターした。反射光はNDフィルターを通したあとRbセルに入射した。Rbセルを透過した光はフォトダイオードで受けて電気信号に変換し、その信号をレコーダーに入力して記録した。ECLDの発振周波数をあらかじめ原子の共鳴周波数付近に合わせて原子による光吸収を生じさせ、時間とともにどのように透過光強度が変化するかを測定して、その変化量をRb原子の線形吸収スペクトルに支配的なドップラー広がりに対応させてECLDの発振周波数のドリフト量を見積もった。最初 100 秒間の発振周波数のドリフトを測定し、その後 30 分ごとに同様の測定を行い、最初の測定から2時間後まで続けた。

図5 (b) はRb原子の $5S_{1/2}$ ($F = 3$) から $5P_{3/2}$ ($F' = 2, 3, 4$) への遷移の線形吸収であり、こ

のスペクトルのFWHMは 870 MHz である。図5 (c) はRbセルにフリーランのECLD出力光を入射させたときの透過光強度の時間変化である。横軸は測定時間で、縦軸は透過率を表している。最初に合わせたECLDの発振周波数は透過率 70 % となる周波数であったが、時間経過と共にECLDの発振周波数がドリフトし、100 秒後には 80 % まで増大した。これを図5 (a) の吸収スペクトルと対応させると、この100 秒間の透過率の変化は周波数に換算して54 MHz の変化に相当することがわかった。また、2時間後にはこの周波数ドリフトは 258 MHz に達した。超高分解能のレーザー分光用光源としては1 MHz 以下の発振周波数安定度が求められるため、このレーザー光源の現状の性能は不十分であるといえる。

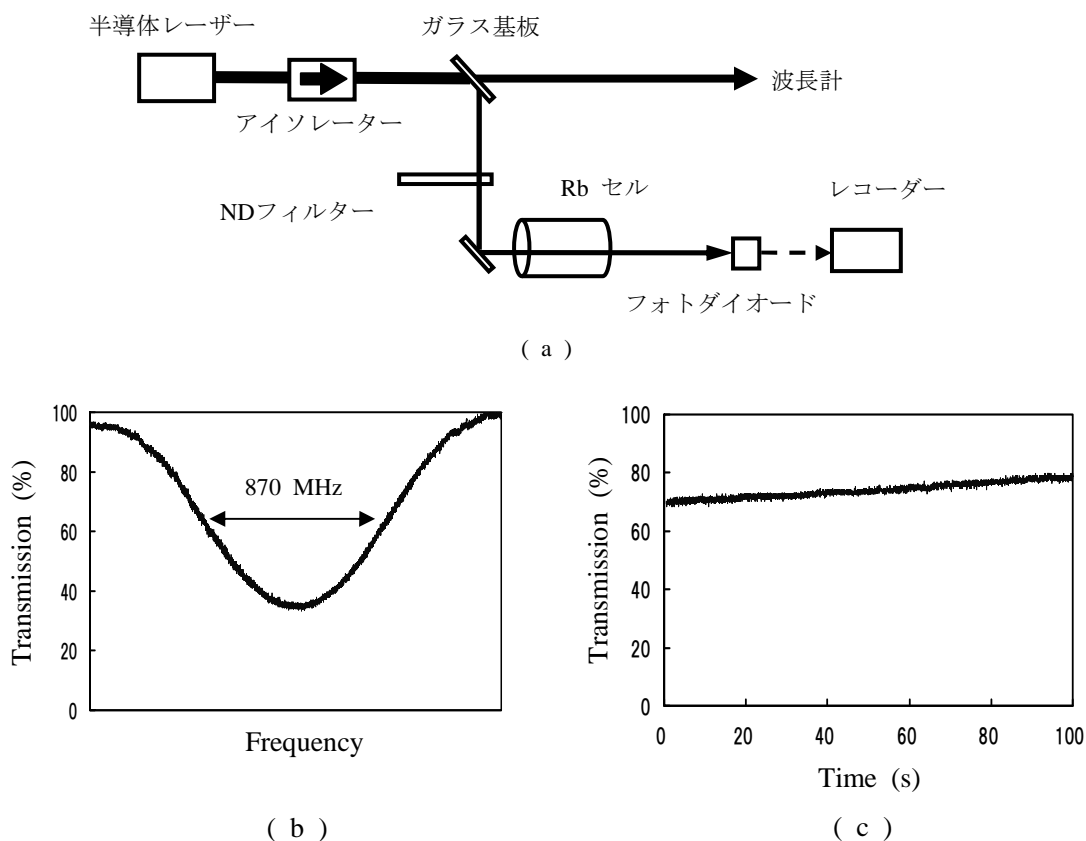


図5 レーザー発振周波数ドリフト測定結果 (a) 実験配置 (b) Rb原子の線形透過スペクトル (c) フリーラン光源による透過光強度測定結果

ECLD の発振周波数を安定化するための実験配置を図 6(a) に示す。交差共鳴信号検出のための実験装置 (図 2) に加え、ECLD の発振周波数を設定値に集束させるための手段としてサーボ回路を用いた。サーボ回路は減算回路、増幅回路、積分回路、加算回路から構成されている。具体的な実験手順は次の通りである。まず、ECLD の発振周波数を掃引して図 3 のスペクトルを得て、それを減算回路に入力して適切な電圧値を差し引き、発振周波数制御のロックイン・ポイントを設定した。本実験では図 6(b) の点線の丸印で示した箇所をロックイン・ポイントとなるようにした。次に ECLD の発振周波数の掃引をやめて、マニュアルで微調整してロックイン・ポイント付近の周波数に近づけ、サーボ回路からの出力を ECLD の注入電流にフィードバックさせた。このときサーボ回路に含まれている増幅回路の増幅率と積分回路の時定数を適切に調整し、ロックイン増幅器からの出力信号強度が図 6(b) のロックイン・ポイントのそれに

保たれるような条件を見つけ出し、維持させた。ECLDの発振周波数が安定化されたか否かは、そのECLDで観測された交差共鳴信号強度から評価した。この実験結果を図6(c)に示す。横軸は時間(秒)、縦軸はロックイン増幅器からの出力を表している。発振周波数を安定化すると同時に出力値のモニターを開始した。ECLDの発振周波数がドリフトすれば、それに応じて観測している交差共鳴信号の強度も変化するはずだが、図6(c)の結果は時間の経過に関わらず一定の出力値が得られていることを示している。レーザーの安定度を評価するために使用した信号も、図6で使用した信号のほうが図5で使用したそれよりも遥かに狭いスペクトルである。これらの事実から、本実験の結果、ECLDの発振周波数を高い精度で安定化に成功したことがわかった。発振周波数の安定度を、図6(c)の信号のピーク間強度と図6(b)の交差共鳴ピーク信号強度及びその半値全幅から見積もったところ、0.4 MHzという値を得た。この値は、フリーラン時の発振周波数ドリフトと比べておよそ100分の1にまで改善されていることがわかる。本実験の結果、観測対象となるRb原子の吸収スペクトルの持つ自然幅の10分の1にまで光源の安定化を達成でき、超高分解能分光用光源として相応しい性能を有するレーザー光源に改良できたと結論できる。

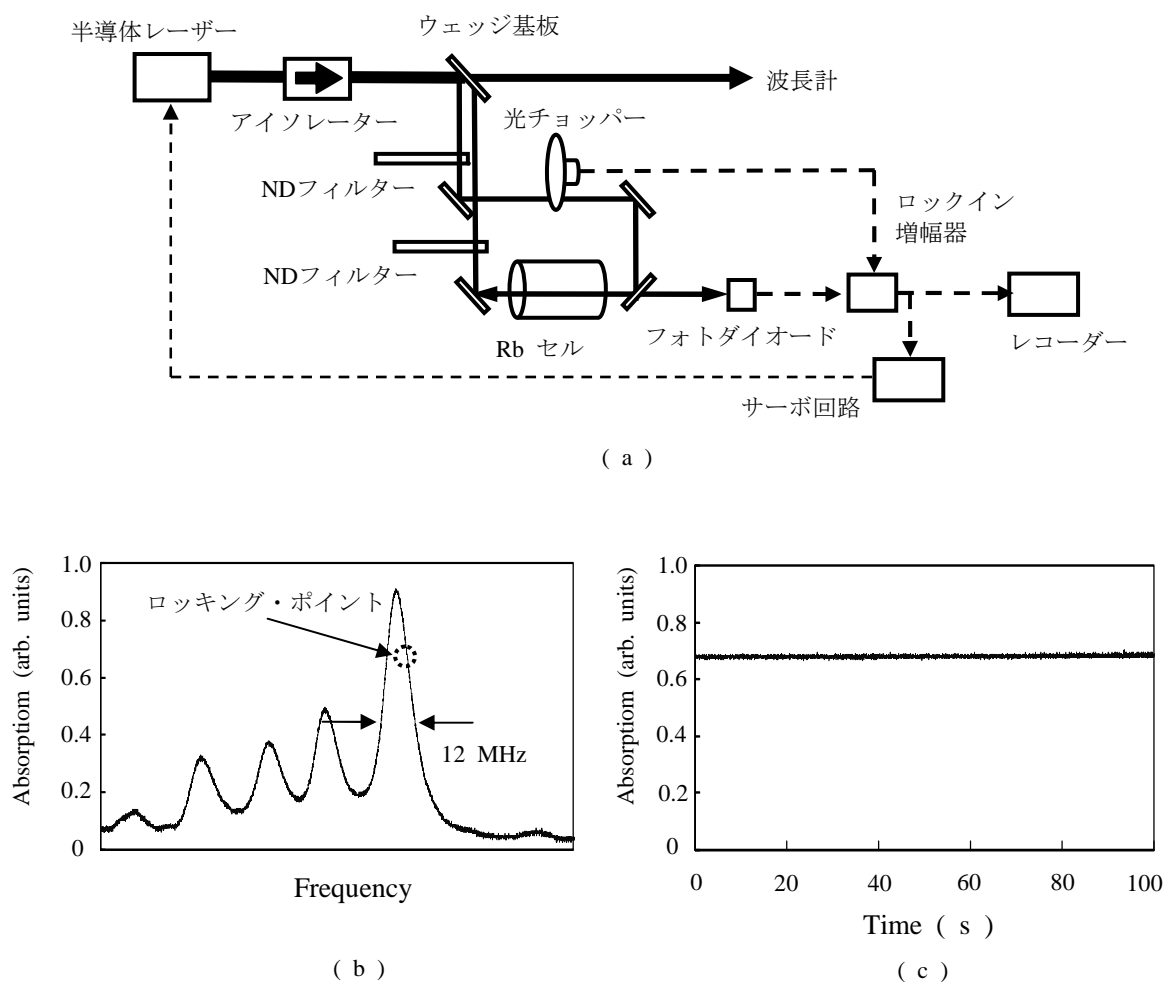


図6 レーザー発振周波数制御結果 (a) レーザー発振周波数安定化実験配置 (b) Rb原子の飽和吸収スペクトル上のロックインポイント (c) 制御レーザー光源による交差共鳴信号強度測定結果

4. まとめ

飽和吸収スペクトルに現れる交差共鳴信号を用い、半導体レーザーの発振周波数を安定化させた。Rb原子の $5S_{1/2}$ ($F=3$) から $5P_{3/2}$ ($F'=2, 3, 4$) への遷移に現れる交差共鳴を観測し、半値全幅が14 MHzの交差共鳴スペクトルを観測した。この交差共鳴信号を参照信号として用い、サーボ回路によるフィードバックを半導体レーザーに施した結果、フリーラン時では100秒間において54 MHzの周波数ドリフトであったが、0.4 MHzにまで発振周波数を安定化することができた。この値は原子の自然幅の10分の1以下の値であり、安定化されたレーザー光源は超高分解能分光用光源として十分な性能を備えると考えられる。交差共鳴信号は通常のエネルギー準位間の共鳴信号よりも大きな強度を持ち、本研究で用いたサーボ回路の中でロッキング・ポイントを設定できる周波数幅も広がるので、安定化レーザーの周波数チューナビリティも向上すると期待される。

謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究 (C) (課題番号 22500800) の援助を受けて行われた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) H. Tsuchida, M. Ohtsu, T. Tako, N. Kuramochi, N. Oura : Jpn. J. Appl. Phys. **21** (1982) pp.L561 - L563.
- 2) W. Demtroeder : “Laser Spectroscopy Volume 2” (Springer, 2008) pp.93 - 98.
- 3) J. R. Beacham, K. L. Andrew : J. Opt. Soc. Am. **61** (1971) pp.231 - 235.
- 4) B. Sheehy, S-Q. Shang, R. Watts, S. Hatamian, H. Metcalf : J. Opt. Soc. Am. B **6** (1989) pp.2165 - 2170.
- 5) 陳軍、山本将史 : 「光とレーザー」 (オーム社 2006) pp.141 - 144.
- 6) C. Wieman, L. Hollberg : Rev. Sci. Instrum. **62** (1991) pp.1 - 20.
- 7) 櫛田孝司 : 「量子光学」 (朝倉書店 1981) pp.76 - 79.
- 8) 大道寺英弘、中原武利 : 「原子スペクトル 測定とその応用」 (学会出版センター 1996) pp.21 - 24.
- 9) H. Metcalf, P. Straten : “Laser Cooling and Trapping” (Springer 1999) p274.

(2012年 11月 12日提出)

(2013年 1月 11日受理)

Frequency Control of a Laser Using the Cross-Over Resonance

KAMISHIKIRYO, Shizuka

Kurohama-Nishi Primary School

OHMUKAI, Ryuzo

Faculty of Education, Saitama University

HYODO, Masaharu

National Institute of Information and Communications Technology

KONDO, Hitoshi

Faculty of Education, Saitama University

Abstract

We used a novel approach to stabilize the 780-nm laser frequency by using the cross-over resonance of Rb atoms. The signal intensity of the cross-over resonance is generally larger than that of the resonance between atomic energy levels. Therefore, laser frequency control using the cross-over resonance is expected to achieve better stabilization and a wider tuning range, compared with the conventional one. The observed cross-over signal obtained from the saturation absorption spectrum has a line width of 12 MHz, which is attributed to the natural line width of atomic transition and the residual Doppler broadening due to the misalignment of the counter-propagating laser beams. As a result of our frequency control, the stability was improved to approximately 0.4 MHz for 100 s, though the free-running laser drifted almost 54 MHz. The resultant laser is applicable as a light source to be used in the high-resolution spectroscopy of Rb atoms.

Key Words : laser, saturation spectroscopy, cross-over resonance, frequency stabilization, rubidium