様式Ｆ－１９

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成２５年６月７日現在

機関番号：１２６０１
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2011～2012
課題番号：２３６５６０４２
研究課題名（和文）原子気体の偏光分光信号を用いた線幅１Hz 級レーザーの開発

研究課題名（英文）Development of laser sources with a sub-Hertz linewidth using polarization spectroscopy of an atomic gas
研究代表者
鳥井　寿夫（TORII　YOSHIO）
東京大学・大学院総合文化研究科・准教授
研究者番号：４０３０６５３５

研究成果の概要（和文）：
レーザー線幅狭窄化の伝統的な手法である Pound-Drever-Hall 法と偏光分光信号を用いた線幅狭窄化が、光学密度が１より小さい範囲では数学的に等価であることを証明し、ルビジウム原子気体セルを用いて原理検証実験を行った。リチウム原子のヒートパイプ中における偏光分光を試み、ポンプ光の飽和効果によって偏光分光が可能なことが実験的に検証された。ストロンチウム原子の分光セルの候補として、ホローカソードランプを導入し、その諸特性を 461nm（$^1S_0$-$^1P_1$）遷移を用いて調べ、リチウム原子気体と同様にポンプ光の飽和効果による偏光分光が可能であることが検証された。

研究成果の概要（英文）：
We have proven that the mechanism of laser linewidth reduction using the traditional Pound-Drever-Hall method is mathematically equivalent to that using the signal of polarization spectroscopy provided that the optical density of the atomic sample is well below unity. A proof-of-principle experiment was conducted using a Rb vapor cell. We performed polarization spectroscopy of Li6 and proved that the saturation of the transition caused by the pump beam enables polarization spectroscopy without spin polarization. As a source of Sr for spectroscopy, we examine the performance of the Sr hollow cathode lamp using the 461nm（$^1S_0$-$^1P_1$）transition and proved that polarization spectroscopy relying on pump-beam-induced saturation was possible even in a hollow cathode discharge.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：量子エレクトロニクス
科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎　応用光学・量子光工学
キーワード：レーザー、量子エレクトロニクス、分光

１．研究開始当初の背景

周波数が安定化されたレーザーの利用価値は、「超高分解能分光」、「レーザー冷却」「原子・分子のコヒーレント制御」、「波長分割多重通信」、「高精度周波数標準」、「重力波検出」など、枚挙に暇がない。現在最も普及している周波数安定化法は、1983 年に John Hall らによって開発された光共振器を用いた Pound-Drever-Hall（PDH）法である。PDH 法では、周波数の基準となる高フィネスのファブリペロー共振器に位相変調されたレーザー光を入射し、その反射光の位相を DBM（double balanced mixer）によって誤差信号に変換する。この周波数安定化法の最大の特徴は、寿命の長い共振器内の光電場が、過去の時刻に入射していたレーザー光の“位相メ

モリー”として働き、これによってレーザー光の急激な位相変化が俊敏に（共振器の緩和時間より早く）検出され、高帯域なフィードバックが可能となる点である。
PDH 法によって実現できるレーザー線幅は、当然用いる共振器の安定性によって制限される。PDH 法で 1Hz 級の周波数安定度を得るには、熱膨張率の極めて小さい ULE（ultra low heat expansion）共振器を真空チャンバー内に設置し、その真空チャンバー自身も厳重に防振しなければならず、かなり大掛かりな装置を必要とする。我々は PDH 法以外の、外部の ULE 共振器に頼ることのない簡便なレーザー周波数安定化法の必要性を強く感じていた

２．研究の目的
我々の研究グループは 2003 年に気体原子の偏光分光信号を用いてレーザー周波数を安定化する手法に関する論文（Y. Yoshikawa, et. al, “Frequency stabilization of a laser diode with use of light-induced birefringence in an atomic vapor”, Applied Optics **42**, 6645-6649 (2003)）を発表していた。我々は偏光分光法と PDH 法とのアナロジー（位相敏感性）に着目し、偏光分光においても PDH 法と同様に周波数基準器の緩和時間（この場合、原子の自然放出寿命）に制限されない広帯域な周波数フィードバックが可能であると予測していた。このような背景のもと、本研究は、PDH 法のような外部の共振器を用いず、代わりに機械的振動の影響を受けない真空中の原子気体を周波数基準とする狭線幅（１Hz 級）レーザーを開発することを目的とした。本研究目的が達成されれば、多くの研究者が容易に１Hz 級レーザーを自らの研究のために作成することができる。特に光格子時計の分野では、装置の簡略化および高精度化をもたらし、光格子時計による秒の再定義や光格子時計の GPS 衛星への搭載などの応用が期待される。

３．研究の方法
本研究の最終的な目標は線幅が 7 kHz であるストロンチウムのスピン禁制遷移（$^1S_0$–$^3P_1$）の偏光分光信号を用いたレーザー線幅狭窄化であるが、その目標に向かって具体的に以下の３つの実験を行った。
まず、原子気体の偏光分光と光共振器を用いた PDH 法が数学的の等価であること実験的に検証するために、ルビジウム原子気体の偏光分光信号を用いた 780nm 帯 DFB レーザーを用いたレーザー線幅狭窄化を行った（図１）。線幅の評価には自己遅延ヘテロダイン法を採用した。
次にストロンチウム原子と蒸気圧特性が近いリチウム原子のヒートパイプ中における

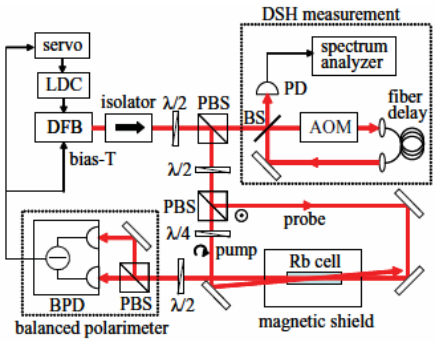

図１　Rb 原子気体の偏光分光

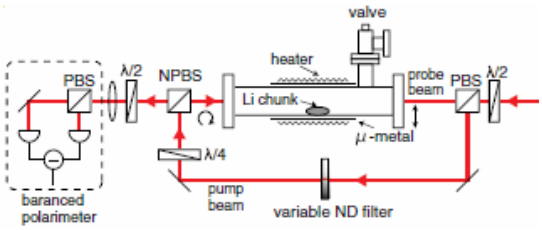

図２　Li6 原子気体の偏光分光

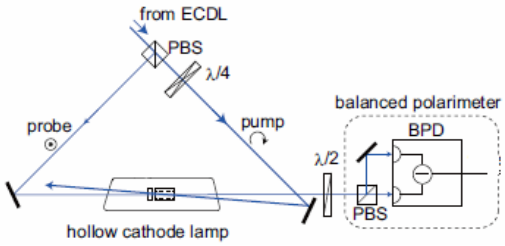

図３　Sr 原子気体の偏光分光

偏光分光を試みた（図２）。
最後に、ストロンチウム原子の分光セルの候補として、ホローカソードランプ（Hamamatsu L2783-38Ne-Sr、Ne バッファー圧 6 Torr）を導入し、その偏光分光が可能であるかを 461nm（$^1S_0$–$^1P_1$）遷移を用いて調べた（図３）。

４．研究成果
（１）ルビジウム原子気体を用いた偏光分光と PDH 法の同等性の原理検証実験

Rb 原子気体の偏光分光信号をバイアス T を通して DFB レーザーの注入電流に高速フィードバックすることによって線幅狭窄化を行った。図３には、線幅狭窄化した DFB レーザーの線幅の自己遅延ヘテロダイン法による測定結果である。フィードバックがないときの線幅（約 2MHz）を、約 20kHz にまで狭窄化することに成功した。到達した線幅は、フォトディテクターのショットノイズで制限されており、PDH 法と偏光分光信号を用いた線幅狭窄化の等価性が実験的に検証された。

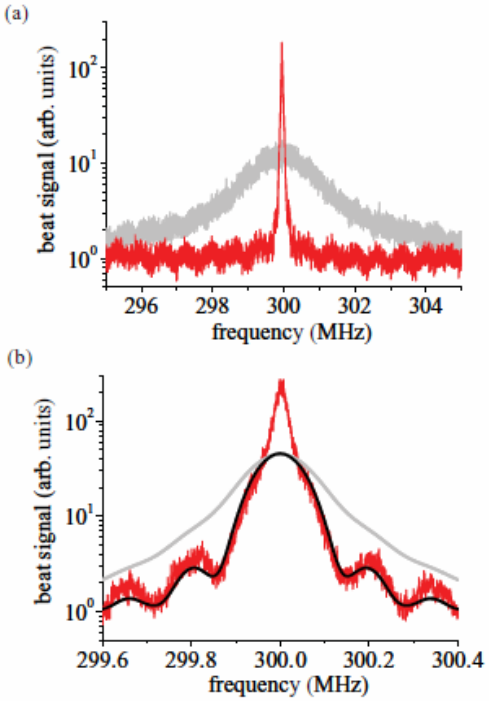

図４　(a)Rb 原子気体の偏光分光信号により線幅狭窄化された DFB レーザーの自己遅延ヘテロダインスペクトル。(b)中心部分のより詳細なスペクトル。

（２）ヒートパイプオーブンを用いたリチウム６原子の偏光分光

リチウム６は励起状態の超微細構造分裂幅が自然幅程度であり、円偏光のポンプ光によるスピン偏極が、他のアルカリ原子に比べて起きにくく、ポンプ光の飽和効果によって誘起される円偏光複屈折が実際に得られる偏光分光スペクトルの解釈に重要であることがわかった。特に Ar バッファーガスのない

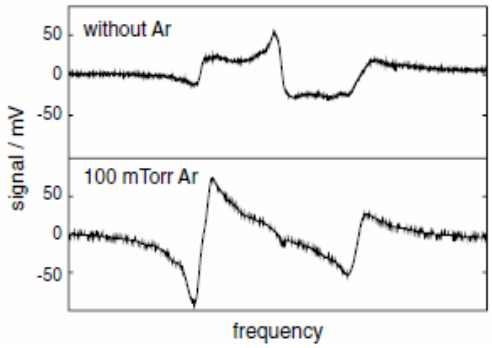

図５　Li6 原子気体の偏光分光信号。左から冷却遷移、クロスオーバー遷移、リポンプ遷移。Ar バッファーガスの導入により、冷却およびリポンプ遷移の信号は増強し、クロスオーバー遷移の信号は減少する。

状況では、スピン偏極および飽和効果による円偏光複屈折が互いに逆向きの極性を持ち、大きな偏光分光信号を得ることが難しい。それに対して、適度な Ar バッファーガスの環境下では、スピン偏極が抑制され、ポンプ光の飽和効果による円偏光複屈折のみが生き残るため、図 5 に示すように、特に冷却遷移のおいて大きな偏光分光信号を得ることができた。実際に得られた偏光分光信号を用いて、671nm レーザーの周波数安定化を行い、Li6 原子の磁気光学トラップに成功した。

（３）ストロンチウム原子のホローカソードランプを用いた 461nm 遷移の偏光分光

461nm 光源には近年開発された 450-460nm 帯青色半導体レーザー（NICHIA NDBA116T）を用いた外部共振器型半導体を採用した。出力は注入電流 100mA で約 40mW で、約 8GHz のモードホップのない掃引幅が得られた。図６はホローカソード中における 461nm($^1S_0$-$^1P_1$)遷移の吸収スペクトルで、そのドップラー幅よりカソード内の Sr 原子気体の温度が 530K と見積もられた。

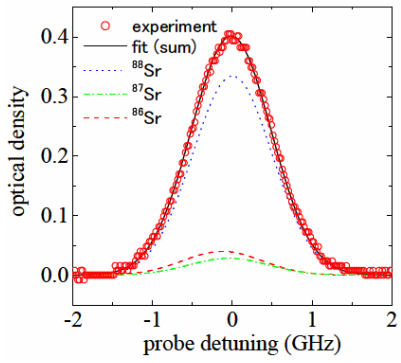

図６　ホローカソードランプ中における Sr 原子気体の線形吸収スペクトル。

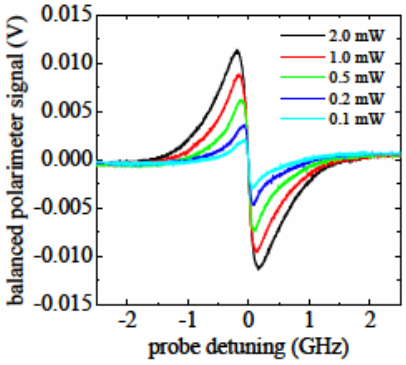

図７　ホローカソードランプ中における Sr 原子気体の偏光分光スペクトル。

図７に様々なポンプ光強度における Sr 原子気体の偏光分光信号を示す。同位体比が約80%の Sr88 は核スピンを持たず、超微細構造を持たないため、基底状態（$^1S_0$）はスピン偏極しない。したがって、得られた偏光分光信号は純粋にポンプ光による飽和効果に帰すことができる。得られた分散信号の幅は、ポンプ光強度が弱い極限で約 80MHz 程度であり、ここから自然幅である 32MHz を引いた約 50MHz が速度変化衝突によるものと見積もられた。ドップラーフリー配置での速度変化衝突の衝突断面積に関しては、数 Torr 程度のバッファーガス圧力では先行研究がなく、今後詳細に研究する必要がある。

５．主な発表論文等
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計４件）
(1)Yosuke Shimada, Yuko Chida, Nozomi Ohtsubo, Takatoshi Aoki, Makoto Takeuch 位、Takahiro Kuga, and Yoshio Torii, A simplified 461-nm laser system using blue laser diodes and a hollow cathode lamp for laser cooling of Sr, Review of Scientific Instruments **86**, 063101 (2013), 査読あり
doi: 10.1063/1.4808246

(2)Yoshio Torii, Hideyasu Tashiro, Nozomi Ohtsubo, and Takatoshi Aoki, Physical Review A **86**, 033805 (2012),査読あり
doi: 10.1103/PhysRevA.86.033805

(3)Nozomi Ohtsubo, Takatoshi Aoki, and Yoshio Torii, Optics Letters **37**, 2865 (2012), 査読あり
doi: 10.1364/OL.37.002865

(4)Takatoshi Aoki, Kotaro Umezawa, Yuki Yamanaka, Naotomo Takemura, Yasuhiro Sakemi, and Yoshio Torii, Journal of the Physical Society of Japan **81** 034401 (2012), 査読あり
doi: 10.1143/JPSJ.81.034401

〔学会発表〕（計２件）
①Yoshio Torii, Laser phase and frequency stabilization using atomic coherence, NICT Workshop on the Optical Frequency Standard, 2013 年 02 月 07 日, 情報通信研究機構（小金井市）

②大坪望、生駒大祐、青木貴稔、鳥井寿夫、Ar バッファーガス中での 6Li 原子の偏光分光、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 22 日、富山大学

〔その他〕
ホームページ等
http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/

６．研究組織
(1)研究代表者
鳥井　寿夫（TORII YOSHIO）
東京大学・大学院総合文化研究科・准教授
研究者番号：４０３０６５３５

(2)研究協力者
青木　貴稔（AOKI TAKATOSHITORII）
東京大学・大学院総合文化研究科・助教
研究者番号：３０３２８５６２

竹内　誠（TAKEUCHI MAKOTO）
東京大学・大学院総合文化研究科・助教
研究者番号：６０５５２１０６

久我　隆弘（KUGA TAKAHIRO）
東京大学・大学院総合文化研究科・教授
研究者番号：６０１９５４１９