

光位相同期半導体レーザーの開発

量子・物質工学科 中川研究室 0713021 小野田 圭吾

目的・背景

現在、中川研究室では原子干渉計の研究をしている。そこで、原子干渉計の光源として位相同期されたレーザーが必要となってくる。原子干渉計では対向させたレーザー光を原子に計3回当てる。最初のレーザー光の位相情報を基準に、原子を2つに分けたとき、再び重ね合わせたときの最初との原子の位相差を干渉信号として扱う。このとき、レーザー間の位相に揺らぎがあると原子の

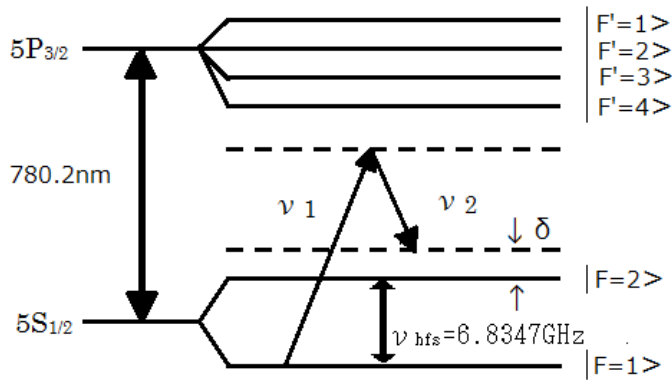


図1 ^{87}Rb のエネルギー準位と誘導ラマン遷移

位相差が干渉によるものか位相揺らぎによるものか分からない。したがって、レーザー間の位相を抑える必要がある。

また、原子干渉計では ^{87}Rb の基底状態の超微細構造間での誘導ラマン遷移を用いる(図1)。誘導ラマン遷移は2台のレーザーの差周

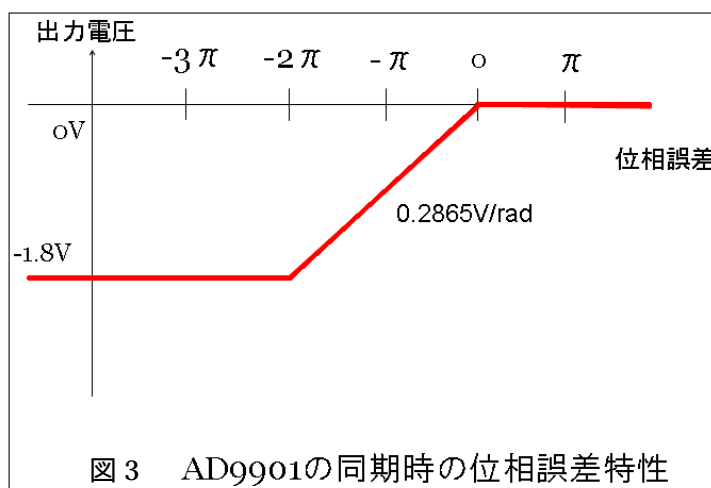
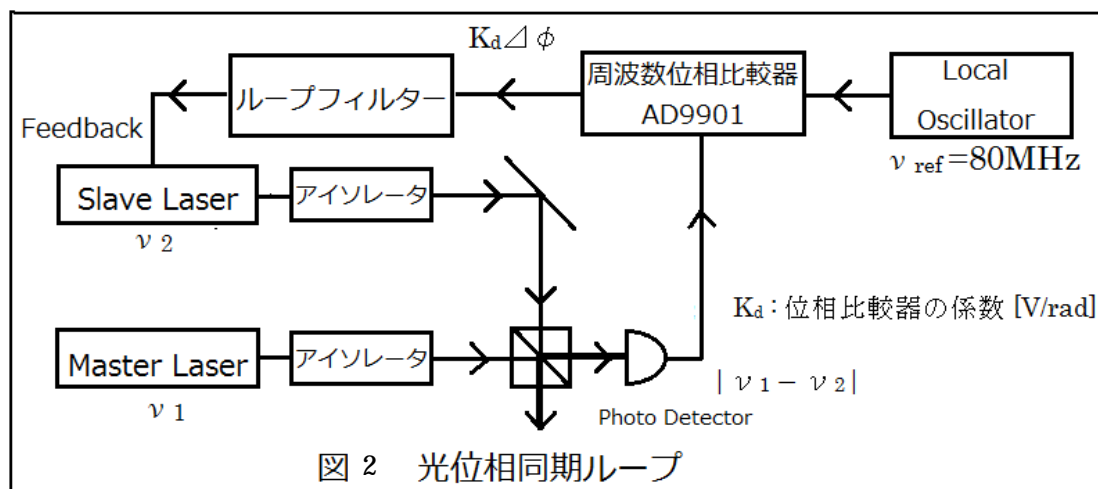
波数が基底状態の超微細構造間のエネルギーに等しいとき起こる。したがって、2台のレーザーの差周波数もロックする必要がある。

以上のことより、目的は原子干渉計の光源として用いることである。今回の目標としては差周波数を80MHzにロックして、位相揺らぎを100ms間で10mrad以下に抑えることとした。

原理・方法

まず、位相揺らぎを100msで10mradに抑える理由であるが、100msは原子干渉計でのパルス間隔であり、10mradは原子干渉計で重力加速度を 10^{-8} のオーダーで測定する際に必要な条件である。重力加速度を求める式の一部である $a = k g T^2$ ($k = 2 / \lambda$:レーザー光の波数、 g :重力加速度、 T :パルス間隔)にパラメータ($\lambda = 0.78 \times 10^{-6}\text{m}$, $g = 9.8\text{m/s}^2$, $T = 100\text{ms}$)を入れ、目標である 10^{-8} を掛けると8mradという条件が求まる。したがって、10mrad以下の位相揺らぎに抑えられれば原子干渉計に用いることができると見積もることができる。

図2は光位相同期ループのブロック図である。2つのレーザー光をビームスプリッターで重ね合わせ、フォトディテクターでビート信号を検出する。そし



て、ビート信号とローカルオスシレーターから出力された 80MHzの信号を周波数位相比較器 (AD9901) に入れる。AD9901 は 0 ~ -2 の範囲で位相誤差に比例した電圧 (K_d) を出力し、またこの範囲外でも周波数比較器として働き、位相比較できる範囲まで引き込みをかけてくれる (図 3)。出力

された電圧はその後、レーザーダイオード (LD) や、LD ドライバーの特性を考慮したループフィルタを通してスレイブレーザーへとフィードバックされる。ループフィルタは比較器から出力された信号を 5 倍に増幅した後、LD へのフィードバック回路、LD ドライバーへのフィードバック回路、誤差信号を見るための回路と 3 つに分かれている。LD へのフィードバック回路はレーザーの変調ゲインの減衰や、位相遅れを補うための回路となっている (ローパスフィルタとハイパスフィルタの組み合わせ)。LD ドライバーへのフィードバック回路は LD へのフィードバック回路だけでは足りないゲインを補うための回路になっている (積分回路を組み合わせたもの)。

結果

図 4 はこれらの回路を用いて同期をしたときとそうでないときのビート信号をスペクトルアナライザで見たときの図である。ピークが 78MHz 付近にある少し幅のある青い波形がロック前のビート信号で、もう一方の赤い波形がロック後のビート信号である。ロック前は幅のある信号がゆらゆらと揺れてし

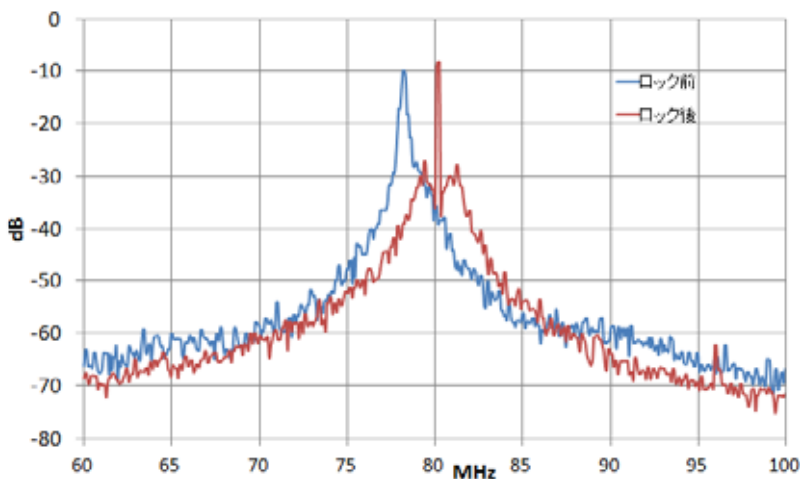


図5 ロック前後のビート信号

まう。しかし、ロック後は 80MHz でピークが固定され、細い信号部分とノイズ部分とに分かれているのが分かる。

次に、ロックしたビート信号をローカルオシレーターと同じ原子時計を基準にとったカウンターで

周波数を測定した。原子時計の精度が 11 桁であり、カウンターの分解能が 10 桁だったということと、指定された周波数にロックできていることを確認するのが目的だったため今回は 80MHz でのロックとした。カウンターで測定したデータをアラン分散で評価した結果は図 6 のようになった。実際、カウンターで測定するのは周波数であるが、周波数と位相には $=2 \quad fT$ という関

積分時間	データ数	周波数揺らぎ	位相揺らぎ
100ms	1000点	0.049Hz	30mrad

図6 ビート信号のカウンター測定結果

係があるため位相揺らぎに変換することもできる。本来は更に少ない積分時間でも測定をしたかったのだが、カウンターの桁落ちや、PC 取り込み用ソフトが 100ms 以下の積分時間に対応していなかったという理由でこの時間のみになってしまった。また、位相揺らぎを周波数揺らぎとして見る際に 10 桁目での揺らぎを見たかったのだがカウンターの分解能が 10 桁目までだったため、

結果が正確であるとは言いがたい。

そこで、誤差信号でも評価を行ってみた。図 7 は誤差信号を位相揺らぎに変換したものである。この図の 2 乗平均平方根(RMS)は 53mrad であった。次に、このデータ(積分時間 2ms, データ数 1000 点)を元に

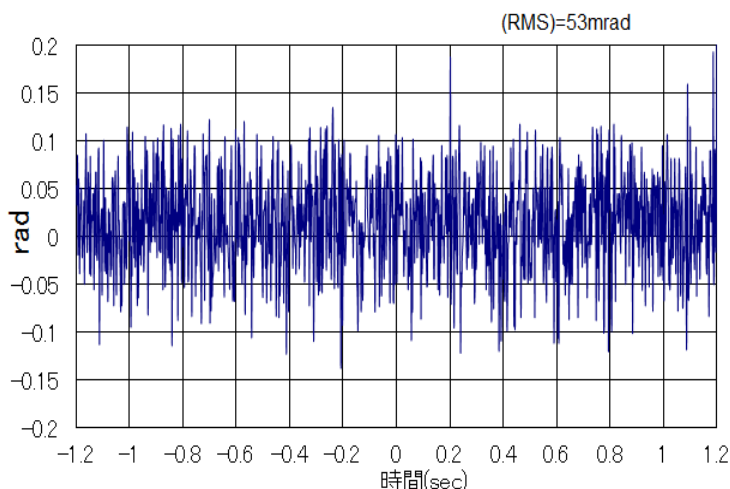


図7 誤差信号から求めた位相揺らぎ

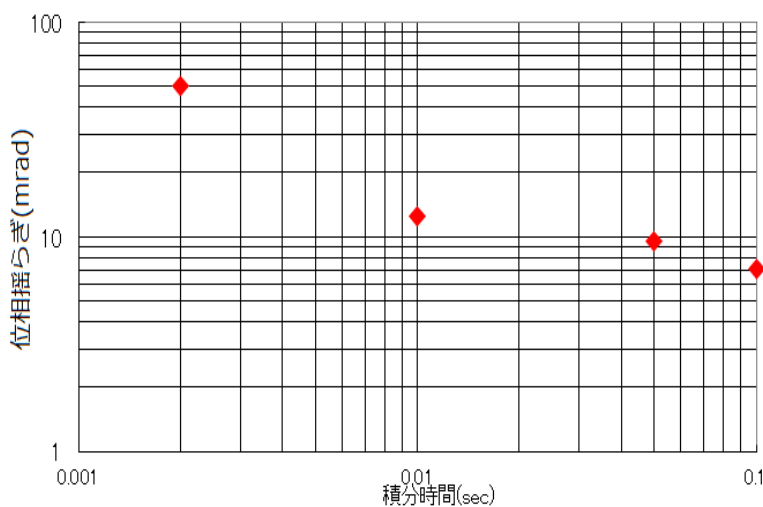


図8 誤差信号の評価

様々な積分時間でのアラン分散で評価してみた(図 8)。この図より、積分時間を多くとるにつれて位相揺らぎが小さくなっているのが分かる。そして、目的である 100ms での位相揺らぎは 7mrad である。つまり、目標値である 10mrad はクリアしている。しかし、この評価方

法は実際のビート信号ではなく誤差信号を見たものであるため、こちらも正確であるとは言いがたい。

まとめ

2 台のレーザーの光位相同期はできた。しかし、原子干渉計に用いることができる精度であるかは疑問が残る。したがって、今後は、より正確な評価方法を探す。そして、正確な評価で精度が足りないと分かった場合は改善策を探す。考えられる方法としては本研究では信号をデジタル化して位相比較を行っているが、アナログ信号での位相比較も行うなどである。

参考文献

「光位相同期による原子干渉計用光源の開発とその評価」 堀越 宗一
平成 13 年度 電気通信大学 電子物性工学科 卒業論文