

少数光子非線形効果の観測に向けた 光共振器安定化用光源の開発

丹治研究室 山寄直樹

1 序論

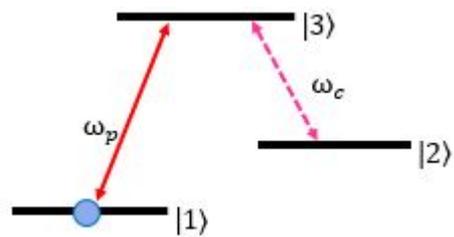
全光型量子情報処理[1]においては、微弱光同士の相互作用は欠かせないものである。しかし、光子同士は真空中では相互作用しないので、通常非線形光学効果と同様に物質を媒介させる必要があるこのとき、微弱光により有意な非線形効果を観測するために、高いフィネスの共振器を用いて微弱光と物質との相互作用を増強させる必要がある。本論文は高フィネス共振器中の原子を用いて観測することができる少数光子非線形光学現象の一つである真空場誘起透明化を用いた単一光子スイッチの実現に向けた光源開発についてまとめたものである。

2 背景

物質による吸収を抑制した状態で非線形光学効果を観測するための方法として電磁場誘起透明化 (electrical-induced transparency, EIT) というものがある。EITとは3準位系と2つの電磁場の相互作用により観測できる非線形光学現象である。図1のような3準位系を考える。原子に対し $|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ に共鳴な周波数を持つプローブ光のみを入射させると、原子は $|1\rangle$ 準位から光を吸収して $|3\rangle$ 準位へと励起する。しかし予め $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ に共鳴させたコントロール光を入射させた状態で、原子に対し $|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ に共鳴な周波数を持つプローブ光を入れると、 $|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 遷移と $|2\rangle \leftrightarrow$

$|3\rangle$ 遷移が量子干渉を起こし $|3\rangle$ 準位の確率振幅が打ち消される。それにより原子の $|3\rangle$ 準位への励起が抑制され、プローブ光は透過する。これを電磁場誘起透明化と呼ぶ。

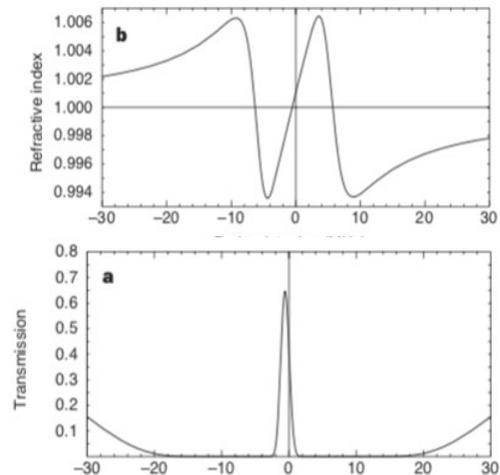
図1 EITの準位図



EITにおける、原子の透過率と屈折率は図2のようにプローブ光の周波数に依存する[2]。図2より原点付近で屈折率が急峻に変化するため、次式よりプローブ光の群速度が低下する。

$$v_g = c / (n + \omega \frac{dn}{d\omega}) \quad (1)$$

図2 EITにおける透過率及び屈折率の周波数依存性[2]



EIT を少数光子しか含まないコントロール光で実現しようとした場合にはコントロール光を光共振器で増強するという方法が考えられる。究極的にはコントロール光がない場合でも、 $|2\rangle \Rightarrow |3\rangle$ 遷移に共鳴する共振器中に原子をいれればプローブ光の透過率が上昇する。これを真空場誘起透明化(vacuum-induced transparency, VIT)という[2]。これは真空場のゆらぎが共振器によって増強され、EITのコントロール光の役割を果たした結果であると解釈できる。VITにおいてもEITと同様に群速度の低下が起こることが予想される。実際に先行研究ではVITにおける透過パルスの遅延が観測されている[2]。我々はこのVITにおける透過パルスの遅延を用いて、単一光子で単一光子をスイッチングする単一光子ディレイスイッチの実現を目指している。

単一光子ディレイスイッチの概念図を図3に示す。先行研究で図4のように共振器内の光子の数に応じて透過スペクトルの遅延が低減することが理論的に予測されている[3]。この性質を用いると、スイッチ光子がない時、被スイッチ光パルスはVITにより遅延するが、スイッチ光子があるときには被スイッチ光パルスはVITによる遅延が緩和され、パルスが加速したように見える。以上の原理に基づきスイッチ光子の有無によって被スイッチ光子の出射するタイミングを変化させ、単一光子で単一光子を制御することを目指す。

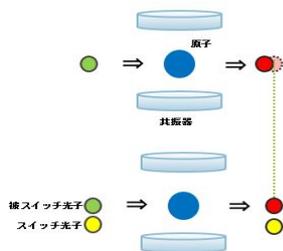


図3 単一光子ディレイスイッチ概念図

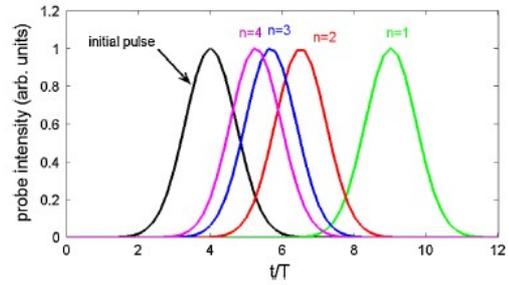


図4 共振器内光子数とパルスの遅延[3]

この時、共振器の共鳴周波数を原子の遷移周波数と一致するように、共振器長を安定化させる必要がある。用いる原子は ^{87}Rb の遷移周波数に対して780 nmのレーザー光の周波数を安定化させ、780 nmのレーザー光の周波数に対して共振器の共鳴周波数を安定化するという方法では、共振器中に常に安定化用の780 nmのレーザー光が入射された状態となり、VITの観測に支障をきたす。そこで本研究では図5のような機構を用いて共振器長を安定化させる。このシステムではまず ^{87}Rb の遷移周波数に対して780 nmのレーザー光の周波数を安定化させ、780 nmのレーザー光の周波数に対して参照共振器の共鳴周波数を安定化させる。さらに参照共振器に対し760 nmのレーザーを安定化させ、760 nmのレーザー光に対して実験共振器を安定化させる。

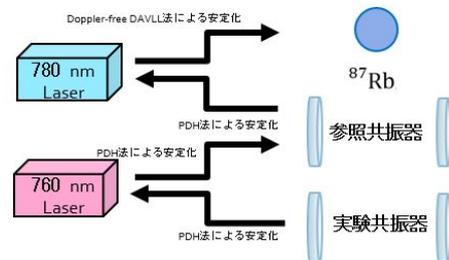


図5 実験共振器安定化用のシステム

ここで、780 nmのレーザーは原子のモニタリングに使用するために実験共振器

に入射させる必要があり、実験共振器の線幅と同程度かそれ以下にする必要がある。そのため、最初に 780 nm レーザーの線幅を狭窄化した。

3 実験

3.1 レーザー線幅狭窄化

レーザーの線幅狭窄化にあたっては、外部共振器の長さを長くするために、図 6 のように feedback 光を光ファイバーに入射させ、その後ミラーで反射させ再び同じ光ファイバーを通すことでレーザー内に光を戻して狭窄化を行った[4]。

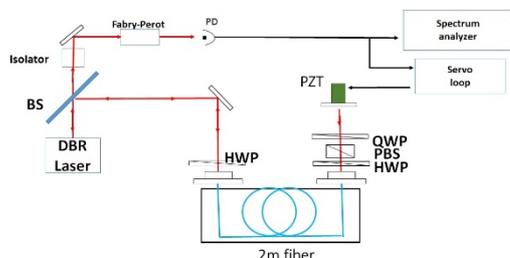


図 6 Optical feedback の実験系

しかし、フィードバック光をファイバーカップリングさせようとしたところ、ファイバーカップリングの効率が数%程度と著しく低かった。その原因としては、レーザー出射直後のコリメータレンズでビームが削られていること、またビーム形状が TEM_{00} とかけ離れていることが考えられた。そこでレーザー出射直後のコリメータレンズの位置調整を行いビームサンプラの後ろにシリンダリカルレンズを挿入しビーム光を整形することで、ビームの形を TEM_{00} に近づけた。その結果図 8 のようなビーム形状が得られた。ただし図 8 は縦軸が水平軸、横軸が鉛直軸である。

図 7 整形前のビーム径

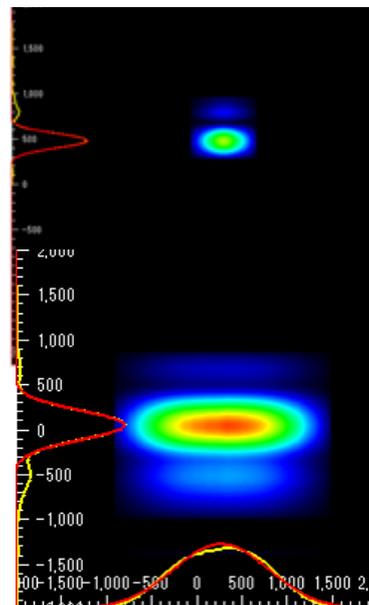


図 8 整形後のビーム径

ビーム径を整形した後、再度ファイバーカップリングを行い、ファイバー入射前後のパワーをフォトダイオードで測定したところ、カップリング効率は 36.1% まで向上した。レーザーへのフィードバック光 P のゲインの最大値を求めると -30.7dB となった。安定してシングルモード発振を維持できる領域は $-35\text{dB} < P < -31\text{dB}$ であり、PBS 後の $\lambda/4$ 板によりフィードバックパワーを低減させることができるため、これによりレーザーのフィードバックパワーを、安定してシングルモード発振を維持できる領域に調整することが可能となった。

3.2 自己遅延ヘテロダイン

前節の方法で狭窄化した 780 nm DBR レーザーの線幅を測定する方法として

自己遅延ヘテロダイン法[5]を用いた。自己遅延ヘテロダイン法では線幅を測定するレーザー光を2つに分け、片方の光をコヒーレンス長より長い長距離ファイバーに通すことで、2つの光の相関を失くす。またもう片方の光に対して acousto-optic modulator (AOM) を用いて周波数シフトを起こす。これら2つの光を再び重ねることで、相関を持たない、周波数の異なる光同士のリート信号を観測することが出来る。同一のレーザーを元にした2つの光を使っているので、観測されるリート信号の線幅は、元のレーザーの線幅の2倍となっている。すなわち観測したリート信号の線幅を半分にしたものが元のレーザーの線幅となる。実際に 780 nm DBR レーザーのリート信号を測定してローレンツ関数によるフィッティングを行った結果が図 10 である。グラフよりリート信号の線幅は 41 kHz と見積もることが出来る。今回の実験では 4 km の遅延ファイバーを用いているので、4 km のファイバーに対応するコヒーレンス長から今回の測定の分解能を求めると 52kHz であるので、狭窄化後のレーザーの線幅は 52 kHz 未満である事が分かる。この結果より optical feedback により確かに線幅が狭窄化されており、実験共振器の線幅は 68 kHz であるため、780 nm DBR レーザーの線幅は実験共振器と同程度以下まで狭窄化され、VIT 観測に使用するために十分に狭い線幅まで狭窄化を行えたと言える。

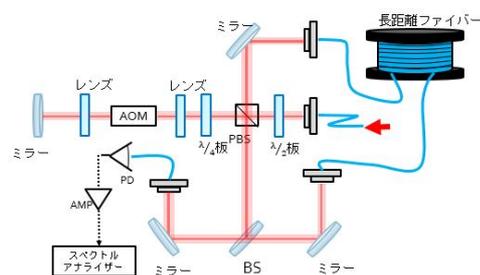


図 9 自己遅延ヘテロダインの実験系

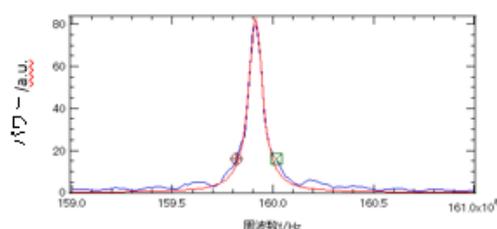


図 10 Optical feedback 後のレーザー線幅

3.3 cavity ring-down 測定

次に、狭窄化を行った 780 nm のレーザー光を用いて、参照共振器の特性評価を行った。780 nm のレーザー光を参照共振器の TEM_{00} モードにモードマッチさせ、cavity ring-down 測定によるフィネス測定、及び EOM を用いた参照共振器の FSR と線幅測定を行った結果について述べる。

参照共振器の TEM_{00} モードにマッチさせるため ABCD 行列を用いて適切なコリメータレンズ、モードマッチレンズの組み合わせを選定した。計算によって定めた位置に各光学素子を配置して、図 12 のような実験系を組み共振器への入射光と反射光のモードが重なるようにアライメントを行った。

cavity ring-down 法[6]を用いてフィネスを測定した。cavity ring-down 法とは、共振器の長さを掃引しながら共振器にレーザー光を入射させると、共振器内

の光の干渉の仕方が時間変化し、透過光が振動しながら減衰する。その透過光の1つ目のピークと2つ目のピークの比と、時間差よりフィネスが求められるという手法である。透過光をAPDに当てオシロスコープにより波形を観測した。その際参照共振器のピエゾを、1FSRにあたる390 nmの距離だけ1000から2000 Hzまで100Hz毎に周波数を変えながら掃引した。それぞれの周波数における波形データを取得しフィッティングすることにより得られた結果から以下の図11を得た。ただし、式は $\tau \approx \Delta t$ の領域でのみ成り立つため、フィネスを15700と見積もった結果 τ の概算値が730nsと求められたため $\tau < 730\text{ns}$ の測定点のみを使用した。図11よりフィネスは 5700 ± 200 と求められた。

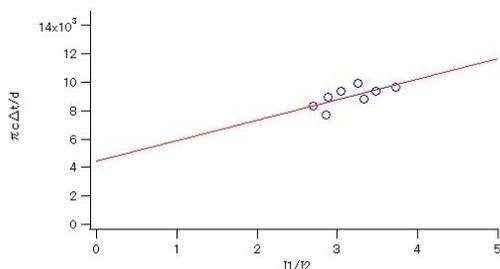


図11 cavity-ring-down 測定結果

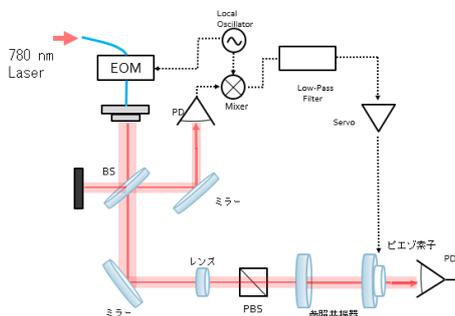


図12 参照共振器特性評価の実験系

3.4 参照共振器の線幅測定

EOM を用いて参照共振器の共振器長を測定した。780 nm DBR レーザーの光に、EOM を用いてサイドバンドを立て、ピエゾを ring-down が起こらないような十分ゆっくりな速度で掃引した参照共振器からの透過スペクトルを観測した。透過スペクトルの線幅は入射させたレーザーと共振器の線幅の和 $\Delta\omega = \omega_c + \omega_L$ で表されるので、スペクトルのピークの幅とサイドバンドの間隔との比、変調周波数から $\Delta\omega$ を求めることができる。さらにレーザーの線幅が分かれば共振器の線幅を求めることができる。EOM に対して $\Omega = 10\text{MHz}$ の位相変調をかけ、その時の参照共振器の透過スペクトルとして図4.11を得た。またこの時の780 nm レーザーの線幅を前述の自己遅延ヘテロダインによって測定した結果、レーザー線幅は $130 \pm 10\text{kHz}$ となった。図13の透過スペクトルを3つのローレンツ関数の和でフィッティングした結果から得られる線幅は $1000 \pm 50\text{kHz}$ となった。以上の結果より参照共振器の線幅を求めると $f_c = \Delta f - f_L = 870 \pm 50\text{kHz}$ となった。

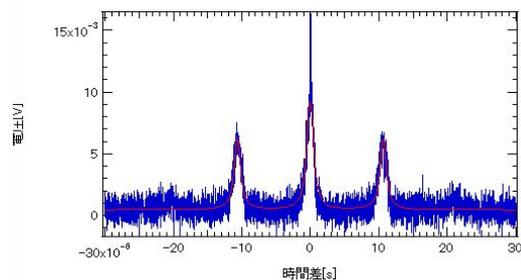


図13 参照共振器の透過スペクトル

3.5 参照共振器のFSR測定

次に、EOM を用いて参照共振器の ν_{FSR} を測定した。位相変調によるサイドバンドが1FSR離れたキャリアのピークと一致す

るように変調周波数 Ω を調整した。この時変調周波数 $\Omega = \nu_{\text{FSR}}$ となる。この方法により、参照共振器の FSR は $\nu_{\text{FSR}} = 3.306 \pm 0.0005 \text{ GHz}$ と求められた。設計値の 3.417 GHz と比して 110 MHz 程離れているが、これは VIT のために使用する光源に対し、EOM を用いて発生させたサイドバンドをプローブ光として使用することで補償することができるため、実験上問題ない値である。

3.6 フィネス比較

EOM によって得られた参照共振器の線幅 $\Delta \nu$ と ν_{FSR} より参照共振器のフィネスを見積もると

$$\mathcal{F} = \frac{\nu_{\text{FSR}}}{\Delta \nu} = 3800$$

となった。ミラーのスペックから見積もった値 \mathcal{F}_1 と cavity ring-down により求めたフィネス \mathcal{F}_2 、また測定した FSR と参照共振器の線幅から求めたフィネス \mathcal{F}_3 の値を次の表 1 にまとめた。

表 1 フィネスの比較

	\mathcal{F}_1	\mathcal{F}_2	\mathcal{F}_3
フィネス	15700	2900 \pm 1300	3800

cavity ring-down 法で求めたフィネス \mathcal{F}_2 と、共振器の FSR と線幅から求めたフィネス \mathcal{F}_3 の値は誤差の範囲で一致したので、測定は有意なものであると言える。計算値と各測定値のフィネスが大きくずれてしまった原因は、参照共振器にサーミスタを取り付ける際に共振器との溝を埋めるためサーミスタに巻いたアルミホイルが共振器内に入ってしまい散乱ロスが増加し

てしまったためだと考えられる。

まとめ・展望

単一光子ディレイスイッチの作製に向けて、実験共振器安定化用の光源開発を行った。今後の展望としては、まず PDH 法によって 780 nm のレーザーに対して参照共振器を安定化させ、その安定性について評価する。その後 780 nm のレーザーを原子の遷移周波数に対し安定化させ、760 nm のレーザーを PDH 法により参照共振器に安定化、さらに実験共振器を PDH 法により 760 nm レーザーに対して安定化させる。そのようにして原子の遷移周波数に安定化させた実験共振器を用いて単一光子ディレイスイッチの完成を目指す。

4 参考文献

- [1]
- [2] L. V. Hau *et al*, Nature **397**, 594 ~ 598 (1999)
- [3] Haruka Tanji-Suzuki *et al*, Science **333**, 1266 (2011)
- [4] Wenlan Chen *et al*, **341**, 768-770 (2013)
- [5] Qian Lin *et al*, OPTICS LETTERS, **37**, 1989-1991 (2012)
- [6] Gor Nikoghosyan *et al*, Phys. Rev. Lett, **105**, 013601 (2010)
- [7] Jerome Poirson *et al*, Optical Society of America, **14** (1997)