

少数光子非線形光学効果観測に向けた光共振器の設計と評価

丹治研究室 田中貴大

1 背景・目的

光子は高速かつ低ロスで遠方まで移動できるという性質を持ち、また光ファイバーなどを用いた通信手段も確立されているので情報伝達に適している。近年盛んに研究が行われている量子情報処理においても、光子が唯一の現実的な通信媒体であるとされている。しかし、光子同士は真空中で相互作用しないため、光子のみでは情報処理に必要な制御が難しい。そこで物質を媒介させて光子間の実効的な相互作用(非線形光学効果)を生むという手段が考えられる。しかしながら、一般に非線形光学効果を得るためには高強度の光が必要となるため、量子情報処理で取り扱う少数光子での観測は困難である。一方、光共振器中に閉じ込めた原子と光子との相互作用を用いることで数光子レベルの微弱光でも非線形効果が観測できることが知られている。このような系を扱う学問として cavity QED と呼ばれるものがある。ここで cavity とは共振器のことであり、複数枚の鏡を組み合わせて、その内部で特定の周波数の電磁場を増強することができるようにしたものである。また QED は量子電気力学 (quantum electro dynamics) の略であり、光子の振る舞いと、光子と物質との相互作用を記述する理論である。つまり cavity QED とは共振器中での光子と物質との相互作用を扱う分野である。共振器中では電場が増強されるため少数光子でも強い電場が生じ、物質と強く相互作用させることができる [1]。本研究では単一光子と単一原子による誘導ラマン断熱遷移(以下単一光子 STIRAP)の観測を最終目標として、cavity QED 実験で用いる高フィネス共振器のパラメータ決定、マウント設計、ミラーの特性評価を行なった。

2 光共振器のパラメータ決定

光共振器を設計する上で決定する必要があるパラメータはミラーの透過率、曲率半径、共振器長である。この3つのうちミラーの透過率に関しては散乱ロスより十分に大きいという要請と、散乱ロスを決めるミラーの研磨の技術的限界により決まり、本研究では反射率 99.997%以上、散乱ロス 10 ppm 以下を要求仕様とした。よって、本節ではまず曲率半径と共振器長の決定とに密接に関わってくる共振器中の原子と光子の相互作用の強さを表すパラメータについて紹介する。続いて曲率半径と共振器長の決定方法と具体的な値について述べる。

Cavity QED 系において重要なパラメータの一つに単一原子協働パラメータ η (single atom cooperativity parameter)がある。これは、

$$\eta \equiv \frac{4g^2}{\kappa\gamma} \quad (1)$$

で定義され、共振器中の原子と光子の相互作用の強さを表す。ただし、 κ は共振器から光子が漏れ出すレート、 γ は原子の自然放出レートである。共振器モードの腹の位置では、 η は最大値を取り、共振器のパラメータを用いて次のように書ける。

$$\eta = \frac{24\mathcal{F}}{\pi k^2 w_0^2} \quad (2)$$

ここで、 \mathcal{F} は共振器のフィネス、 w_0 は共振器モードのウェイストサイズ、 k は原子の遷移周波数に対応する波数である。原子と光子の強結合を実現するには $\eta > 1$ となる必要があるが、そのためには共振器モードのウェイストを小さくし、フィネスを大きくすればよい。またフィネスとは共振の鋭さを表す量であり、共振器のミラーの反射率 R を用いて以下のように書ける。

$$\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (3)$$

本研究で作製する共振器については、単一光子 STIRAP を実現させるために実験共振器を原子の超微細構造の 2 つの基底状態からの遷移に別々に共鳴させることが必要となる。そのため、隣り合う縦モード間の周波数差を $\nu_{FSR} = \frac{c}{2L} = 6.834 \text{ GHz}$ とし、共振器長は 21.93 mm と決定された。曲率半径 R は共振器が共中心配置に近づきすぎて不安定になることを回避しつつ、できるだけウェイストが小さくなるように $R=12 \text{ mm}$ とした。その結果 $w_0 = 28.7 \mu\text{m}$ $\eta = 15$ となった。

3 3D CAD による光共振器の設計

本節では設計した光共振器とその他の部品の概要について説明する。

光共振器は Solidworks 社の 3DCAD ソフトを用いて設計を行なった。四種類の部品を設計したのでそれぞれの役割を説明する。

- ・共振器本体

サイドレンズ 2 枚(Thorlabs A397-B)・ミラー駆動用のピエゾ素子と、それに接着されたミラー 1 枚の設置ができる。共振器に対して垂直な方向からもレーザー光を通せる設計にした。このレーザーは光双極子トラップ用であり、単一光子 STIRAP の過程で原子の位置を共振器の隣接する 2 つのモードの腹の間で移動させるために用いる。

- ・Z 軸方向調整用部品

共振器長の調整用(スライド式)。ミラー駆動用のピエゾ素子と、それに接着されたミラー 1 枚の設置ができる。位置を調整した後、共振器本体に接着する。

- ・ミラー設置のための治具

Z 軸方向調整用部品上でミラーの中心が本体の中心軸と一致するようにミラーを設置するために用いる。

- ・サイドレンズ設置のための部品

共振器の中心を、共振器の軸に対して垂直に光双極子トラップ用のビームが通るようにレンズ(Thorlabs A397-C, $f=11.2$ mm)を配置できる(共振器マウント側面に溝が彫っており、スライドさせることで調整可)。

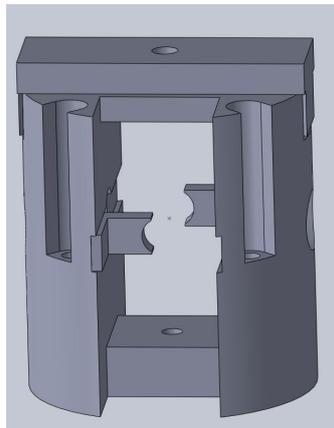


図 1 : 3D CAD で設計した光共振器

4 共振器ミラーの特性評価

本研究で使用する予定の高フィネスミラーの実際の性能を見積もるため、別の研究 [2] によって使用されていたハイフィネスミラー(本研究で用いるものと同等の反射率及び散乱ロス)の特性評価を行なった。フィネスの測定には cavity ring-down measurement という方法を用いた。以下ではその測定原理と結果について述べる。

4.1 Cavity ring-down measurement の原理

以下の説明は [4] に準ずる。

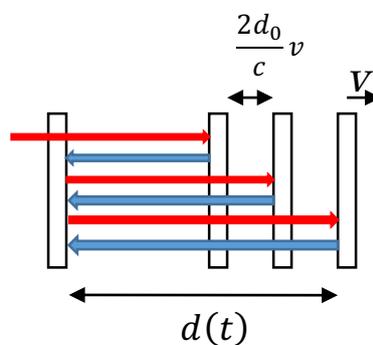


図 2 : 共振器長の掃引の様子

共振器の片方のミラーをピエゾ素子により速度 v で動かしながらレーザー光を入射させ(図 2)、そのときの共振器からの出射光の時間変化を観測する。このとき時刻 t での共振器長 $d(t)$ は以下のように表せる。

$$d(t) = d_0 + vt \quad (4)$$

この時、共振器内を異なる回数往復した透過光同士の干渉の仕方が時間変化するため、透過光強度は振動しながら減衰する。このことを ring-down と呼ぶ。透過光強度は $\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ にしたがって減衰するため、それぞれの強度 I_1 と I_2 には

$$\frac{I_1}{I_2} = \exp\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right) \quad (5)$$

の関係が成り立ち、ミラーの速度 v を適切に調節して $\Delta t \approx \tau$ とすると、

$$\frac{I_1}{I_2} = \exp\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right) \approx \frac{e\Delta t}{\tau} \quad (6)$$

$$\frac{\pi c}{d_0} \Delta t = \omega_{FSR,0} \Delta t \approx \frac{\mathcal{F} I_1}{e I_2} \quad (7)$$

が成り立つ。ミラーの速度 v を変化させ、 $\frac{I_1}{I_2}$ に対する $\frac{\pi c}{d_0} \Delta t$ をプロットした際のグラフの傾きから式(7)を用いてフィネス \mathcal{F} を求めることができる。

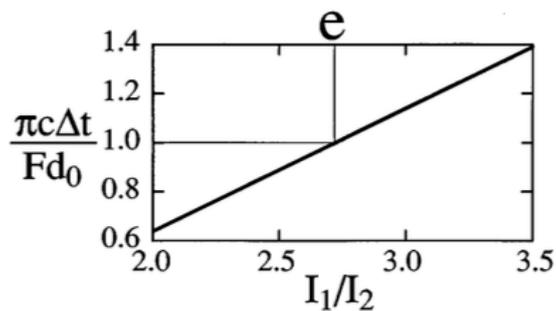
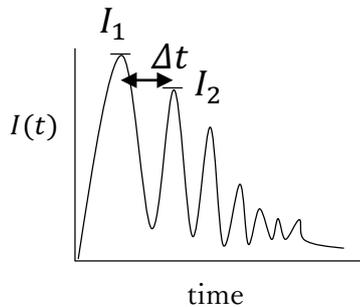


図 3: ring-down スペクトルの概念図

図 4: $\frac{I_1}{I_2}$ に対する $\frac{\pi c}{d_0} \Delta t$ をプロットしたグラフ

4.2 Cavity ring-down によるフィネス測定

本節では cavity ring-down 測定の結果について述べる。

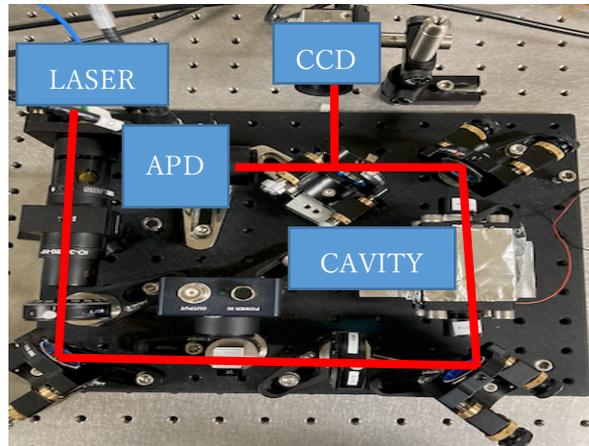


図 5 : Cavity ring-down の光学系

図 5 のような光学系を用いて 2 枚の高反射ミラーで構成された共振器のフィネスを測定した。共振器長を掃引して得られたデータに対し、式(7)で線形近似を行った(図 6)。

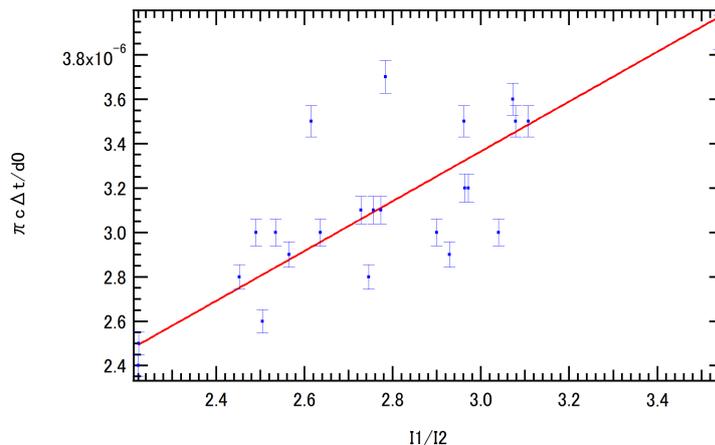


図 6 : cavity ring-down の測定結果

得られた傾きからフィネスを求めた結果 $F = 66000 \pm 1000$ となり、ミラーの仕様から想定される $F = 105000$ よりも低い結果となった。この原因としては、ミラーが汚れてしまったことや、レーザーの線幅が共振器の線幅よりも広いことの影響などが考えられる。

この共振器について、透過とロスの比率を計算する。フィネスの定義より

$$\mathcal{F} \equiv \frac{\sqrt{R}\pi}{T+L} \sim \frac{\pi}{T+L} \leftrightarrow T+L = 47.6 \pm 0.7 \text{ ppm} \quad (8)$$

となる。今回使用したミラーの設計値は $L < 10 \text{ ppm}$ 、 $T + L < 30 \text{ ppm}$ である。よって、

$T \cong 20$ ppm とすればロス $L \cong 27$ ppm であると見積もられる。この結果から全ロスに対する透過ロスの割合は 43% となり、理論上は共振器中の光子の 43% を共振器外へ取り出すことができる結果となった。これは本研究の目的である真空場を利用した単一光子 STIRAP を観測する上で十分である。

5 まとめ・展望

本研究では cavity QED における少数光子非線形光学の観測に向けた実験系の構築を目的として、共振器のパラメータ決定を行い、それを元に 3D CAD を用いて共振器の設計を行った。その後、使用予定のミラーと同等のコーティングの 2 枚の高反射ミラーで構成された共振器について cavity ring-down でフィネスを測定した結果、 $\mathcal{F} = 66000 \pm 1000$ となった。

今後の展望としては、高反射ミラーの散乱ロスの測定、本研究で実際に用いる曲率半径 $R=12$ mm のミラーの特性評価、共振器のセットアップなどを行う予定である。

6 参考文献

- [1] 岩田悠平 「中性原子を用いた cavity QED 実験のための次元光格子の作製」東京大学卒業論文(2015)
- [2] 松山佳生, 「単一光子発生に向けた光共振器と冷却原子の結合系の構築」電気通信大学修士論文(2019)
- [3] Haruka Tanji-Suzuki. *Few-Photon Nonlinearity with an Atomic Ensemble in an Optical Cavity*. PhD thesis, Harvard Univ., 2011.
- [4] J. Poirson, F. Bretenaker, M. Vallet, and A. L. Floch., "Analytical and experimental study of ringing effects in a Fabry-Perot cavity-application to the measurement of high finesses", *J. Opt. Soc. Am. B.* **14**, 2811 (1997).