

経路干渉計法による軌道角運動量もつれ合い状態 検出のためのフィードバック系の検討

2133036 熊野 翔

主任指導教員：宮本 洋子 指導教員：清水 亮介

1. はじめに

本研究の目的は光子を2つの空間モードの重ね合わせ状態で検出するための干渉計において、2経路間の光路長差に発生するドリフトを打ち消すための補償器として位相変調器を用い、軌道角運動量もつれ合い状態の検出系を作製することである。またもつれ合い光子対生成のための励起光の成形についても合わせて検討する。

量子情報科学において、もつれ合いの検出は重要な課題となっている。光子の軌道角運動量もつれ合いの検出には、各光子を異なる軌道角運動量の重ね合わせ状態で検出する必要があり、その手段としてホログラムシフト法と経路干渉計法の二つの方法が挙げられる。前者は、ホログラムの欠陥位置を光軸からシフトすることで重ね合わせ状態をガウスモードに変換し、シングルモードファイバーで抽出して検出する方法であり、原理上余分な成分が混入するという問題点がある。後者は、ホログラムの欠陥位置を光軸と一致させた状態で検出する手法で原理上余分な方位角成分が混入しないが、外部の環境の変化に対し干渉計の光路長差を一定に保つ必要がある。

まず経路干渉計法において、光路長差を一定に保つためのフィードバック系の作製のためのプログラムの検討を行う。また位相変調器に印加する電圧を連続的に変化させた際の干渉計出力の変化を測定し、電圧印加特性を調べる。

次にもつれ合い光子対を発生させるために β -メタホウ酸バリウム(BBO)結晶に入射させる励起光の成形において、成形前のビーム断面の強度分布およびその伝搬距離による変化についてフィッティングを行いビームパラメーターを求める。求めたパラメーターを元に、先行研究のシミュレーションにより最適化

されたパラメーターを達成する光学系の設計、および作製を行う。

2. 軌道角運動量重ね合わせ状態検出方法

光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出用ホログラムは、1次回折光に位相因子 $\exp(im_H\varphi)$ を付加するホログラムであり、中心に欠陥構造を持つ回折格子の構造になっている。

図1に経路干渉計法による軌道角運動量重ね合わせ状態の検出系を示す。図中の B_n は回折効率と適切に置かれた減衰器によって決まる振幅である。 φ は位相変調器によって決まる位相である。量子状態 $|l(n, r)\rangle$ の l は方位角モード指数、 n は回折次数、 r はホログラムの欠陥位置と光軸の中心との距離である。測定対象のビームをホログラムの中心に入射する。 m_H 次のホログラムは n 次回折光に $\exp(im_H n\varphi)$ の位相変調を与える。ホログラムの中心に光軸を合わせて $l = m_0$ の光を入射させた場合、ホログラムで反射後の0次回折光は $l = -m_0$ となり、1次回折光は $l = m_H - m_0$ となる。その後、ホログラムの0次回折光と1次回折光をそれぞれシングルモードファイバー(SMF)でフィルタする。SMFは $l = 0$ 成分のみ通過するため、 $m_H = 1$ のホログラムの場合、0次回折光側のSMFは、入射光の $m_0 = 0$ 成分だけを通過させ、1次回折光側のSMFは、入射光の $m_0 = 1$ 成分だけを通過させる。その2つのビームをビームスプリッターによって重ね合わせる。ビームスプリッター後に検出器を設置することにより、この2つの軌道角運動量重ね合わせ状態を検出することができる。ここで測定対象は波長405 nmの励起光源からパラメトリック下方変換により発生した、波長810 nmの光子対である。ホログラムの中心を光軸からシフトする方法では余分な方位角成分が混入してしまうが、経路干渉計法ではホログラムの中心を光軸に固定するため、余分

な方位角成分の混入を防ぐことができる。

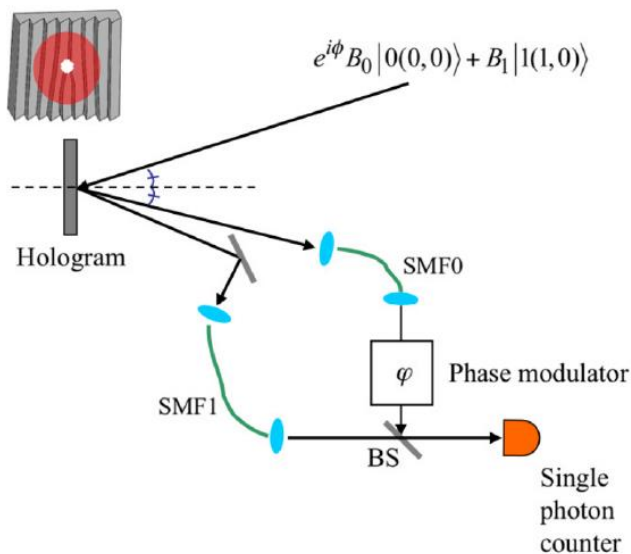


図 1. 経路干渉計法の実験系 [1]

3. 経路干渉計法のフィードバック系

経路干渉計法では外部環境の温度変化等に対し、ファイバー干渉計の光路長差を光子計数中一定に保つ必要がある。よって光路長差を一定に保つためのフィードバックロック系の検討を行う。

3.1. フィードバック系の概要

経路干渉計法のフィードバックは光子計数に用いない方の経路から出射される干渉計出力に応じて位相変調器 Model 915B (Evanescent Optics 社) をアクティブに操作することによって、干渉計の光路長差を一定に保つ。本研究ではシステム開発ソフトウェアである LabVIEW を用いて干渉計出力のモニターを行い、リアルタイムでフィードバック制御を実現することを目指している。図 2 にフィードバック系の概要図を示す。

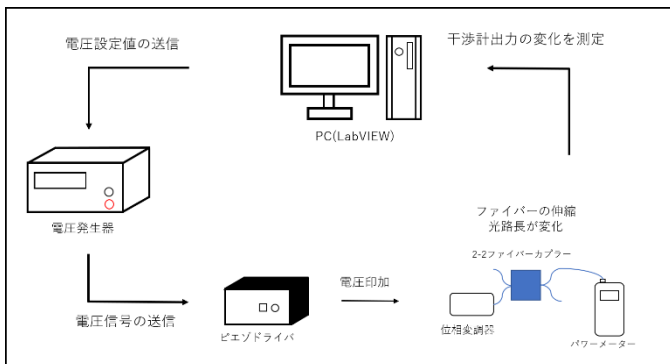


図 2. フィードバック系の概要図

パワーメーターで測定した干渉計出力を LabVIEW 上でモニターし、干渉計出力が一定になるように電圧設定値を電圧発生器に送る。その後電圧発生器から出力される電圧信号によって位相変調器用のドライバを操作し、位相変調器の Piezoelectric Driver に電圧を印加する。本研究で用いる位相変調器は半円状の 2 つの部品と Piezoelectric Element より構成されており、そこに光ファイバーを巻き付けて使用する。Piezoelectric Element に電圧が印加されることによって半円状の部品間の距離が変化し、ファイバーが伸縮して光路長差を一定に保つ。

3.2. 計測器との通信を行うプログラム

実際に構築した干渉計を図 3 に示す。

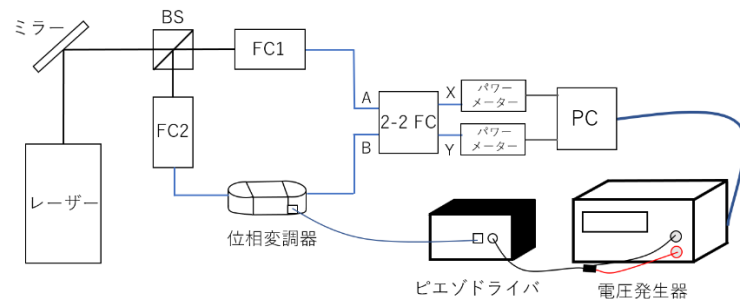


図 3. 干渉計のフィードバック

(BS: ビームスプリッター、FC: ファイバーカプラー、2-2 FC: 2 入力 2 出力ファイバーカプラー)

Piezoelectric Driver の出力側に位相変調器を接続し、入力側に電圧信号を送信するための電圧発生器を接続している。また 2 入力 2 出力ファイバーカプラーの 2 つの出力にそれぞれパワーメーターを接続している。パワーメーターと PC をシリアル通信で、電圧発生器と PC を GPIB 通信で接続した。

パワーメーターとの通信には図 4 のプログラムを用いて行った。

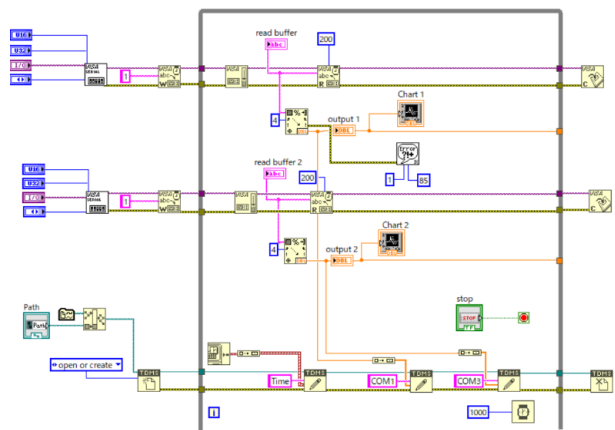


図 4. パワーメーターとの通信を行うプログラム

上記のプログラムにより、パワーメーターを用いて干渉計出力を実時間で取り込むことが出来る。実際に動作を確認し、1時間の連続した測定においてパワーメーターの測定周期(0.3s)に遅れることなく干渉計出力を測定し、ファイルに保存することが出来た。

電圧発生器との通信は図5のプログラムを用いて行った。

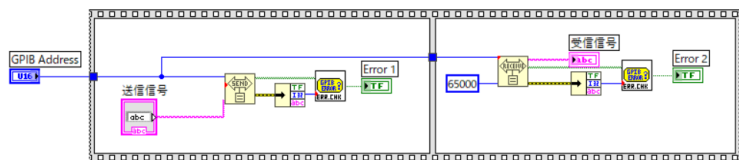


図5.電圧発生器との通信を行うプログラム

図5のプログラムにより、LabVIEWから電圧発生器へ電圧を指定する信号を送信し、想定通りの電圧が出力されていることを確認した。また、出力電圧の設定値を電圧発生器から信号として受信することが出来た。

3.3. 位相変調器の電圧印加特性

フィードバック系を作製するために、位相変調器の電圧印加特性の測定を行う。レーザーは最終的な測定を想定した波長 830.0 nm の半導体レーザーと、その波長 632.8 nm の HeNe レーザーを用いた。2入力2出力ファイバーカプラーもレーザーごとに異なるものを用いた為、表1、2に型番を示す。

表1. 使用機器 半導体レーザー使用時

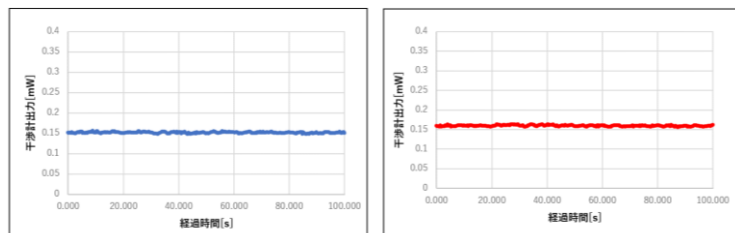
使用機器	メーカー	型番
半導体レーザー	Shanghai Dream Laser	SDL-830-LM-010T
2-2 ファイバーカプラー	Evanscent Optics	Model 905P

表2. 使用機器 HeNe レーザー使用時

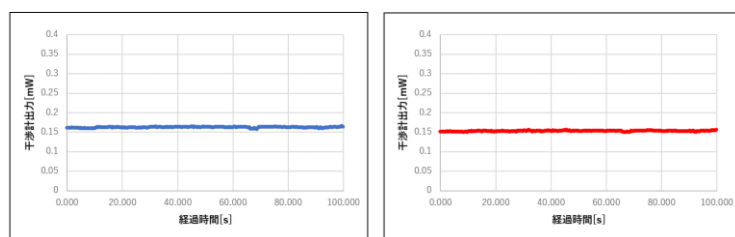
使用機器	メーカー	型番
HeNe レーザー	Thorlabs	HNL100LB
2-2 ファイバーカプラー	Thorlabs	FC632-50B-FC

表1の Model 905P は2つの出力の分岐比が可変式であり、マイクロメーターで調節することが出来るが、表2の FC632-50B-FC は分岐比が 50:50 で固定されており、調節することは出来ない。

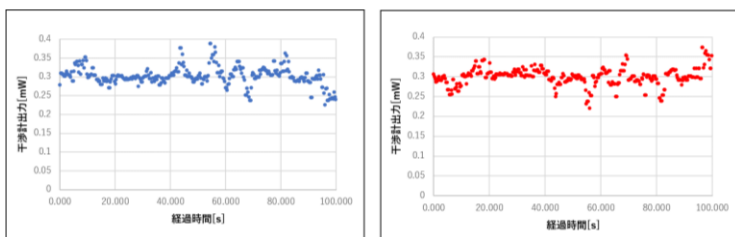
2入力2出力ファイバーカプラーの2つの入力の間が一致した状態で出力を 50:50 に分岐させ、位相変調器に印加する電圧を連続的に変化させた際の干渉計出力を測定した。測定には図3の実験系を用いた。まず、HeNe レーザーを用いて測定を行った際の干渉計出力の変化の様子を図6(a)~(d)にまとめる。電圧は 0.01V/5s の間隔で印加した。



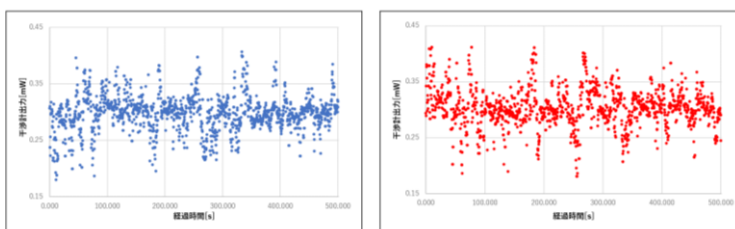
(a)入力 A のみに光を入射した場合の干渉計出力(左図：出力X 右図：出力Y)



(b)入力 B のみに光を入射した場合の干渉計出力(左図：出力X 右図：出力Y)



(c)入力 A,B 両方に光を入射した場合の干渉計出力(左図：出力X 右図：出力Y)



(d)0.01V/5s で電圧を印加していった場合の干渉計出力(左図：出力X 右図：出力Y)

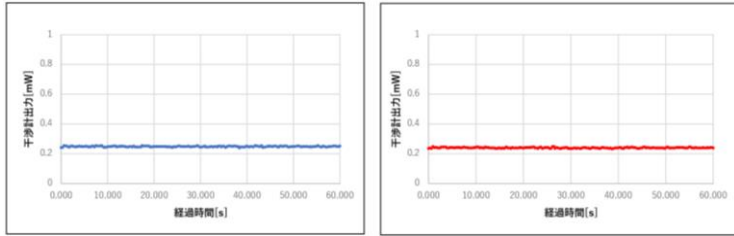
図6.電圧印加特性の測定 (HeNe レーザー使用時)

図6(a)~(c)から分かるように、片方の入力のみに入射した場合に比べて、両方の入力に光を入射した場合にばらつきが大きい出力となっている。標準偏差は 10 倍程度に増加しており、2つの入力の光が干渉を起こしていると考えることが出来る。

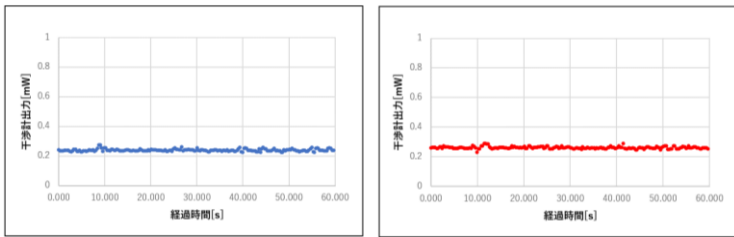
図6(d)から周期的な振る舞いを読み取り、干渉の1周期の変化の間に印加した電圧を計算すると、 $(3.0 \pm 0.5) \times 10^{-1} \text{V} / (2\pi \text{ rad})$ となった。実際の測定には波長 810nm の光子対を用いるため、波長の比を用

いて計算すると電圧印加特性 $(3.845 \pm 0.616) \times 10^{-1} \text{V}/(2\pi \text{ rad})$ となった。

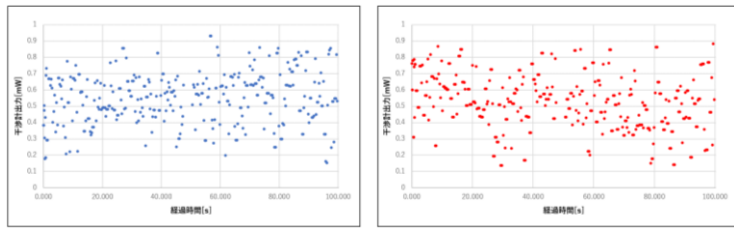
次に、半導体レーザーを用いて測定を行った際の干渉計出力の様子を図7にまとめる。電圧は0.001V/0.5sの間隔で印加していった。



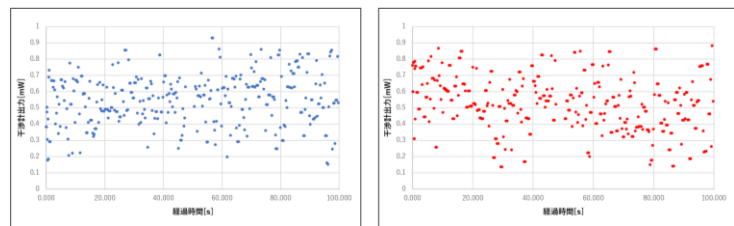
(a)入力 A のみに光を入射した場合の干渉計出力(左図：出力x 右図：出力y)



(b)入力 B のみに光を入射した場合の干渉計出力(左図：出力x 右図：出力y)



(c)入力 A,B 両方に光を入射した場合の干渉計出力(左図：出力x 左図：出力y)



(d)0.001V/0.5sで電圧を印加していった場合の干渉計出力(左図：出力x 左図：出力y)

図7.電圧印加特性の測定(半導体レーザー使用時)

HeNe レーザーの測定と同様に、図7(a)~(c)より片方の入力のみに入射した場合に比べて、両方の入力に入射した場合にばらつきの大きい出力となり、標準偏差は20倍程度に増加した。よって2つの入力の光が干渉を起こしていると考えられる。

しかし電圧を印加していった時に周期的な振る舞いを観察することが出来ず、電圧印加特性を測定することは出来なかった。干渉の様子が安定していな

い原因として、2入力2出力ファイバーカップラーの特性の違い等が考えられる。

4. パラメトリック蛍光光子対の励起光源の成形

本節では、もつれ合い光子対を発生させるためにBBO結晶に入射する励起光の成形を行う。はじめに励起光源のビーム径をフィッティングにより見積もり、伝搬距離に対するビーム径の変化に対してさらにフィッティングを行ってビームパラメータを求める。得られたビームパラメータを元に、先行研究[3]のシミュレーションにより最適化された励起光パラメータを達成する光学系の設計及び構築を行う。

4.1. 強度分布を用いたフィッティング

伝搬距離を100~1000mmまで100mmずつ変化させて、励起用レーザー光の強度分布の撮影を行った。本レーザーはシングルモードファイバーを通して出力される仕様となっており、ここで伝搬距離とは、ファイバーカップラーの対物レンズからCCDカメラの撮像面までの距離のことを指す。撮影した強度分布をMATLABに取り込みフィッティングを行った。まず、以下のガウス関数にフィッティングし、伝搬距離ごとのビーム径を求める。

$$I(x, y) = A_0 + A \exp \left[\frac{-1}{2(1 - \text{cor}^2)} \left\{ \left(\frac{x - x_0}{xwidth} \right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{ywidth} \right)^2 - \frac{2\text{cor}(x - x_0)(y - y_0)}{xwidth \cdot ywidth} \right\} \right] \quad (1)$$

ここで A_0, A はそれぞれ背景強度と背景を基準とした最大強度、 $xwidth$ と $ywidth$ はそれぞれ x, y 方向の強度分布の径、 x_0, y_0 はビームの中心座標、 cor は x, y 方向の分布の相関を示している。

強度分布の径からビーム径パラメータ $w_{x(y)}$ を求め、伝搬距離に対する $w_{x(y)}$ の変化からビームウェスト径と位置をフィッティングにより見積もる。フィッティングに用いる式は以下の式である。

$$w_{x(y)}(z) = \sqrt{w_0^2 + \frac{1}{w_0^2} \left\{ \frac{\lambda}{\pi} (z - z_0) \right\}^2} \quad (2)$$

ここで w_0 はビームウェスト径、 z_0 はビームウェスト位置である。

4.2. フィッティング結果の確認

撮影した強度分布、およびフィッティングより得られた関数との残差の例を図8に示す。

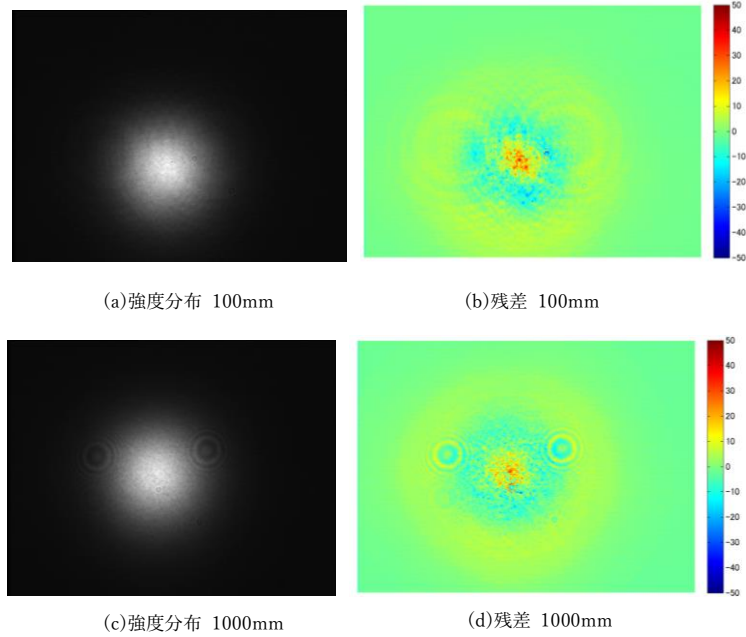


図8.強度分布と残差の確認

残差は中心付近で正の値、その付近で負の値、強度分布の裾付近で再び正の値を取っていることが分かる。残差の分布の偏りから、励起光の強度分布にガウスビームとのズレが見られることを確認できた。

伝搬距離ごとのビーム径を(2)式にフィッティングした結果を図9と図10、また表3に示す。

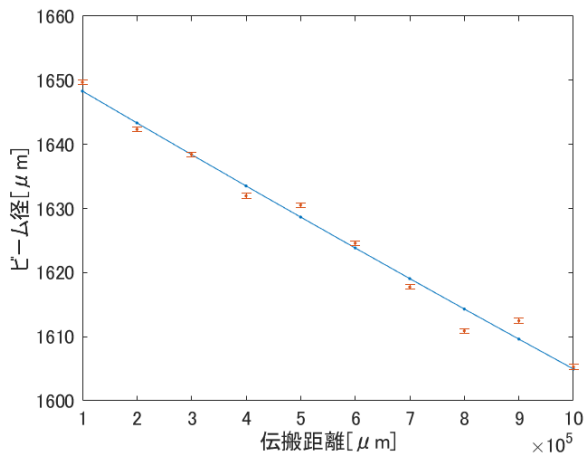


図9.ビーム径 $w_x(z)$ のフィッティング結果

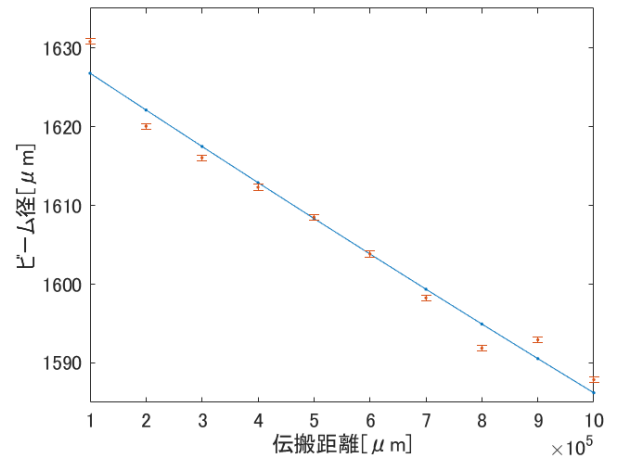


図10.ビーム径 $w_y(z)$ のフィッティング結果

表3.ビーム径のフィッティング結果

	ウェスト径 w_0 [μm]	ウェスト位置 z_0 [μm]
w_x	$(1.39 \pm 0.02) \times 10^{-3}$	9.66 ± 0.19
w_y	$(1.40 \pm 0.02) \times 10^{-3}$	9.09 ± 0.25

4.3 光学系を用いたビーム径の調節

先行研究[2]のシミュレーションより最適化されたビーム径 $800 \mu\text{m}$ を達成するための光学系の設計および構築を行う。前節で求めたビームパラメータより、レンズを2枚使用してビーム径を調節する系を設計し、構築した。計算に用いたレンズ前後の曲率半径 $R_{1,2}$ の式、ウェスト径 w_0 、ウェスト位置 z_0 の式を以下に示す。

$$R_1 = z \left\{ 1 + \left(\frac{z_R}{z} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

$$z = z_R \sqrt{\left(\frac{w(z)}{w_0} \right)^2 - 1} \quad (5)$$

$$w_0 = \sqrt{\frac{w(z)^2}{1 + \left(\frac{\pi w(z)^2}{\lambda R_2} \right)^2}} \quad (6)$$

設計した光学系を図11に、上式を用いて計算した2枚目のレンズを通過した後のウェスト径 w_0 、ウェスト位置 z_0 を表4に示す。

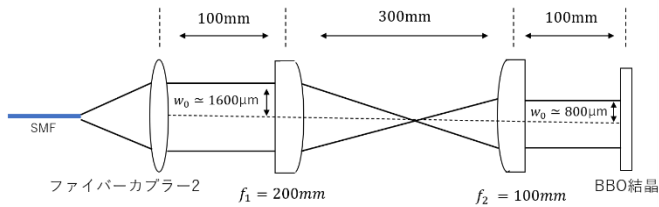


図 11. 凸レンズ 2 枚を用いた光学系

表 4. レンズ通過後のパラメーター

	ウェスト径 w_0 [μm]	ウェスト位置 z_0 [μm]
w_x	$(8.30 \pm 0.01) \times 10^{-3}$	$(1.00 \pm 0.02) \times 10^{-1}$
w_y	$(8.29 \pm 0.01) \times 10^{-3}$	$(1.00 \pm 0.03) \times 10^{-1}$

設計した光学系を作製し、ビーム径を調節する前後のビーム径をフィッティングにより求めた。調節前

表 5. 調節前後のビーム径

	ウェスト径 w_0 [μm]	ウェスト位置 z_0 [μm]
x方向	$(1.650 \pm 0.004) \times 10^{-3}$	$(8.468 \pm 0.003) \times 10^{-3}$
y方向	$(1.631 \pm 0.004) \times 10^{-3}$	$(8.307 \pm 0.003) \times 10^{-3}$

のビーム径はファイバーカプラーの対物レンズから 100mm 伝搬した点で撮影した強度分布、調節後のビーム径はレンズ 2 から 100mm 伝搬した点で撮影した強度分布より求めた。光学系で調節する前後のビーム径を表 5 に示す。

設計値との誤差についてはレンズ挿入位置の前後のずれや、励起光のガウスビームとのズレによるものが考えられる。目標のビーム径は 800 μm であり、調節後のビーム径の目標の値との誤差は約 5% となった。ビーム径は結晶に内接する円の半径 2500 μm の 1/3 以内を目安にビーム径を設定しており、833 μm 以内に収めることが求められる。よって光学系の再検討により、目標のビーム径に近づけることが求められる。

5. まとめ

本研究では、光子の軌道角運動量もつれ合い状態検出のためのフィードバック系の検討、およびパラメトリック蛍光の軌道角運動量状態の発生のための励起光源の成形を行った。

フィードバック系の検討に関しては、使用する測定機器との通信方法を確認し、データの送受信を行うプログラムを作成した。また位相変調器に電圧を

印加していった時の干渉計出力より、位相変調器の電圧印加特性を推定した。しかし、用いる素子によって観察する干渉の様子が変化することを確認した。

励起光の成形に関しては、もつれ合い光子を発生させる励起光源の成形前のビームパラメーターを求めた。そこから目標のビーム径を達成する光学系の構築を行った。

今後の課題として、経路干渉計法の測定を行う光学系を設計し、軌道角運動量もつれ合い状態の検出を目指す。

参考文献

- [1]Yoko Miyamoto, Daisuke Kawase, Mitsuo Takeda, Keiji Sasaki and Shigeki Takeuchi, J.Opt. **13** (2011) 064027.
- [2]川瀬大輔, 「光子の軌道角運動量もつれ合いの生成と制御に関する研究」, 北海道大学博士論文, (2009)
- [3]渡辺大貴, 「軌道角運動量もつれ合い光子源及び検出系の設計と作製」, 電気通信大学修士論文, (2021)