

シングルモードファイバーによる方位角モードのフィルター効果の 定量評価

電気通信大学 宮本研究室 河原田陸渡

1 概要

本研究の目的は、方位角モード指数 $m = 1$ のドーナツビームに対するシングルモードファイバー(SMF)のフィルター効果を定量的に明らかにすることである。 $m = 0, 1$ からなる軌道角運動量重ね合わせ状態の光子対の検出には、SMFを伝搬する光のモードが方位角モード指数0のもののみであることによるモードフィルターの効果を用いる。方位角モード指数が $m = 0, \pm 1$ のビームをそれぞれシングルモードファイバー(SMF)に入射し、入射前後のパワー比から、SMFによるモードフィルターの効果を定量的に評価した。

2 原理

2.1 ドーナツビーム

ドーナツビームは、光軸を対称軸とした円筒座標系において以下の式で表される。

$$w(\rho, \phi, z) = u_m(\rho, z) \exp(im\phi) \cdots (1)$$

この式のうち、 $\exp(im\phi)$ は方位角方向に線形に増減する回転位相因子(図1)であり、 m は方位角モード指数である。このようなモードに光子が一つ存在する状態を光子の軌道角運動量状態と呼ぶ。

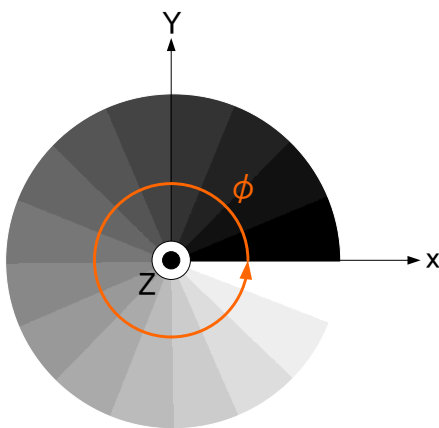


図1 ドーナツビームの位相分布
(黒を0、白を $2m\pi$ とした)

2.3 方位角モード指数のシフト

(1)式の位相分布は光軸周りを一周すると位相が $2m\pi$ 増加する構造をもち、中心に位相が定義できない特異点をもつ。この構造を特徴づける整数 m をトポロジカルチャージと呼ぶ。格子欠陥が1つ存在し、1次回折光に対してトポロジカルチャージ m_H の回転位相因子を付加する反射型ホログラムを考える。ホログラムへ位相因子が $\exp(im_b\phi)$ である光が入射したとする。ホログラムに入射した光は、反射によって伝搬軸を基準とした位相の増減方向が反転(m_b が $-m_b$ になる)してから、 n 次回折光($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)として出射される。 n 次回折光の方位角方向のモード指数 m_{an} は次式で表される(図2)。

$$m_{an} = -m_b + nm_H \cdots (2)$$

例えば、ガウスビーム($m_b = 0$)の反射型ホログラムによる1次回折光の方位各方向のモード指数は m_H である。このようにホログラムによって方位角モード指数がずれることを「方位角モード指数のシフト」と呼ぶ。

2.4 方位角モード指数のフィルター効果

シングルモードファイバー(SMF)などの構造を用いて、特定の方位角モード指数以外のものがその構造を通過できないようにする(フィルターする)効果を方位角モード指数のフィルター効果と呼ぶこととする。今回のシングルモードファイバー(SMF)は、 $m = 0$ のガウスビームのみが伝搬する性質を持つファイバーである。2.3節で説明したホログラムの1次回折光がSMFを伝搬する条件は以下の通りである。

$$m_{a1} = 0 = -m_b + m_H \Leftrightarrow m_b = m_H \cdots (3)$$

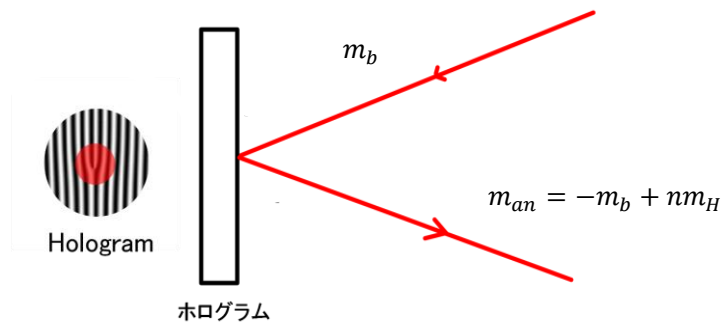


図2 欠陥格子が存在するホログラムによる方位角モード指数のシフト

3 作製した光学系におけるフィルター効果の評価

3.1 作製した光学系と測定方法

図 3 は SMF を通過する光パワーを測定する光学系である。実験で使用した反射型ブレイズ状位相ホログラムは、1 枚の基板に 4 種類($m_H = 0, \pm 1, 2$)存在する。

実施内容としては、各ホログラムにガウスビームを入射し、回転位相因子が付与された 1 次回折光について、ファイバーカップラ(FC)に入射する前のパワーと SMF(Oz optics 社, PMJ-3U3U-5/125-3-0.5-1)通過後のパワーを測定し、その比をとることで SMF によるフィルター効果を検証した。具体的には、ガウスビームに対して、ホログラムで 1 次回折光に $m_H = 0, \pm 1$ の回転位相因子を付与し、1 次回折光の FC に入射する前のパワー I_H (図 3 の $f = 200\text{mm}$ の平凸レンズと FC との間で測定した)と、その回折光を FC で SMF に結合し、伝搬させた後のパワー I_F を測定した。パワーの測定では、約 1 分間に 12 回測定値を記録して、その平均と標準偏差を求めた。

測定結果について、各ホログラムにおける I_H, I_F の測定値に対し、入射効率(I_F/I_H)を求めた。さらに、各ホログラムにおける入射効率から、ガウスビーム($m_H = 0$)の入射効率に対するドーナツビーム($m_H \neq 0$)の入射効率の比を求めることで、SMF による方位角モード指数のフィルター効果を評価した。

3.2 測定結果と考察

表 1 はガウスビームに対するドーナツビームの入射効率の比である。表 1 と後の表 2 中の「T1870101-03」、「T1870101-04」は使用したパッチファイバーのシリアルナンバーである。この表 1 によれば、今回使用した光学系では先行研究の光学系(図 4) [1]と比べて約 10^4 倍効果が弱いことが分かった。先行研究の光学系と今回作成した光学系を見比べたとき、先行研究での光学系では SMF0 を出射した光は L0 で Hologram 0 に集光された後、凸レンズによって Hologram1 に等倍結像され、L0 と同じ焦点距離の L1 によってコリメートされて SMF1 に至ることが分かる。2 枚のホログラムの間の凸レンズに対してビームパラメーターが対称に変化するよう設計されており、これにより光は SMF 0 出射時とほぼ同じ動径方向の分布を持って SMF1 に入射する。本研究の光学系はこのような対称な設計になっていないため、ガウスビームの入射効率が低くなっていると考えられる。

表 2 は、求めた測定値に対する標準偏差の大きさ(変動係数)を示している。 I_H と I_F の変動係数を比較すると I_F の方の変動係数が大きいことが分かる。 I_F の変動係数は SMF のコア径($5\mu\text{m}$)に対して平均約 $0.03\mu\text{m}$ 外れると生じる大きさである(入射する光の強度分布が一樣な場合)。考えられる原因としては、光学系の固定が緩い、光学台に対する FC の位置が高い、などがあり、今後はその原因を調査する予定である。

4 まとめ

SMF による方位角モード指数のフィルター効果を実際に作成した光学系で定量的に評価した。1 次回折光が $m = 0$ の時の入射効率と $m = \pm 1$ の時の入射効率とを比較したとき、本実験では 2.9%~4.6% 程度までの光パワーの減衰が確認された。一方先行研究 [1]では 0.0005%程度まで減衰できていることが分かっている。このことと先行研究と本論での光学系の違いから、本研究では入射するビームの動径方向の分布が適に設定されていないと予想した。また、 I_H と I_F とでは平均値に対する変動係数が I_F の方が高く、光学系の固定や光学台上の装置の位置が高すぎる等の要因を考えた。今後、入射効率の比や変動係数が大きくなる要因を特定して改善を図り、軌道角運動量重ね合わせ状態の検出系の完成を目指す。

参考文献

[1] 青木俊介「光子の軌道角運動量重ね合わせ状態検出における余計な方位角成分の影響」電気通信大学修士論文(2009)

表 2 ガウスビームに対する SMF へのドーナツビームの入射効率の比

m_H	入射効率の比		
	T1870101-03	T1870101-04	先行研究
-1	4.0%	4.3%	0.0005%
1	4.6%	2.9%	

表 1 各方位角モード指数における測定値の変動係数

m_H	-1	0	1	シリアルナンバー
I_H	0.00094	0.0013	0.0018	
I_F	0.028	0.018	0.076	T1870101-03
	0.089	0.015	0.068	T1870101-04

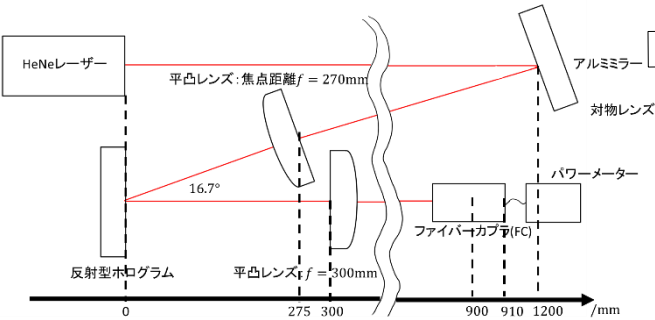


図 3 今回作成したフィルター効果を評価するための光学系

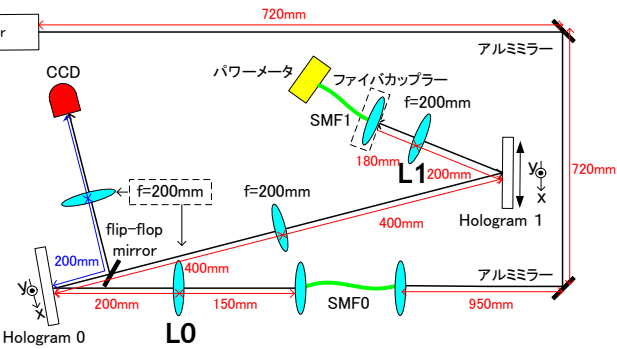


図 4 先行研究[1]における光学系