

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04636

研究課題名（和文）体積ホログラムを用いたモード多重光源の研究開発

研究課題名（英文）Mode division multiplexing light source using volume hologram

研究代表者

品田 聡（Shinada, Satoshi）

国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワーク研究所フォトニックICT研究センター・研究マネージャー

研究者番号：00392720

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、半導体レーザアレイと角度多重体積ホログラムを組み合わせた簡素な空間モード多重光源を提案する。複数のレーザ光を単一レンズに通し体積ホログラムに集光させることにより、任意の空間モードに一括変換し、多重化が可能である。記録過程（ホログラム生成）と再生過程（モード多重光生成）に異なる波長を用いるため、異波長記録再生法を適用し、赤外用の体積ホログラムを生成した。これを用いて、面発光レーザアレイの3出力を一括モード変換し、3種のLPモード多重光の生成を実証した。本モード多重光源を用いた数モードファイバ増幅器のモード間利得差の低減や、光空間無線へのモード多重伝送の適用等を提案している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単一モードファイバ通信の伝送容量限界を打破すべく、空間分割多重（SDM）伝送の研究が発展してきている。空間モードを多重化し伝送容量の拡大を図るモード多重伝送では、空間モードを制御し、効率的に多重または分離する合分波器の開発が実現の鍵である。これまで様々な合分波器が報告されているが、本研究では、小型で拡張性の高い体積ホログラムの合分波器に着目し、半導体レーザアレイと直接組み合わせることによるコンパクトなモード多重光源を提案し実証した。本モード多重光源は、モード多重伝送を支える要素技術になり、また光空間無線への適用による大容量化につながるなど、今後の光通信技術の発展に貢献する技術になると考える。

研究成果の概要（英文）：We propose a novel mode-multiplexed light source using angularly-multiplexed volume holograms. Mode division multiplexing (MDM) beams can be generated from a simple transmitter that consists of a laser array, single lens, and volume holograms. Hologram media has a low recording sensitivity for the infrared light, however a dual wavelength method using different wavelengths for recording and reading holograms can realize the volume holograms for the communication band. In this work, we formed the volume holograms for three spatial mode multiplexing using a compact Michelson interferometer type recording setup, and demonstrated simultaneous generations of three modes using a fiber array or a vertical cavity surface emitting laser array with the volume holograms. The simple and low-cost mode-multiplexed light source using the volume holograms has the potential to broaden the application of MDM.

研究分野：光ファイバ通信

キーワード：体積ホログラム 半導体レーザアレイ 面発光レーザ モード多重 空間分割多重

1. 研究開始当初の背景

光ファイバ通信において、従来の単一モードファイバを用いた伝送容量は、入力パワーの制限から 100 Tbit/s 程度に限界が見えており、これを打破すべく、空間分割多重 (SDM: Spatial Division Multiplexing) 技術を用いて、光ファイバ 1 本当たりの伝送容量を拡大する研究が盛んに進められている。空間的に導波路を多重化するマルチコアファイバ伝送技術や、空間的な光分布 (空間モード) の違いを利用して信号を多重化するモード分割多重 (MDM: Mode Division Multiplexing) 伝送技術を利用し、光ファイバ (マルチモード・マルチコアファイバ) 1 本当たり 10 Pbit/s を超える伝送容量のポテンシャルが示された [1, 2]。しかしながら、その実用化には、ファイバの延伸や製造・導入コストの低減のみならず、SDM に対応した送受信器、交換器、増幅器、コネクタなど、周辺技術の開発も課題として残されている。

数モードファイバ (FMF: Few Mode Fiber) を伝送路とする MDM 伝送システムにおいて、モード多重信号を一括して増幅する数モードエルビウム添加ファイバ増幅器 (FM-EDFA: Few Mode Erbium Doped Fiber Amplifier) が注目されているが、モード間の利得差 (DMG: Dispersion Mode Gain) の低減が課題である [3]。また、MDM ネットワークの中継ノードにおいては、モードに依存した伝搬損失や変換効率を補償するため、動的にモード毎の利得を調整する等化機能が必要不可欠であるが、FM-EDFA にそうした機能を簡易に実装する方法は未確立である。

2. 研究の目的

FM-EDFA において課題となる DMG を低減するため、励起光にモード多重された光を用いることを提案する。励起光の各モード出力を任意に調整することにより、DMG を低減するだけでなく、中継ノードにおいては、モード間の出力差を等化する機能を付与することが可能となる。本研究では、通信波長帯 (赤外領域) において、ホログラム素子と半導体レーザアレイを組み合わせた簡素な構成により、複数のモードを同時生成可能なコンパクトなモード多重光源を開発する。各レーザ出力を FMF の伝搬モードに変換することにより、FM-EDFA における DMG を動的に調整することが可能となる。レーザアレイからの 3 モード以上の任意 LP モードの一括生成、およびモード多重信号の FMF への低損失な結合を本研究の目的とする。

3. 研究の方法

図 1 に本研究で提案する半導体レーザアレイと角度多重体積ホログラム [4] を用いたモード多重光源の概要を示す。角度多重体積ホログラムは、入射光をその入射角に応じて任意のモードに変換し、任意の方向に回折させることができる。レーザアレイからの各射出光は、コリメータレンズを通ることにより、それぞれ異なる入射角で体積ホログラムに入射される。この入射角に応じて各入射光は任意のモードに変換され、最適な角度設計により全てのモードを同一方向に回折させることができる。これが提案するモード多重光源の原理である。

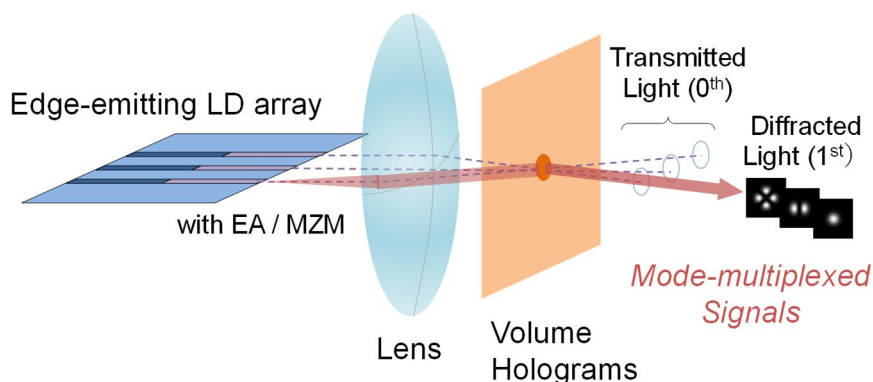


図 1 提案する半導体レーザアレイと角度多重体積ホログラムを用いたモード多重光源の構成

角度多重体積ホログラムは、事前の記録過程における記録光と参照光の干渉により生成される。各レーザ出力 (露光条件) の最適化のみならず、再生過程 (モード多重光生成) におけるレーザアレイからの各出力の入射角、出力させたい方向の回折角に合わせて、記録光および参照光の入射角を設計する必要がある。さらに、記録過程と再生過程に用いるレーザの波長の違いを補償するため、異波長再生法を適用して各入射角を設計する。本研究では、角度多重体積ホログラムの設計、角度多重体積ホログラムの記録系構築、角度多重体積ホログラムの生成・評価、半導体レーザアレイと角度多重体積ホログラムを組み合わせたモード多重光源の評価、を主な研究方法として順に進めた。

4. 研究成果

(1) 異波長記録再生法を適用した角度多重体積ホログラムの設計手法確立

一般的なホログラム材料は、赤外領域における記録感度が低いため、本研究では、記録過程と再生過程において異なる波長のレーザを用いる異波長記録再生法を適用した。記録光と参照光の入射角 θ_w, θ_{ref} 、および再生光の入射角 θ_r と回折角 θ_{diff} としたとき、以下のブラッグ条件を満たすときに強い回折が得られる[5]。

$$\frac{\lambda_w/n_w}{\sin((\theta_{w,i} - \theta_{ref,i})/2)} = \frac{\lambda_r/n_r}{\sin((\theta_{r,i} - \theta_{diff})/2)}$$

ここで、 λ_w と λ_r は記録光と再生光の波長（本研究では、それぞれ532 nmと980 nm/1050 nm）、 n_w と n_r はホログラム媒質の屈折率、 i は角度多重の序数を示している。本研究では、複数の光源から異なる角度で入射した再生光を一方に回折させることにより、モード多重光源を実現するため、記録時の正確な入射角設計およびその設定が必要となる。また、ホログラム媒質の界面における屈折も考慮した設計を新たに行っており、設計精度の向上を図った。表1にファイバアレイ出力用（波長980 nm、127 μ m間隔）に設計した各入射角、表2に面発光レーザ（VCSEL）アレイ出力用（波長1050nm、250 μ m間隔）に設計した各入射角を示す。（グレー部は媒質内での入射角）

Fiber Array ($\lambda_r = 980$ nm)	Reading Process				Recording Process			
	Position	Readout		Writing		Reference		
	x_i	$\theta'_{r,i}$	$\theta_{r,i}$	$\theta_{w,i}$	$\theta'_{w,i}$	$\theta_{ref,i}$	$\theta'_{ref,i}$	
$i=1$	LP ₀₁	508 μ m	5.28°	2.35°	0.56°	1.30°	1.79°	4.16°
$i=2$	LP _{11a}	635 μ m	6.59°	2.94°	0.70°	1.62°	2.24°	5.20°
$i=3$	LP _{11b}	762 μ m	7.89°	3.51°	0.84°	1.94°	2.68°	6.22°

表1 ファイバアレイ出力用の入射角設計

VCSEL Array ($\lambda_r = 1050$ nm)	Reading Process				Recording Process			
	Position	Readout		Writing		Reference		
	x_i	$\theta'_{r,i}$	$\theta_{r,i}$	$\theta_{w,i}$	$\theta'_{w,i}$	$\theta_{ref,i}$	$\theta'_{ref,i}$	
$i=1$	LP ₀₁	1000 μ m	7.13°	3.19°	0.82°	1.90°	2.37°	5.51°
$i=2$	LP ₁₁	1250 μ m	8.88°	3.97°	1.02°	2.36°	2.95°	6.86°
$i=3$	LP ₂₁	1500 μ m	10.6°	4.74°	1.22°	2.82°	3.52°	8.20°

表2 VCSELアレイ出力用の入射角設計

(2) 角度多重体積ホログラム生成用小型記録系の構築

記録光および参照光の入射角設計を正確に安定に設定するため、記録系の小型化、電動化を図った。記録光の入射角は、モード生成用の空間光変調器（LCOS）に表示するCGH[6]による回折パターンにより調整しており、また参照光の入射角は、電動ミラーにより調整した（図2）。本記録系を用いて、3モードの角度多重体積ホログラムを生成した。ホログラム媒質には、厚さ5 mmの鉄添加ニオブ酸リチウム（Fe-LiNbO₃（Fe-LN））結晶を用いた。

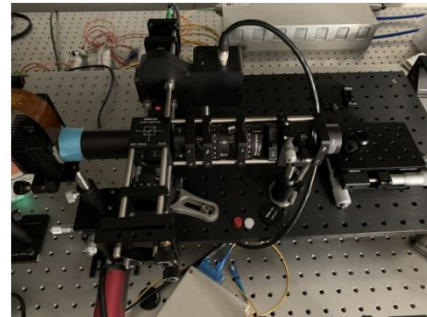
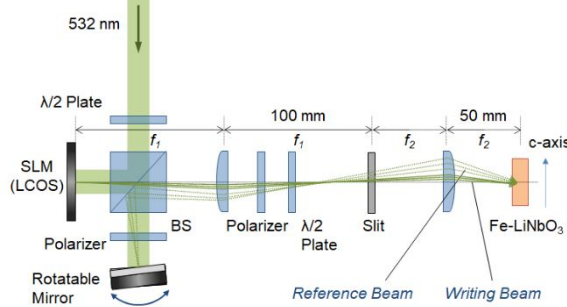


図2 角度多重体積ホログラム生成用の小型記録系

(3) ファイバアレイ出力を用いた3モード多重光源の実証

FM-EDFAの励起光源（980 nm）を想定し、ファイバアレイ（127 μ m間隔、8本のうち3本を使用）出力にコリメートレンズを通して角度差を与え、角度多重体積ホログラム（Fe-LN媒質）に入射させ、生成された3モード多重光（LP₀₁, LP_{11a}, LP_{11b}）の遠視野像をカメラで取得した。また、これらの数モードファイバ（FMF）との結合損失を評価した（図3）。

図4は、体積ホログラムから2 mの位置に固定したカメラで取得した各モードの遠視野像である。各モードの中心は、 ± 3 mmの範囲に収まっており、角度差

としては、 0.1° 以下に収まっているといえる。さらに、コリメートレンズを介して固定のFMFに結合した際の各モードの結合損失は、それぞれ-0.95 dB, -1.32 dB, -3.11 dBであった。記録時のモード径や入射角設計の最適化により、さらなる低損失化の余地は残るが、全モード揃った回折角を得ることができており、正確な入射角の記録が実現できているといえる。

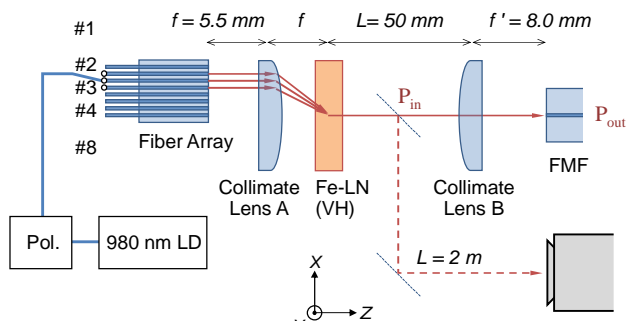


図3 ファイバアレイ出力を用いた3モード多重光源の評価系

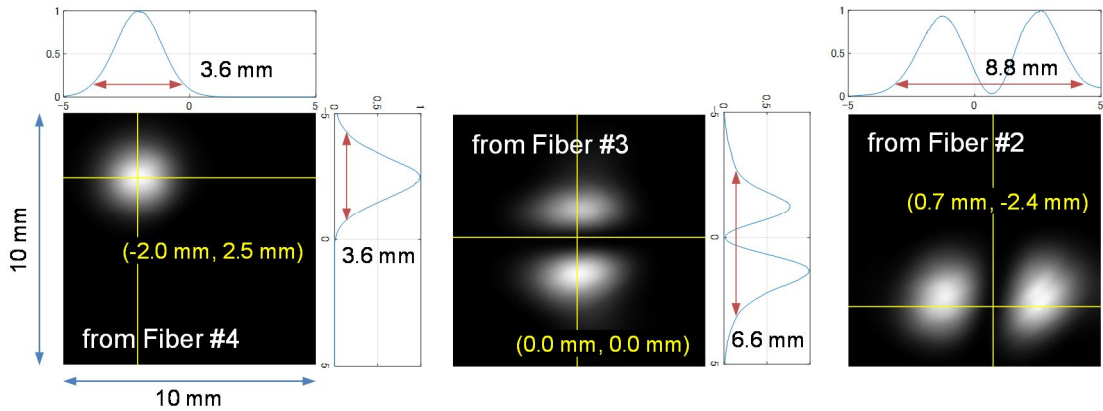


図4 体積ホログラムにより回折された3モード多重光 (LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b}) の遠視野像

(4) VCSEL アレイ出力を用いた3モード多重光源の実証

簡易でコンパクトなモード多重光源を実現するため、VCSEL アレイと体積ホログラムを組み合わせたモード多重光源を検討した。同一基板上的3つのVCSEL (波長 1050 nm) を用いて、それぞれの出力にレンズを通して角度差を与え、体積ホログラムに入射させる (図5)。実証実験では、レンズやホログラムの保持、調整にスペースを使って構成しているが、焦点距離の短いレンズや比較的薄く効率の高いポリマーをホログラム媒質として用いれば、小型のパッケージングも可能と考える。

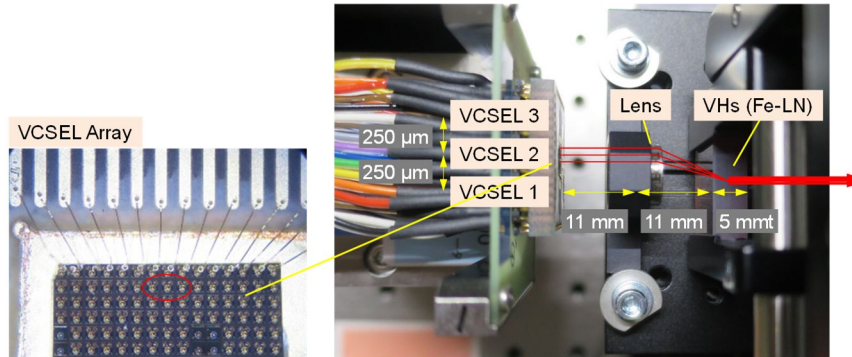


図5 VCSEL アレイと体積ホログラムを用いたモード多重光源の構成

図6(a)は、体積ホログラムから1mの位置に固定したカメラで取得した各モード像である。各VCSELのON/OFFにより、任意のモードを選択して出力できることが確認される。VCSEL アレイとマイクロレンズアレイ、さらに体積ホログラムアレイを組み合わせたコンパクトなモード多重光源を提案しており、光空間無線におけるモード多重伝送等への適用を検討している。

図6(b)は、 3×3 のVCSELアレイを一つのマイクロレンズアレイと体積ホログラムで受け、任意の方向(固定)へ9モード多重信号を伝送するイメージである。受信側では、同じ体積ホログラムと単一レンズ、 3×3 の2次元光検出器を用意し、モード分離後に各信号を検出する。 3×3 VCSELアレイを一つのユニットとし、大きなユニットアレイを構成し(図は 2×2 のユニットアレイとして表示)ユニット毎に回折方向を変えることにより、通信エリアの拡大が可能であり、任意のユニットを選択することによるビームフォーミングも実現できる。

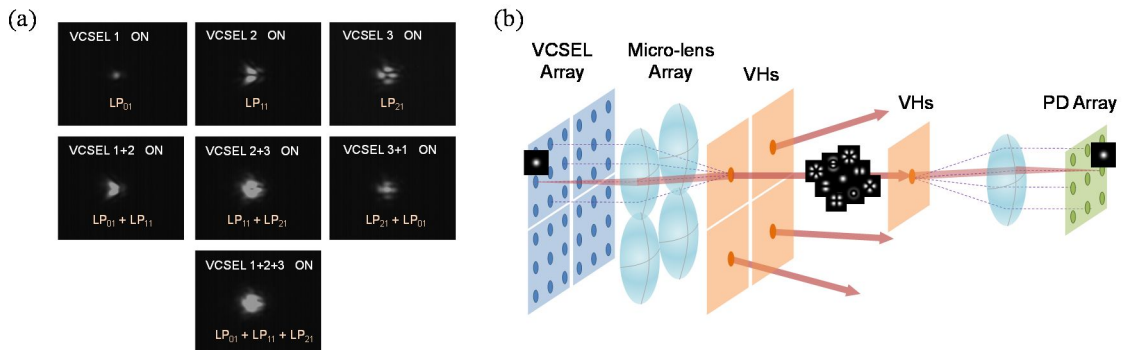


図6(a) VCSEL アレイと体積ホログラムによる3モード多重光 (LP_{01} , LP_{11} , LP_{21}) の生成, (b) 光空間無線へのVCSELアレイモード多重光源の適用提案

(5) 体積ホログラムの回折効率の高効率化の検討

前述のように，ホログラム媒質の赤外領域における感度は低く，異波長再生法により赤外用の体積ホログラムを生成できるものの，その回折効率は，可視領域と比較すると大幅に低下することが分かった．また入手性の問題から，今回はLN 媒質を用いて，モード多重光源の実証を行ったが，一般にLN 媒質の回折効率は，ポリマー媒質のそれよりも低いため，最後にポリマー媒質を用いた体積ホログラムの評価から，回折効率の高効率化に向けた検討を行った．

表3は，ポリマー媒質を用いた体積ホログラムを，波長532nmと1550nmで再生した際の回折効率を示している．体積ホログラムの多重度（記録モード数）の拡張性を評価するため，記録モード数を変えて回折効率を評価している．

Number of Recorded Mode	Diffraction Efficiency				
	LP ₀₁	LP _{11a}	LP _{11b}	LP _{21a}	LP _{21b}
1 mode	75.8 %				
3 modes	47.7 %	58.6 %	64.7 %		
5 modes	55.0 %	64.7 %	64.4 %	67.3 %	69.0 %

Number of Recorded Mode	Diffraction Efficiency				
	LP ₀₁	LP _{11a}	LP _{11b}	LP _{21a}	LP _{21b}
1 mode	14.8 %				
3 modes	20.0 %	15.1 %	12.0 %		
5 modes	17.8 %	12.6 %	13.8 %	10.7 %	8.7 %

表3 回折効率の記録モード数の依存性（左：532nm再生時，右：1550nm再生時）

体積ホログラムの記録には，可視光（532nm）を用いているが，再生に可視光を用いた場合は，50%以上の高い回折効率を示しており，5モード多重でも大きな効率の低下は見られなかった．一方，赤外（1550nm）で再生した場合は，20%以下まで回折効率が低下する結果となった．サンプル数の制限から，露光条件の最適化が十分でなく，本結果には若干のエラーも含まれると考えるが，赤外領域は，可視領域よりも効率が大幅に低下する傾向は掴める．

ホログラム媒質の屈折率変化（露光時間）と回折効率の関係は，図7の様に示される[7]．表3の各波長の1モード記録時の回折効率から，ここでは 0.84×10^{-3} に相当する屈折率変化が得られていると見積もられる．1550nmに対しては，露光時間を延ばすことで回折効率を上げられる可能性があるが，露光時間に対して屈折率変化が線形に伸び続ける材料性能が要求される．体積ホログラムの赤外領域応用には，赤外領域に感度をもつポリマー媒質の探索や材料開発が今後必要である．

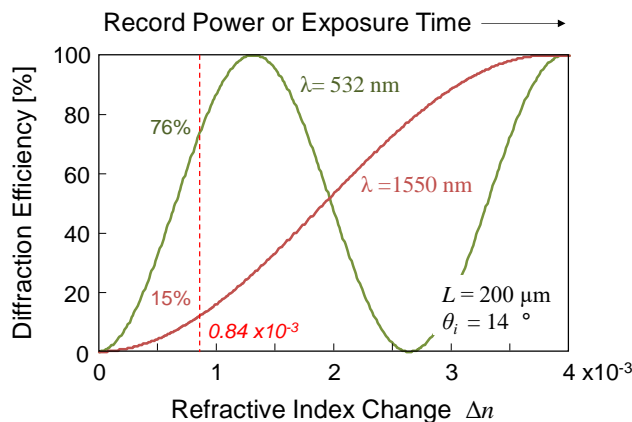


図7 ホログラム媒質の屈折率変化と回折効率の関係

< 引用文献 >

[1] D. Soma, Y. Wakayama, S. Beppu, S. Sumita, T. Tsuritani, T. Hayashi, T. Nagashima, M. Suzuki, H. Takahashi, K. Igarashi, I. Morita, and M. Suzuki, "10.16 Peta-bit/s Dense SDM/WDM transmission over Low-DMD 6-Mode 19-Core Fibre across C+L Band," Proc. ECOC2017, Th.PDPA.1, Gothenburg, Sept. 2017.

[2] G. F. Rademacher, B. J. Puttnam, R. S. Luis, J. Sakaguchi, W. Klaus, T. A. Eriksson, Y. Awaji, T. Hayashi, T. Nagashima, T. Nakanishi, T. Takahata, T. Kobayashi, H. Furukawa, and N. Wada, "10.66 Peta-Bit/s Transmission over a 38-Core-Three-Mode Fiber," Proc. OFC2020, Th3H.1, San Diego, Mar. 2020.

[3] Y. Wakayama, K. Igarashi, D. Soma, H. Taga, and T. Tsuritani, "Novel 6-Mode Fibre Amplifier with Large Erbium-Doped Area for Differential Modal Gain Minimization," Proc. ECOC2016, W.2.A.3, Düsseldorf, Sept. 2016.

[4] S. Shinada, S. Shimizu, T. Shiba, T. Takahata, A. Okamoto, N. Wada, "Spatial-Mode Demultiplexer using 1550-nm-band Angularly Multiplexed Volume Holograms," Proc. ECOC2018, Mo3G.4, Roma, Sept. 2018.

[5] S. Shinada, T. Shiba, T. Maeda, T. Takahata, A. Okamoto, N. Wada, "Characterization of Spatial-Mode Demultiplexer using 1550-nm-band Angularly Multiplexed Volume Holograms," Proc. OECC/PSC2019, ThE1-3, Fukuoka, July 2019.

[6] F. Dubois et al., "Selective mode excitation in graded-index multimode fiber by a computer-generated optical mask," Opt. Lett., vol. 19, no. 7, p. 433-435, 1994.

[7] H. Kogelnik, "Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings", The Bell System Technical Journal, Vol. 49, No. 9, pp. 2909-2947, November 1969.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Satoshi Shinada, Yuta Goto, Hideaki Furukawa	4. 巻 E106-C
2. 論文標題 Spatial Mode-multiplexed Light Source using Angularly-multiplexed Volume Holograms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.20220CP0002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Satoshi Shinada, Yuta Goto, Hideaki Furukawa
2. 発表標題 Mode-multiplexed Light Source using Angularly-Multiplexed Volume Holograms
3. 学会等名 OECC/PSC 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------