

リコンフィギュラブルな自己組織化導波路による光配線技術

Optical Wiring Technology with Reconfigurable Self-Organization Waveguide



岡本 淳 (Atsushi OKAMOTO, Dr. Eng.)

北海道大学大学院情報科学研究科准教授

(Graduate School of Information Science and Technology, Associate Professor, Hokkaido University)

電子情報通信学会 日本光学会 The Optical Society of America 会員

研究専門分野：光通信 光記録 光計測

あらまし 本研究では、リコンフィギュラブルな自己組織化光導波路 (Reconfigurable Self-Organization Waveguide: RSOW) の新たな実現手法を提案し、頻繁な着脱に対応した簡易コネクティングと導波路の書き換えによるルーティング・スイッチングを両立した柔軟性のある光配線デバイスの実現を目指す。まず、基盤技術となるフォトリフラクティブ効果と相互励起型位相共役鏡について検討する。特に、本研究目的に最適化された光コネクタ材料である $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 結晶を開発し、その諸特性を明らかにする。次に、RSOW の接続効率について、ビーム強度比依存性や偏光角依存性などの観点から検討を行う。また、RSOW におけるリコンフィギュラブルな動作を検証するために、3 台のレーザを用いた接続切り換え実験を行う。さらに、RSOW の 3 次元光配線への応用を視野に入れ、複数の RSOW 構造を 1 つのフォトリフラクティブ結晶内に積層形成可能であることを示す。

1. はじめに

社会・経済構造の改革、高齢化社会や環境問題への対応などの課題を解決する有効な手段として高度情報通信社会の構築が急がれる中、近年では、WDM 技術^{*1} を中核とした光ファイバ通信の重要度はますます増大し、その高機能化と FTTH^{*2} の普及も加速している。このような状況において、光情報通信工学全般にわたる技術的課題として、光ファイバや光導波路素子などを含む光コンポーネント間の接続技術がある。接続する光コンポーネントの代表的例として、光ファイバ同士の接続があるが、光ファイバ、発光素子、受光素子、光導波路チップなどがアレイ化・集積化される中で、ますますこれらの間の自由で容易な接続法の確立が求められてきている。

本研究の目的は、光コンポーネントのアレイ化・集積化によって構造の複雑化や空間並列化が進み、調芯がますます困難になる現状において、そもそも光集積回路や導波チップ間の調芯を不要にするための新規技術を確立する事にある。本研究で提案する光接続技術は、任意の光コンポーネント間に光コネクタ媒質を設置 (ラフな配置で良い) することにより、コンポーネント間に自動的に光接続が実現するものであり、一種の自動光配線技術と考えることもできる。特筆すべき点としては、アクティブな調芯技術の問題点である人手や電子制御による複雑な調整が不要であると同時に、パッシブな調芯技術の問題点である高精度な部品が不要であるという利点を併せ持つことである。さらに、本方式の接続自由度が大きいことは、コンポーネント間の光接続が実現した後に、相互接続しているコンポーネントを他のコンポーネント (同種、または異種いずれも可) と交換しても、新しいコンポーネントに適合する光導波構造が自動的に再構成される点、また、複数の配線設定を切り替えることが可能である点など、これまでにないリコンフィギュラブル (可変的・再構成可能) な配線技術をもたらすものである。

本研究では、前記目的を実現する基盤技術として、フォトリフラクティブ効果⁽¹⁾と相互励起型位相共役鏡 (Mutually Pumped Phase Conjugate Mirror: MPPCM)⁽²⁾ について検討する。フォトリフラクティブ効果とは光の照射により、物質の屈折率が変化する現象である。

リコンフィギュラブルな自己組織化導波路による光配線技術

Optical Wiring Technology with Reconfigurable Self-Organization Waveguide

屈折率の変化を制御できれば導波路の形成も可能であり、本研究では、用いる光コンポーネントからの出射光によって自動的に光相互接続を実現するための手段としてフォトリフラクティブ効果による MPPCM を活用する。MPPCM は、位相共役波³の発生技術として知られるが、本研究においては、リコンフィギュラブルな導波路形成への展開を志向する。応用面では、リコンフィギュラブルな自己組織化導波路 (Reconfigurable Self-Organization Waveguide: RSOW) という観点から、簡易な調整による光相互接続⁴、光ファイバの着脱に対応した簡易コネクティングと導波路自身の再構成によるルーティング・スイッチングを可能にする新規デバイスを開発する。また、上記研究目的を達成するための光コネクタ材料としては、従来型のフォトリフラクティブ材料よりも大幅に感度が高く波長域の広い Sn₂P₂S₆ 結晶を新たに開発する。

2. リコンフィギュラブルな自己組織化導波路 (RSOW)

接続される光コンポーネントの種類を選ばない簡易な光コネクティング手法として、近年注目されている技術の一つが自己形成導波路²である。自己形成導波路は光硬化樹脂を利用してビームの伝搬経路をそのまま導波路として定着させるため、高精度なアライメントなしに低損失なファイバカップリング・光配線が可能であり、最新の研究ではシングルモードファイバ一同士の接続でつき合せ接続よりも小さな接続損失³と高い位置ずれ耐性⁴が実現されている。しかし、樹脂の硬化作業には非常に手間がかかり、一度導波路として完成してしまうと経路の変更が出来ないといった特性を有しているため、光ファイバ等の伝送路を自由に着脱するという使い方には向いていない。

また、上記の様な光接続デバイスに加え、光通信の民生分野への用途拡大のためには光信号を電気信号に変換する事なく接続切り換えを行うルーティングデバイスの開発も重要な課題である。しかし、現在はこのルーティング操作は、比較的低速なものでも電子制御が中心であるがために装置の大型化、発熱、消費電力の増加等を引き起こす。この問題の解決策として、あらかじめ分岐点にアレイ型導波路等を製作しておき、

光スイッチングの技術を応用して接続切り換えを行う手法が注目を集めている⁵。光スイッチング技術に関しては、微小電気機械素子 (Micro-Electro-Mechanical Systems: MEMS)⁶、熱光学 (Thermo-Optic: TO)⁷、電気光学 (Electro-Optic: EO)⁸、マルチモード干渉 (Multi-Mode Interference: MMI)⁹等をベースとした様々な研究がなされている。しかし、いずれの技術においてもデバイス作成過程で用途に応じた高精度の設計が必要であるために汎用性に欠け、着脱可能な自由な光配線を実現することは難しい。

本研究では、新たにフォトリフラクティブ効果による MPPCM をベースとした RSOW を提案することで、頻繁な着脱に対応した簡易コネクティングと導波路の書き換えによるルーティング・スイッチングを両立した柔軟性のある光配線デバイスの実現を目指す¹⁰。ここで、自己組織化とは生命活動に代表される自分自身で組織や構造を作り出す性質であり、この概念は結晶成長¹¹や半導体ナノ構造の形成¹²、自己組織化マップ¹³など様々な分野で広く応用されている。この自己組織化の性質を利用した本手法は、光の相互作用によって自律的に誘起される屈折率格子を光接続導波路として扱うため、従来のような接続する光コンポーネントの位置を合わせる様な調芯が不要であり、高い位置ずれ・角度ずれトレランスを確保出来る。本研究における RSOW の大きな特長は、光コネクタ材料中での自律的な導波路形成と導波路の再構成による接続切り換えを両立している点にあり、片方向通信を仮定した場合、**図 1**に示す様に複数の信号光を1つの制御光で一括管理して振り分けを行う事が出来る。制御光は空間光変調器 (Spatial Light Modulator: SLM)⁵によって強度変調されており、この変調パターンを電子的に制御する事で接続先を自在に変更することができる。

具体的な接続切り換えの原理を**図 2**に示す。本手法では、信号光と制御光の相互作用によって誘起される多数の屈折率格子 (空間的に変調された屈折率成分) を用いて導波路を形成するため、屈折率格子を光コネクタ材料内の任意の位置で自在に形成・消去する技術が必要になる。このため、制御光を SLM によって空間分割して管理し、信号光と制御光が重なり合う領域 (相互作用領域) を自由に変更出来るような光学系を

リコンフィギュラブルな自己組織化導波路による光配線技術

Optical Wiring Technology with Reconfigurable Self-Organization Waveguide

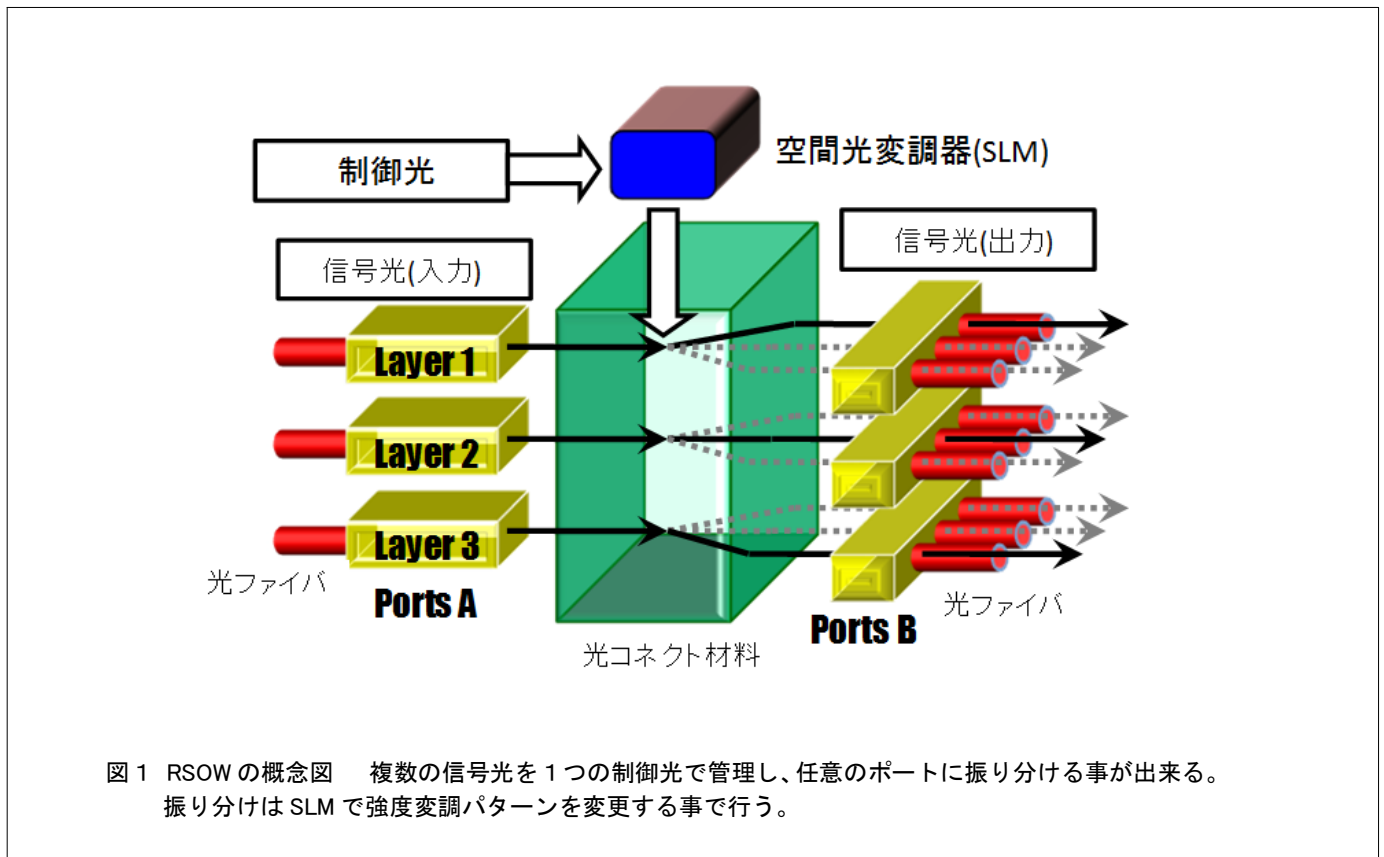
用いる。図2において、制御光を Ch.1 から Ch.2 に切り替えると、ただちに新たな相互作用領域において回折格子が成長し始め、同時に旧領域の回折格子が消滅するので、何度でも導波路を作り替える事が出来る。図2では SLM によって入射位置のみを変更する場合が示されているが、入射角度の変更に対しても自律的に導波路を再構成出来るため、光接続に伴う調整が大幅に緩和されると共に、非常に自由度の高い接続が可能になる。また、2つのビームが光コネクタ材料内で交差していれば導波路形成が可能であるため、双方向通信にも比較的容易に応用が可能である。

3. 高性能なフォトリフラクティブ材料の開発

RSOW においては、導波路が光の相互作用によって自律的に形成されるため、自由度の高い光配線を容易に実現出来るものの、導波路を再構成する際には再び励起時間が必要となる。この励起時間は、光コネクタ材料であるフォトリフラクティブ結晶の応答速度に大きく依存する⁽¹⁾。従来、フォトリフラクティブ媒質と

しては主に BaTiO₃ (チタン酸バリウム) 結晶や LiNbO₃ (ニオブ酸リチウム) 結晶が用いられてきたが、これらの結晶は応答速度が遅く、高速処理を必要とするデバイスへの応用は不向きであった。新たな結晶の開発において最近大きな注目を集めているのが、1991 年に初めてフォトリフラクティブ効果が確認された Sn₂P₂S₆ (Tin Hypothiodiphosphate: SPS) 結晶である⁽¹⁴⁾。Sn₂P₂S₆ 結晶は感度が非常に高いため、近赤外波長帯でしばしば用いられる Rh:BaTiO₃ 結晶と比べ数十から数百倍の応答速度を示す⁽¹⁵⁾。また、電気光学係数が従来の結晶と比べて大きく、530-8000nm という広範囲の波長帯に透明領域が存在し、特に 530-1550nm の範囲では強い結合強度を示すという性質もある⁽¹⁶⁾。このように、Sn₂P₂S₆ 結晶は従来の材料よりも赤から近赤外の波長帯において優れたフォトリフラクティブ特性を有しているため、通信系の次世代アプリケーションへの応用が期待できる。

本研究では、Uzhgorod National University (ウクライナ) の Alexander A. Grabar 教授との共同研究に



リコンフィギュラブルな自己組織化導波路による光配線技術

Optical Wiring Technology with Reconfigurable Self-Organization Waveguide

より、 $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 結晶にアンチモン (Sb) を 1.5% ドープした新結晶の開発に成功した。本結晶は波長 633nm に特化した高い感度を有し、他の $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 結晶と比べ

て比較的低い吸収でありながら高い結合効率を示すために可視光域での原理実験に非常に適しており⁽¹⁷⁾、かつ導波路形成時間の短縮を図る事が可能となる。

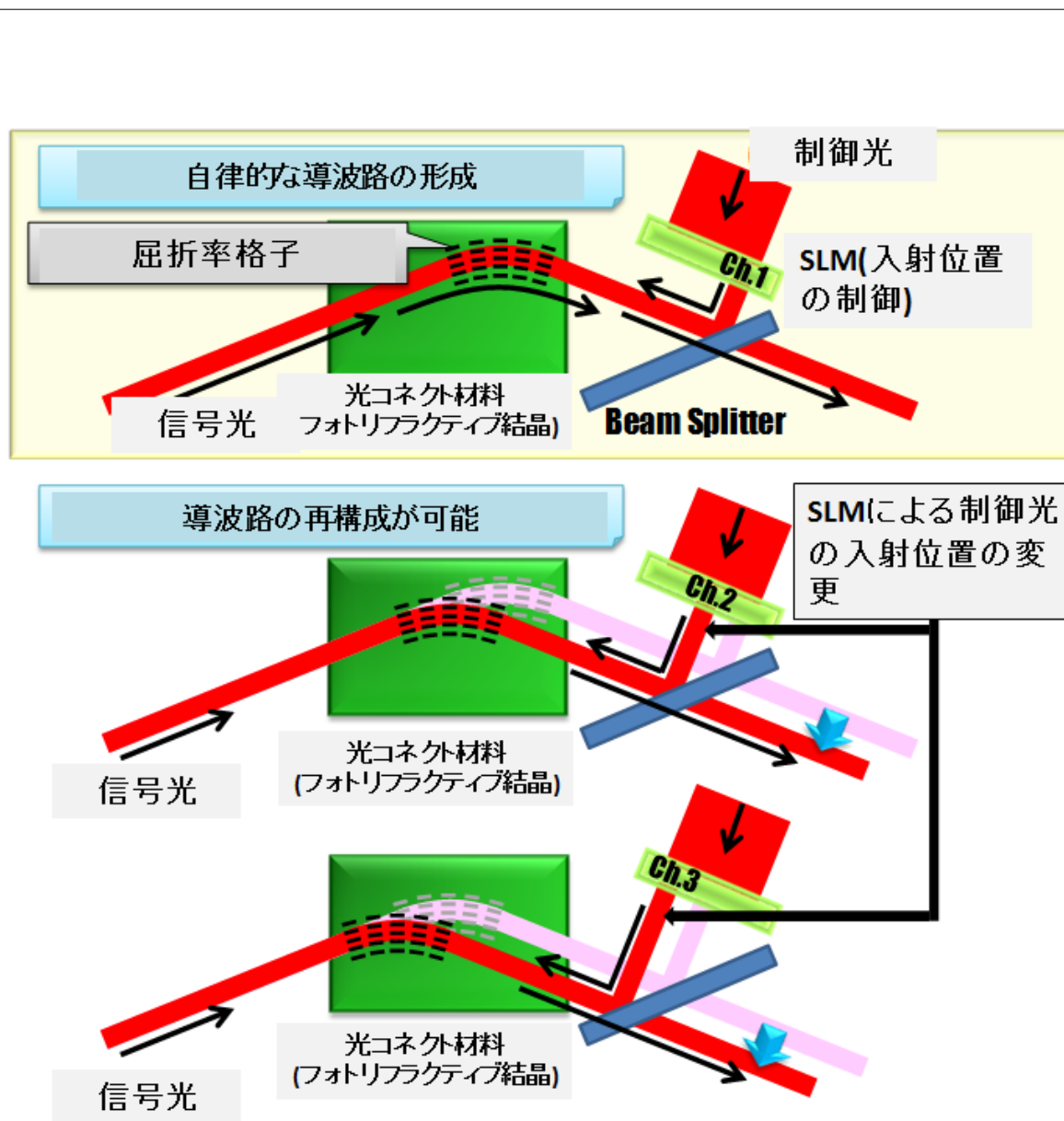


図2 RSOWによる接続切り換えの原理図 まず、信号光と制御光の相互作用で接続導波路を形成し、SLMを用いて制御光のフォトリフラクティブ結晶への入射位置をずらす事で出射光の経路を変更する。その際、元の導波路は自動的に消滅する。

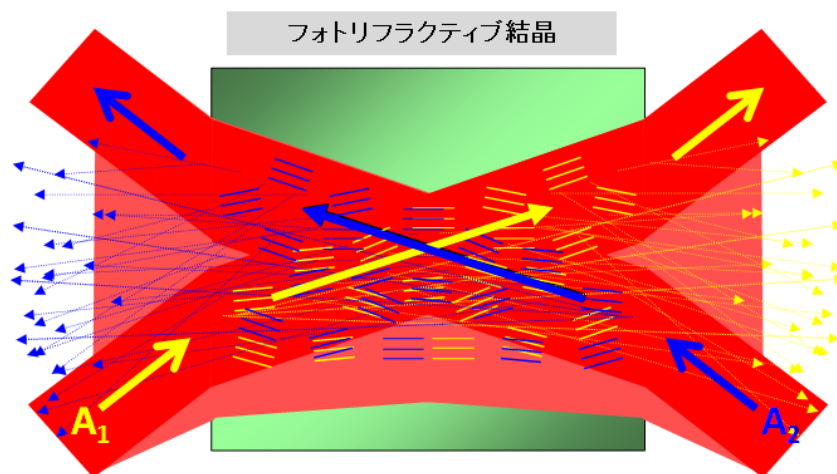
リコンフィギュラブルな自己組織化導波路による光配線技術

Optical Wiring Technology with Reconfigurable Self-Organization Waveguide

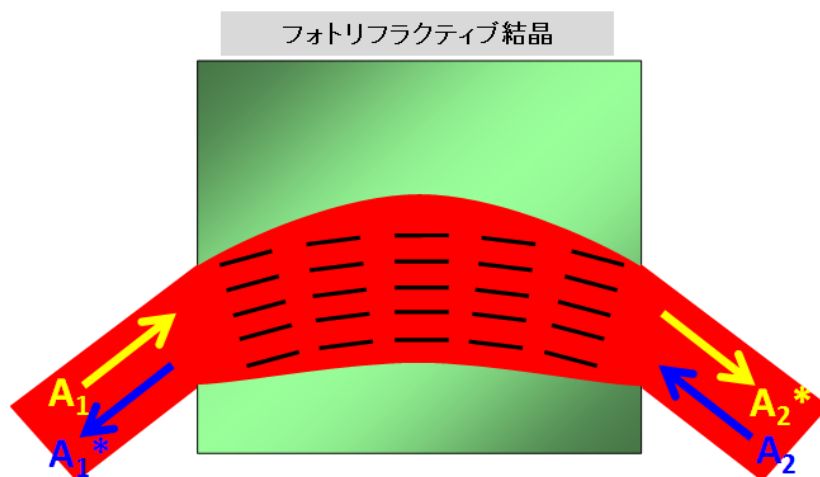
4. 相互励起型位相共役器 (MPPCM)

フォトリフラクティブ結晶中での MPPCM の形成においては、2本のビームは互いにインコヒーレント*6であるために直接干渉はせず、それぞれのビームがビームファニングを起こす (図3 (a))。この時、互い

のビームが生成する回折格子に対して消去光として働くため、一旦生成した回折格子の大半は新たに誘起され続ける回折格子によって次々と書き換えられる。しかし、一方のファニング光のある成分と他方の入射光が対向伝搬となる時、位相整合条件を満足する回折格



(a) 互いにインコヒーレントな2本のビームを入射すると、それぞれがビームファニング現象を起こす。ビームファニングでは、結晶の特定の方向に、多数の散乱光が発生する。



(b) 互いの光ビームが共有する回折格子のみが強く書き込まれ、この回折格子が接続導波路の役割を果たす。

図3 MPPCM の形成過程

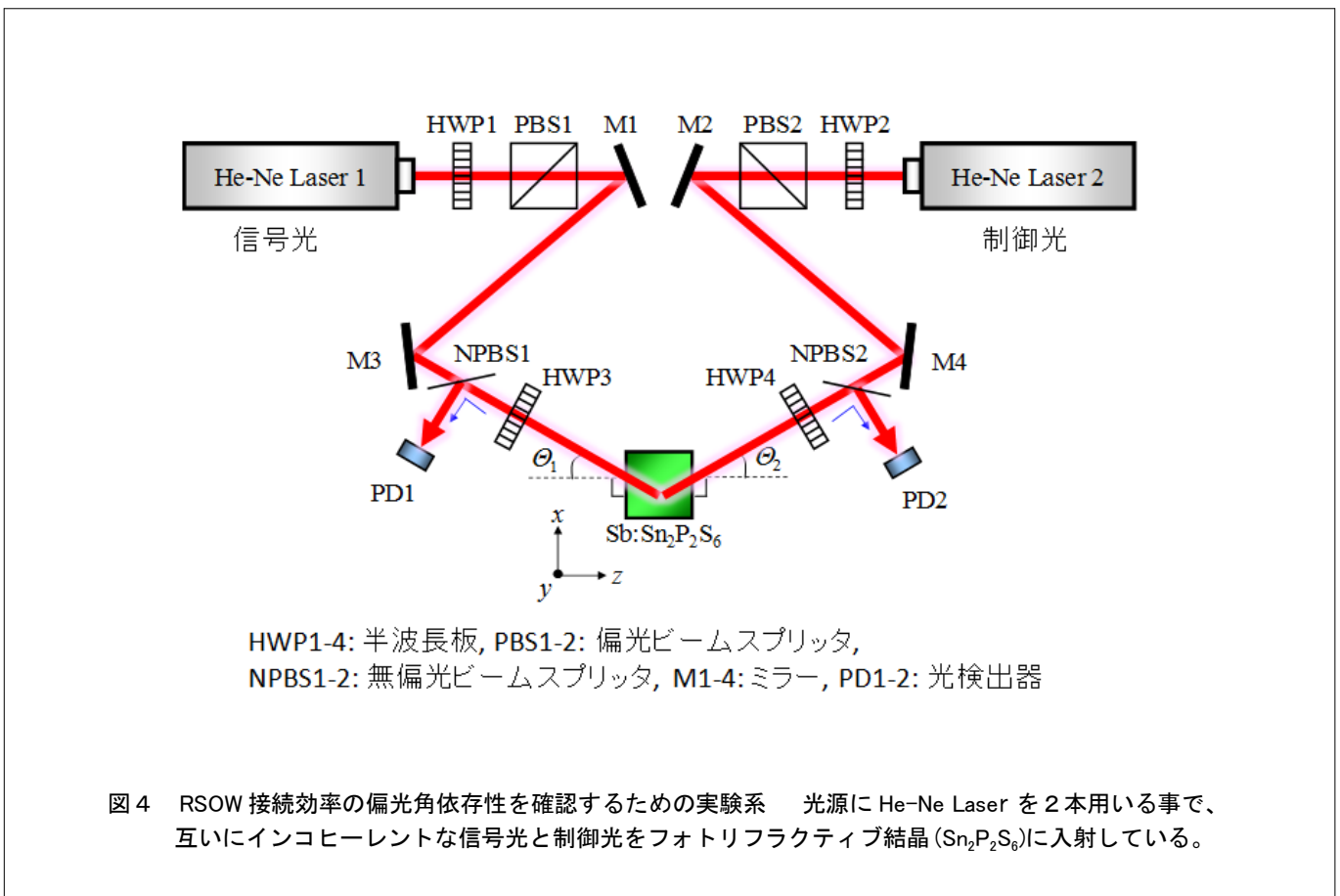
リコンフィギュラブルな自己組織化導波路による光配線技術

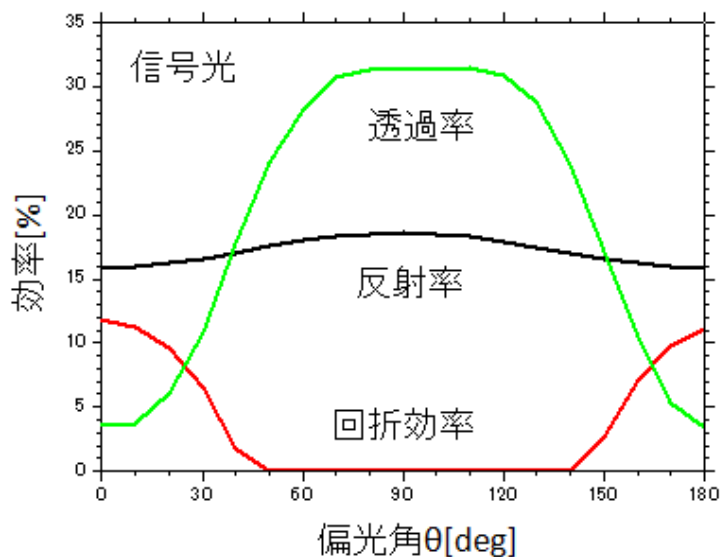
Optical Wiring Technology with Reconfigurable Self-Organization Waveguide

子が生成され、この条件を満たす回折格子のみが互いに共有状態となって安定する。最終的に残った回折格子によって、入射光 A_1 と A_2 は互いの位相共役光 A_2^* 、 A_1^* となって回折されるため (図 3 (b))、これらの回折格子群は RSOW を構成する導波路として扱うことができる。また、位相共役光は入射光の位相を逆転させて同一の経路をたどって戻っていくという性質を有するため、RSOW においては、接続する光学素子の位置や角度の調整が不要となり、光ファイバなどのアライメントが大幅に簡素化される。位相共役光を簡単に生成する事が出来る MPPCM の応用は、通信分野^{(18), (19), (22)} のみならず光ストレージ分野^{(23), (24)} においても注目されている。

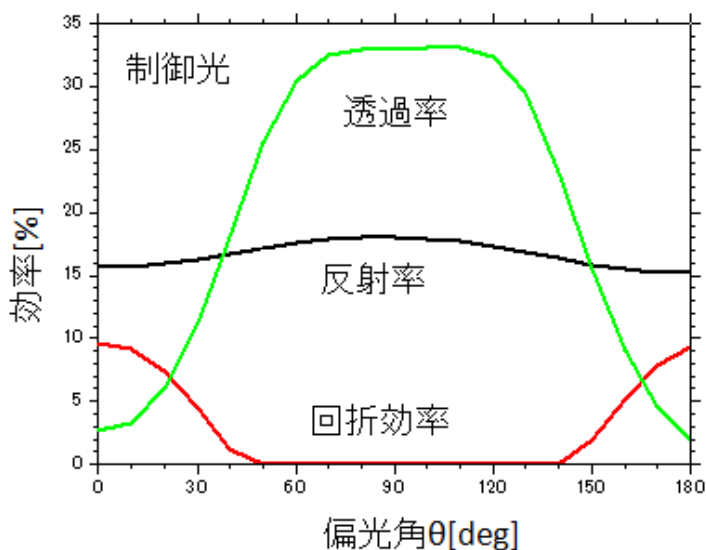
RSOW の接続効率を安定化させるためには入射光波の偏光方向を適切に設定する必要がある。図 4 に接続効率の偏光依存性を調べるための実験系を示す。本実験では、フォトリフラクティブ材料として光波伝搬方向 (z 軸方向) に 6mm の厚さをもつ 1.5%

Sb-doped $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 結晶を、光源として波長 632.8nm の He-Ne レーザを 2 台用いた。ここで、Laser 1 と Laser 2 から出射される光波をそれぞれ信号光および制御光と呼ぶ。結晶への入射角は最大の結合強度を得るために 22° とする。信号光は半波長板 (HWP1) と偏光ビームスプリッタ (PBS1) によって、制御光は半波長板 (HWP2) と偏光ビームスプリッタ (PBS2) によって結晶直前で P_{sig} (信号光のパワー) = $P_{control}$ (制御光のパワー) = 3200 [μW] となる様にパワー調節され、かつ p 偏光に統一される。その後、半波長板 HWP3 と HWP4 で偏光角を変更する。もし導波路が正しく形成されれば、信号光は結晶内で回折し、PBS2 で反射されて光検出器 (PD2) で観測される。同様に制御光は光検出器 (PD1) で観測される。図 5 に反射率・透過率・回折効率の偏光角依存性をプロットした実験結果を示す。偏光角依存は、s 偏光成分が多くなればなるほど大きく器 (PD2) で観測される。同様に制御光は光検出器 (PD1) で観測される。図 5 に反射率・透過





(a) 信号光の反射率・透過率・回折効率



(b) 制御光の反射率・透過率・回折効率

図5 反射率・透過率・回折効率の偏光角依存性 回折効率がRSOWの接続効率である。

リコンフィギュラブルな自己組織化導波路による光配線技術

Optical Wiring Technology with Reconfigurable Self-Organization Waveguide

率・回折効率の偏光角依存性をプロットした実験結果を示す。偏光角依存は、s 偏光成分が多くなればなるほど大きくなり、この結果は理論値とほぼ同じ結果であった。次に、透過率に関して、s 偏光成分が多くなると急激に増加している事がわかる。これは、 $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 結晶が p 偏光の光波に対してほとんど感度を示さないという事実に即している。この偏光依存は、接続する伝送路の種類によっては RSOW の接続効率が大きく低下する事を容易に想像させるが、本研究では、偏光補償光学系の導入によって実質的に偏光無依存な光接続を可能にする方法も開発した⁽²⁵⁾。

光波間のエネルギー移動を本質とするフォトリフラクティブ効果は、入射ビームの強度比（信号光の強度/制御光の強度）によって振る舞いが大きく変化する。互いにインコヒーレントな信号光と制御光を用いる RSOW も例外ではなく、光強度比が導波路を構成する回折格子の空間分布に影響を及ぼす。本研究では、図 4 から HWP3 と HWP4 を省いた実験光学系を用いて、光強度比に対する回折効率の特性を調査した。まず、制御光パワー $P_{control}$ を結晶直前で $3000\mu\text{W}$ とし、信号光パワー P_{sig} を $300\sim 6000\mu\text{W}$ の範囲で $300\mu\text{W}$ ごとに変化させて、信号光の回折光を PD2 で計測し、回折効率を計測した。その後、回折効率のビームパワー依存性を調べるために、 $P_{control}$ を $1000\mu\text{W}$ 、 $5000\mu\text{W}$ 、 $6850\mu\text{W}$ と変化させ、同様の実験を行った。結果として、回折効率はビーム強度比 1.0 のときに最大値をとり、ビーム強度比が $0.7\sim 1.3$ の範囲では最大回折効率からの効率減少が 5%以内であった。この結果より、RSOW の接続効率を確保するためには、信号光と制御光の強度比を $0.7\sim 1.3$ 以内にすべきことがわかる。次に、全体の光強度を小さくすると ($P_{control}=1000[\mu\text{W}]$ のとき)、ビーム強度比が $0.4\sim 1.2$ の間でしか導波路は形成されなかった。これは、照射する光波の強度不足によってフォトリフラクティブ結晶内のキャリア電子が十分に励起されず、安定な共有回折格子が誘起されなかったためであると考えられる。さらに、本実験において得られた最大回折効率は 14.7%であった。これは、結晶前後両端面において 2 回の反射がある事を考慮すると、本光材料の実質的な回折効率は 20%以上を超えることを示唆している。

5. RSOW における光接続切り替え実験

RSOW のリコンフィギュラブルな特性を調査するため、導波路の自己形成後に、別の導波路を再形成し、光接続の切り替えが可能であることを実験によって示す。特に、3 次元光配線への応用を視野に入れ、複数の RSOW 構造を 1 つのフォトリフラクティブ結晶内に積層形成することが可能である事も示す。

積層型 RSOW においては、信号光の入射位置を固定し、図 2 に示す制御光 (Ch.1, Ch.2, Ch.3) を切り替えることで、導波路の書き換えと光接続の切り替えが可能であることを確認する。さらに、紙面の垂直方向には、導波路の接続切り換えを行う RSOW を多層化することができる。実験では、1 つのフォトリフラクティブ結晶内に 2 つの RSOW を積層形成可能であることを示す。

実験系を図 6 に示す。本実験では、6mm の厚さをもつ 1.5% Sb-doped $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 結晶を、光源として波長 632.8nm の He-Ne レーザを 3 台用いた。ここで、Laser 1 から出射される光波を制御光、Laser 2 と Laser 3 から出射される光波を信号光と呼ぶ事とし、これらは互いにインコヒーレントである点に注意する。また、信号光は垂直方向に並べられ、制御光は空間フィルタによって空間的な強度分布を与えられる。結晶への入射角は最大の結合強度を得るために 22° とし、入射偏光は p 偏光とした。導波路が正しく形成されれば、信号光は結晶内で回折し、ビームスプリッタ (BS) で反射されて撮像素子 (CCD) で観測される。

実験に用いた制御光の強度分布パターンと、それに対応した出射光の画像を図 7 に示す。ここで、制御光の左部の半円パターンは擬似的に結合強度を増加させるための補助光として用いた。図 7 (a) の制御光パターン (Control Beam Patterns) と図 6、7 (b) の出射光パターン (Output Beam Patterns) を比較することで、用いた制御光のパターンに応じて信号光の出射位置が変化している事がわかる。これは制御光パターンの変更により導波路の消去と再構成が実行され、その結果、信号の切り換え接続が実現したことを示している。この実験では、1 つの信号光を 3 か所に振り分ける (1×3) 切り換え機構を 2 層化した (1×3)×2 切り換えに成功している。

リコンフィギュラブルな自己組織化導波路による光配線技術

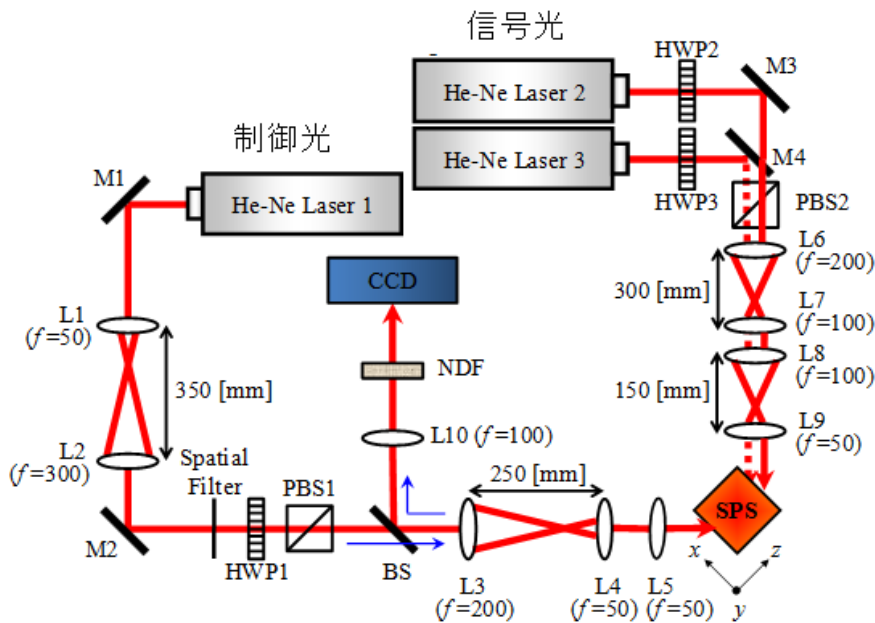
Optical Wiring Technology with Reconfigurable Self-Organization Waveguide

6. おわりに

RSOW は光強度の空間分布によって局所的に屈折率分布が変化するフォトリフラクティブ効果と MPPCM をベースとした技術であり、信号光と制御光の相互作用で導波路を自己組織化し、制御光の入射条件のみで導波路の形成・維持・消去を管理することができる。本手法のように、位相共役波の性質を利用した光接続では、位置ずれに対して従来手法より高いトレランスを示すため、形状が複雑なフォトニック結晶ファイバ同士の接続や形状の異なるファイバ同士の接続にも適している⁽¹⁸⁾。RSOW はこれらの利点に加えて接続導波路を任意の位置に作り変えられる事から、接続自体の ON/OFF や伝送経路の動的選択が可能であり、一度導波路が完成した後不慮に生じる光波入射条件の変化に対しても自発的に対応して新たな条件

に従った導波路に再構成が出来る。

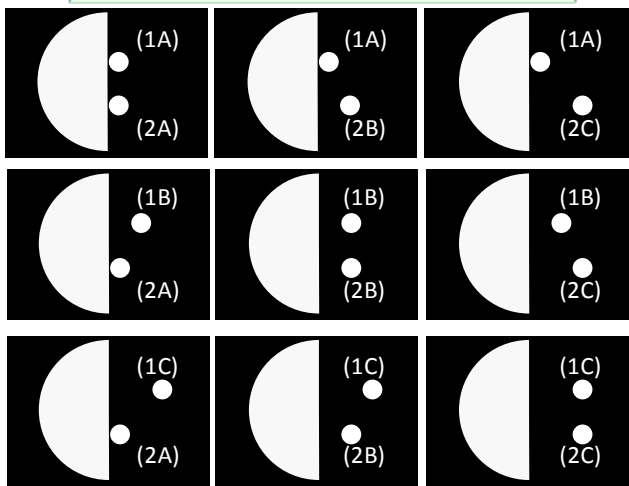
応用分野としては、当初は WDM システムを中心とした光通信システムにおける光コネクタが中心になると思われるが、本技術は、位相共役波の位相補償作用を用いることで自由空間型のデバイスにも適用できるため、光ファイバを用いない移動体間光通信(地上および宇宙)や医療・計測分野でのイメージ伝送光学系への展開が見込まれる。また、情報通信以外の分野においては、例えば、フォトニック結晶ファイバによる光パワー伝送系や光源であるファイバレーザの光学系にも利用できる。接続のための大型で精密な装置やフェムト秒レーザなどの高価な光源が不要であるため、最終的には、現在個人が電気配線を行う感覚で、自由かつ容易に光配線を行う技術に進化する可能性がある。



HWP1-3: 半波長板, PBS1-2: 偏光ビームスプリッタ,
BS: 偏光ビームスプリッタ, M1-4: ミラー, CCD (イメージセンサ),
L1-10: レンズ(焦点距離[mm]), NDF: NDフィルタ

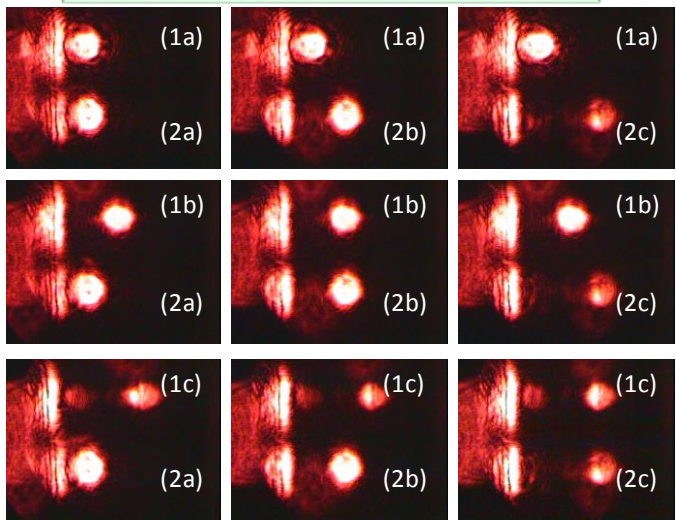
図6 RSOWを用いた接続切り換えを確認する実験系 信号光光源にHe-Ne Laserを2台用意し、y軸方向(紙面に垂直方向)に並べてSPS結晶に入射する。

Control Beam Patterns



(a) 制御光に与える空間強度分布のパターン

Output Beam Patterns



(b) 制御光のパターンに応じた出射光の空間パターン.

図7 制御光と出射光の空間強度パターン 制御光のパターンに対応した出射光パターンが得られた事がわかる。

リコンフィギュラブルな自己組織化導波路による光配線技術

Optical Wiring Technology with Reconfigurable Self-Organization Waveguide

用語解説

***1 Wavelength Division Multiplexing (WDM, 波長分割多重)**: 光ファイバーを使った通信技術の一つ。波長の違う複数の光信号を同時に利用することで、光ファイバーを多重利用する方式のこと。

***2 Fiber To The Home (FTTH)**: 光ファイバーを伝送路として一般個人宅へ直接引き込む、アクセス系光通信の網構成方式のこと。

***3 位相共役波**: ある元になる光波に対して、空間的な位相を反転した光波のこと。具体的には、適当な媒質に光を入射させたときに媒質中で発生し、その入射光路を逆向きに戻ってくる光であって、しかも元の光波と波面の形状が全く等しい光波のこと。時間反転波とも呼ばれる。

***4 光相互接続**: 光を媒体とした電子機器間や電子部品間の接続のこと。長距離光通信ではなく、より短距離の接続技術について用いられることが多い。光インターコネクションとも呼ばれる。

***5 空間光変調器 (Spatial Light Modulator: SLM)**: “光変調素子”と呼ばれる微小素子を2次元的に複数並べて、光源からの光の振幅、位相、偏光などの空間的な分布を電氣的に制御することにより、光を変化(変調)させるデバイスのこと。

***6 インコヒーレント**: 波動が互いに干渉できない性質をもつこと。2つ(または複数)の波の振幅と位相がでたらめに変動し、干渉縞などが生じないことを意味する。

参考文献

(1) P. Yeh, “Introduction to photorefractive nonlinear optics,” *John Wiley & Sons, Inc.*, (1993).
(2) P. Yeh, T. Y. Chang, and M. D. Ewbank, “Model for mutually pumped phase conjugation,” *Journal of the Optical Society of America B* **5**, 1743-1749, (1988).
(3) M. Waki, K. Tsujikawa, and T. Kurashima, “Investigation of self-written waveguide technique toward easy splicing method for SMF in optical networks,” *Proc. of OFC/NFOEC 2008*, NThC3, (2008).

(4) K. W. Cheng, M. A. Uddin, and H. P. Chan, “Relaxation in alignment tolerance by double-side irradiation induced,” *Proc. of OECC 2009*, ThA4, (2009).
(5) T. Yoshimura, M. Ojima, Y. Arai, and K. Asama, “Three-Dimensional Self-Organized Microoptoelectronic Systems for Board-Level Reconfigurable Optical Interconnects-Performance Modeling and Simulation,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **9**, 492-511, (2003).
(6) C. R. Giles, V. Aksyuk, B. Barber, R. Ruel, L. Stulz, and D. Bishop, “A Silicon MEMS Optical Switch Attenuator and Its Use in Lightwave Subsystems,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **5**, 18-25, (1999).
(7) T. Aalto, M. Kapulainen, S. Yliniemi, P. Heimala, and M. Leppihalme, “Fast thermo-optical switch based on SOI waveguides,” *Proc. of SPIE* **4987**, 149-159, (2003).
(8) E. DelRe, M. Tamburrini, and A. J. Agranat, “Soliton electro-optic effects in paraelectrics,” *Optics Letters* **25**, 963-965, (2000).
(9) L. B. Soldano, and E. C. M. Pennings, “Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications,” *Journal of Lightwave Technology* **13**, 615-627, (1995).
(10) A. Okamoto, Y. Kojima, M. Takabayashi, A. A. Grabar, and K. Sato, “Dynamically reconfigurable optical device with nanoscale dynamic self-organization in Sn₂P₂S₆ crystal,” *Proc. of APNFO-7*, 127, (2009).
(11) J. Di Chen, Y. J. Wang, K. Wei, S. H. Zhang, and X. T. Shi, “Self-organization of hydroxyapatite nanorods through oriented attachment,” *Biomaterials* **28**, 2275-2280, (2007).
(12) C. Teichert, “Self-organization of nanostructures in semiconductor heteroepitaxy,” *Physics Reports* **365**, 335-432, (2002).
(13) T. Kohonen, and P. Somervuo, “Self-organizing maps of symbol strings,” *Neurocomputing* **21**, 19-30, (1998).

リコンフィギュラブルな自己組織化導波路による光配線技術

Optical Wiring Technology with Reconfigurable Self-Organization Waveguide

- (14) A. A. Grabar, M. Jazbinšek, A. N. Shumelyuk, Y. M. Vysochanskii, G. Montemezzani, and P. Günter, "Photorefractive effects in $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$," *Photorefractive Materials and Their Applications 2: Materials*, P. Günter and J.-P. Huignard, Eds., Springer Series in Optical Sciences **114**, 327-362, (2007).
- (15) M. Jazbinšek, G. Montemezzani, P. Günter, A. A. Grabar, Ivan M. Stoika, and Yulian M. Vysochanskii, "Fast near-infrared self-pumped phase conjugation with photorefractive $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$," *Journal of the Optical Society of America B* **20**, 1241-1246, (2003).
- (16) R. Mosimann, P. Marty, M. Jazbinšek, P. Günter, and A. A. Grabar, "Photorefractive two-wave mixing in $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6:\text{Te}$ at $1.55\ \mu\text{m}$," *Proc. of OSA/CLEO/QELS 2008*, CMBB5, (2008).
- (17) I. V. Kedyk, P. Mathey, G. Gadret, A. A. Grabar, K. V. Fedyo, I. M. Stoika, I. P. Prits, and Y. M. Vysochanskii, "Investigation of the dielectric, optical and photorefractive properties of Sb-doped $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ crystals," *Applied Physics B* **92**, 549-554, (2008).
- (18) Y. Nakayama, A. Okamoto, Y. Takayama, and Y. Hayano, "Splice of photonic crystal fibres by use of double phase-conjugate mirror," *Proc. SPIE* **6588**, 658813, (2007).
- (19) S. Weiss, M. Segev, S. Sternklar, and B. Fischer, "Photorefractive dynamic optical interconnects," *Applied Optics* **27**, 3422-3428, (1988).
- (20) C. Medrano, M. Zgonik, P. Bernasconi, and P. Gunter, "Phase conjugation in optical communication links with photorefractive Fe:KNbO_3 ," *Optics Communications* **128**, 177-184, (1996).
- (21) H. Kato, A. Okamoto, and M. Bunsen, "Fault-tolerant Automatic Routing Method with Two Photorefractive Double Phase Conjugate Mirrors," *Proc. of ICTON 2003*, 295-298, (2003).
- (22) S. Kano, A. Okamoto, Y. Takayama, and K. Sato, "Efficient coupling for bidirectional pumping in EDFA with two mutually-pumped phase-conjugate mirrors," *Proc. of SPIE* **6582**, 65821U, (2007).
- (23) H. Funakoshi, and A. Okamoto, "Experiment on long-term readout of binarized image in photorefractive memory with double mutually pumped phase conjugators," *Optics & Laser Technology* **38**, 604-613, (2006).
- (24) T. Sano, A. Okamoto, and K. Sato, "Selective Erasure of Multiplexed Holograms Using Beam Amplification by Mutually Pumped Phase Conjugate Mirror," *Tech. Dig. of ISOM/ODS 2008*, MP10, (2008).
- (25) Y. Wakayama, Atsushi Okamoto, Alexander A. Grabar, and Kunihiro Sato, "Optical interconnection between different spatial modes using double phase conjugate mirror with polarization alignment system," *Optical Review*, **Vol. 18, No. 1**, pp. 117-123, (2011).

この研究は、平成19年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成20年度～22年度に実施されたものです。