



Contents lists available at ScienceDirect

OpticsCommunications

journal homepage: www.elsevier.com/locate/optcom

高度非線形高屈折率コントラストデュアルコアファイバーにおけるフェムト秒パルスの広帯域自己スイッチング

M. Longobucco^{a,b,*}, I. Astrauskas^c, A. Pugžlys^{c,d}, D. Pysz^a, F. Uherek^e, A. Baltuška^{c,d}, R.Buczyński^{a,b}, I. Bugar^{a,e}^a Department of Glass, Łukasiewicz Research Network - Institute of Electronic Materials Technology, Wólczyńska 133, 01-919 Warsaw, Poland ^bDepartment of Geophysics, Faculty of Physics, University of Warsaw, Pasteura 5, 02-093 Warsaw, Poland ^c Photonics Institute, Vienna University ofTechnology, Gusshausstrasse 27-387, 1040 Vienna, Austria ^d Center for Physical Sciences & Technology, Savanoriu Ave. 231, LT-02300 Vilnius, Lithuania^e International Laser Centre, Ilkovičova 3, 841 04 Bratislava, Slovakia

梗概

本論文では、高度に非線形で高屈折率コントラストのデュアルコアファイバーで、波長 1700nm のフェムト秒パルスのパルスエネルギー制御非線形自己スイッチングを実証します。ファイバー構造は、2つのマイクロディメンションコアと、社内で開発された2つの熱的に整合したソフトガラスでできた固体クラッドで構成されています。異常分散領域で 35mm のファイバー長で、入力パルスエネルギーが 1nJ から 3nJ に単調に増加すると、ダブルスイッチング動作が観察されました。空間強度分布測定により、16.7dB のスイッチングコントラストが確認され、2つの出力チャンネルの記録されたスペクトルから、150nm 以内の広帯域スイッチング動作が明らかになりました。得られた結果は、新しいタイプのソリトンスイッチングを示しており、以前の実験作業と比較して大きな進歩を示しており、高い応用可能性を秘めています。

1. 初めに

高速光ファイバーによる長距離データ伝送には、信号を光学的にスイッチング[1]、ルーティング[2]、またはバッファリング[3]するための互換性のあるデバイスが必要です。この課題を解決するために、理論的研究では、シンプルでコンパクトな全光スイッチングを約束するデュアルコアファイバーを使用した非線形方向性結合器アプローチを集中的に調査してきました[4–6]。このデュアルコアファイバーベースのスイッチング技術は、他のアプローチに比べて多くの利点があります。たとえば、かなり短いデュアルコアファイバー(DCF)の超短パルスは自己スイッチングできますが、非線形光ルーミラーは、十分な非線形位相シフトを誘発するために 1メートルの長さのファイバーを必要とし、シリカファイバーの場合は数十ナノジュールのパルスエネルギーが必要です[7]。別の例としては、カルコゲニドファイバーを使用したファイバークレーティング結合器があります[8,9]。デュアルコア方式に対する欠点は、スペクトルシフトされたポンパルスと信号パルス、およびそれらを入力で結合し出力で分離するための波長分割マルチプレクサが必要なことです。最後に、このようなタイプの周期格子は長さが 100mm を超え、DCFの場合の最適なファイバー長よりも大幅に長くなります。いくつかの研究では、1THz/s を超える潜在的な転送速度で、約 10mm のファイバー長の DCF の自己スイッチング性能が実証されています[1,10,11]。デュアルコアファイバーを使用した超高速スイッチング

の最初の実験は、通常の分散領域で実行され、深刻なパルス歪みが明らかになりました[10]。そのため、非線形ファイバーコミュニティの注目は、振幅と位相を同時に維持しながら超高速パルスを非線形制御できるソリトンスイッチングに集まりました[4,12]。最近、ソリトンデュアルコア(DC)伝搬の多くの側面をレビューした理論書の章が出版されました[13]。これには、非対称性と偏光効果、デュアルコアファイバーレーザーの問題、パリティ時間対称性などが含まれます。実験面では、励起波長 1650nm で軟質ガラス DC フォトニック結晶ファイバー(PCF)を使用して、ソリトン領域でのフェムト秒パルスの真のスイッチングを初めて実証しました[11]。実験結果は対応する数値シミュレーションによってサポートされ、高次ソリトン分裂[14]と波長依存の結合振動の相互作用が確認されました。最良のスイッチングは、14mm のファイバー長と数十ナノジュールのパルスエネルギーで達成されましたが、高いスイッチングコントラストは、非線形に広がったスペクトルの限られたセグメントでのみ実証されました。

スイッチング性能をさらに向上させるために、標準的なシリカやこれまで使用されていた軟質ガラスよりも 20 倍高い非線形屈折率(n_2)を持つ新しいファイバー材料を選択しました。以前の研究で

* Corresponding authorat: Department of Glass, Łukasiewicz Research Network - Institute of Electronic Materials Technology, Wólczyńska 133, 01-919 Warsaw, Poland.

E-mail addresses: mattia.longobucco@itme.edu.pl, m.longobucco@fuw.edu.pl (M. Longobucco).

<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126043>

Received 26 January 2020; Received in revised form 24 April 2020; Accepted 29 April 2020

Available online 30 April 2020 030-4018 / © 2020 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CCBY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

空気ガラス DCPCF 設計を最適化しました[15]。製造された空気ガラス DCPCF での実験的デモンストレーションは失敗しました。これは、想定された制御可能なソリトン自己トラッピング領域で DCPCF 機能を妨害するデュアルコア非対称性の存在が原因である可能性があります[16]。したがって、私たちの戦略は、より高いレベルのデュアルコア対称性を約束する新しいオールソリッド PCF アプローチ[17,18]を利用して、非常に効果的な非線形スイッチングを考案することでした。この目標を達成するために、ファイバー線引きプロセス中に結合することのできる屈折率コントラストが 0.4 の 2 つの軟質ガラスを社内で合成しました。この珍しい技術的アプローチにより、超高速ソリトン伝搬に必要な広帯域の異常分散が可能になり、また、高度に非線形なガイドガラスを使用することで低エネルギー性能もサポートされます[19]。実験的に決定された 2 つのガラスの光学パラメータを使用して、DCF での効率的な全光スイッチングを実証するために、広範な非線形シミュレーション研究を実施しました。シミュレーションは、超高速ソリトンデュアルコア伝搬をモデル化できる結合一般化非線形シュレーディンガー方程式の解に基づいています[4,12,20]。得られた結果から、最良の構造戦略は、フォトニック構造のない単純なクラッドを備えた高屈折率コントラストのデュアルコア形状であることが明らかになりました[21,22]。これを考慮すると、製造が簡素化されるだけでなく、シミュレーションでは、同様の理論的および実験的研究よりも高いスイッチングコントラスト(15dB 以上)と低いスイッチングエネルギー(ピコジュール範囲)も予測されました。

本論文では、高屈折率コントラストの全固体 DCF におけるフェムト秒パルスのソリトン全光スイッチングの初めての実験結果を紹介いたします。徹底的なカットバック研究の枠組みの中で、入力パルスエネルギーの単調増加下で 35mm のファイバー長での新しい二重スイッチング動作を実証します。両方の出力チャンネルの個別のスペクトル登録を実行することで、第一スイッチ、バックスイッチ、および第二スイッチステップを示す、複雑なスイッチングパフォーマンスの広帯域特性を観察しました。さらに、グローバルスイッチングシナリオは、17dB のレベルで積分エネルギーのスイッチングコントラストを表現し、以前の同様の実験作業を克服しました。特定された非線形スイッチングの特性は、特殊なソリトン伝搬シナリオを示しており、その考えられる解釈については、本論文の最後で説明します。

2. 方法

2.1. ファイバー開発

新しいファイバーのコア材料は鉛ケイ酸ガラス PBG-08 です。このガラスは以前に非線形 PCF の開発に使用されており、その線形および非線形特性はすでに実験的に検証されています[16,23]。PBG-08 は、 $4.3 \cdot 10^{-19} \text{m}^2/\text{W}$ の高い非線形屈折率と、近赤外(NIR)スペクトル領域での約 1.9 の線形屈折率の両方を備えています。最近では、補完的なホウケイ酸ガラスの組成が PBG-08 ガラスと熱的に一致するように最適化されました。その結果、NIR での屈折率が約 1.5 の新しいガラス UV-710 が生まれました[19]。図 1 は、可視および NIR スペクトル領域での両ガラスの群屈折率と、それらの最も重要なレオロジー特性を示しています。グラフは、短パルス伝搬の場合でも、近赤外レベルで 0.4 のレベルでガラス間の高屈折率コントラストを確認しています。表の値は、熱処理下でのガラスの挙動が非常に似ていることを示しているため、全固体繊維製造プロセスでそれらを組み合わせることができます。

DCF は、PCF 製造プロセスで一般的に使用されるスタックアンドドロロー法で製造されました。ガラス合成後、高屈折率 PBG-08 と低屈折率 UV-710 の両方のガラスから、円筒形で同じ直径のガラスロッドが準備されました。UV-710 ガラスロッドは、中央ロッドの周りに 6 つの要素のリングを持つ六角形の格子構造に積み重ねられました。次に、中央のラインで、中央ロッドの両側にある 2 本の UV-710 ガラスロッドが PBG-08 のものに置き換えられました。ロッド間に残っている小さな空気の間隙は、2 段階のドロッププロセス中に埋められました。最初のステップでは、直径約 1.6mm の 20cm 長のサブプリフォームを数本製造しました。2 番目のステップでは、最も対称性の高いサブプリフォームを特定し、最終的なドロッププロセスを実行しました。最終的な線ド

ロー工程の前に、サブプリフォームを PBG-08 ガラスのキャピラリーに

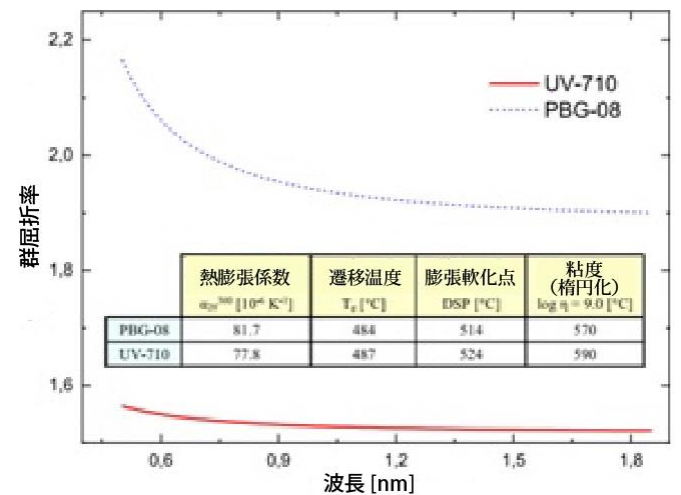


図 1. 選択した 2 つのガラスの群屈折率と主要なレオロジー特性(挿入表内)。

入れて、より大きく標準に近い直径の外側クラッドを形成しました。最終的な線引きの結果、外径 111 μm のファイバーが得られました。図 2 は、(a)5000 倍と(b)20000 倍の倍率で撮影した DCF 構造の断面の走査型電子顕微鏡(SEM)画像 2 枚を示しています。SEM 画像から、コアの境界が予想される正六角形を形成せず、星型に変形していることがわかります。この変形は、クラッド用の UV-710 ガラスがコア領域の PBG-08 ガラスよりも硬いために発生し、クラッドロッドの元の曲率がより保持されます。DCF コアの中心間の距離は 3.1 μm で、単一コアの有効モード面積 A_{eff} は 1.86 μm^2 です。

2.2. DCF 線形光学特性の数値シミュレーション

DCF の線形光学特性を計算するために、市販のソフトウェア (ModeSolution, Lumerical) を使用しました。この研究の枠組みの中で、両方のガラスの測定された材料分散プロファイルは、セルマイヤー係数[19]によって特徴付けられました。SEM 画像の DCF 断面構造を単純な幾何学的オブジェクトで近似しました。結果として得られた構造は、図 3 に挿入図として示されています。各コアについて、2 つのガラス境界間の曲率を円でフィッティングし、最終的にはモードソルバーで簡単に適用できる円セクションでフィッティングしました。濃い赤に対して異なる色を持つ挿入図上のすべてのオブジェクトは、UV-710 ガラス材料を表しています。最初に、分散プロファイルを決定するために、単一コア構造を分析しました。2 つのゼロ分散波長 1295nm と 2360nm の間に、ソリトン伝搬の特性を決定する幅広い異常分散を特定しました。最大分散パラメータは 1720nm で 66ps/km/nm でした。図 3a のシミュレーション結果は、前回の論文[21]で数値解析した六角形コア構造の場合と非常によく似ています。2 つのコア中心を含む線に対する平行(X)および垂直(Y)磁場振動の分散プロファイルを比較すると、グラフで偏光に対するわずかな感度が観察されます(図 2a)。2 番目のステップでは、標準的な手順[11,15,21]を使用して結合長 L_c 特性を取得するために DC 構造を解析しました。図 3b の結果は、[21]で研究された 3.2 μm のコア距離を持つ最適化された六角形コア構造に関して、より強い結合が予測されることを明らかにしています。

実際の構造の場合、コア中心間の距離は 3.1 μm で、単一コアモードの有効モード面積(A_{eff})は 1.84 μm^2 から 1.86 μm^2 にわずかに増加しました。距離の減少と A_{eff} の増加の両方が結合を強化します。これは実際には重なり積分によって決定され、これは 1 つのコアのエバネッセント場が 2 番目のコアの領域に及ぼす影響によって決まります[24]。結合長の 2 つの直交偏光の差からも、 L_c が微細構造のわずかな変化に敏感であることが確認されました。

X 偏光場の場合、Y 偏光場の場合よりも結合が強くなります。これは、場の振動ベクトルが反対のコアに向いているためです。したがって、X 偏光場の場合、 L_c は短くなります。仮定の六角形および実際の星型

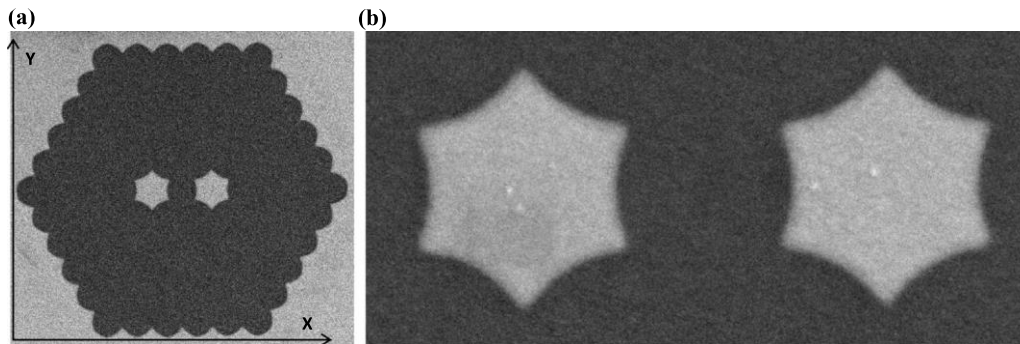


図2 中央ロッドの周りに6つのリングを持つオールソリッドデュアルコア光ファイバー構造の断面のSEM画像(2つの異なる倍率): (a) 5000倍、(b) 20000倍。

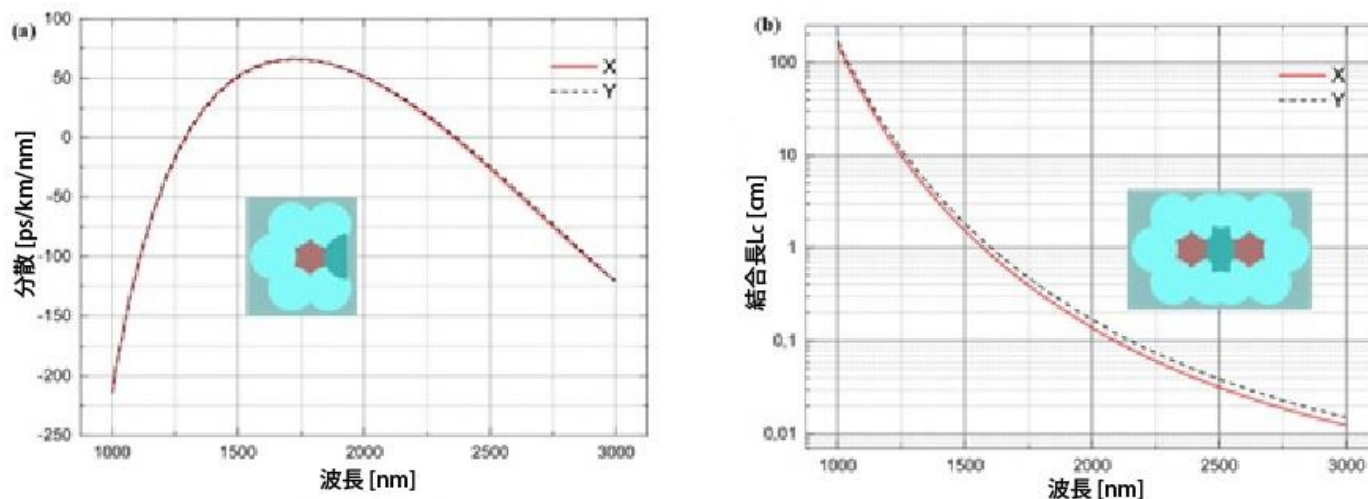


図3 直交する両偏波方向に対する(a)シングルコア構造分散と(b)デュアルコア構造結合長のスペクトル特性。解析された簡略化された構造の写真が挿入図に示されています。

コア構造のX偏光場の場合の数値シミュレーションでは、1700nmでの結合長がそれぞれ9mmから5mmに減少することが明らかになりました。

た。DCFの線形特性の数値解析は、非線形実験の条件を適切に選択し、得られた結果を解釈するために不可欠です。これは信頼性の高い方法であり、同様のDCFの以前の研究で実証されているように、正確な結果を提供します[11,16]。これらの計算のさらなる理由は、人工的に作成された単一コア構造の分散を実験的に評価することが不可能であるためです。1つの波長での結合長を実験的に決定することは、徹底したミリメートル精度のカットバック手順によって可能です。ただし、この方法では繊細なファイバーサンプルが破壊されます。さらに、 L_c のスペクトル特性には、波長が変化するたびに、調整可能なレーザー光源と、装置の励起段階と登録段階の両方を恒久的に再調整する必要があります。

2.3. 非線形スイッチング性能の実験的調査

我々は、図4に示す装置を使用して実験研究を行いました。励起パルスのソースは、10kHzの繰り返しレートで動作し、1500~1900nmのスペクトル範囲で調整可能な光パラメトリック増幅器(OPA)でした。タイプIBBO結晶に基づく2段OPAは、市販のYb:KGW増幅器(Pharos、光変換)の周波数2倍出力によってポンプされました。アイドラー放射の全スペクトル範囲で70~100fsのパルス持続時間は、一對のSF10プリズムに基づくプリズムコンプレッサで分散を制御することによって達成されました。生成されたパルスのエネルギーは数マイクロジュールを超えたため、DCF入力ファセットの損傷を防ぐために、数nJレベルに減衰させました。DCFのスイッチングポテンシャルを調べるために、パルスは2つの半波長板に通され、その間にGlan-Taylor偏光子が配置されました。最初の半波長板と偏光子はパルスエネルギーの微細減衰に使用し、2番目の半波長板はファイバーに入射する前にパルス

の偏光を調整するために使用しました。2つの40倍顕微鏡対物レンズを2つの同一の3D位置決めステージにサブマイクロメートルの精度で取り付け、放射の入出力を管理しました。最初の対物レンズにより、選択した1つのファイバーコアを個別に励起できました。2番目の対物レンズは、分光計(NIRQuest、OceanOptics)に取り付けられたマルチモード収集ファイバー上にDCFの出力面をイメージングしました。デフォルトの出力ビームパスは、収集ファイバーの前にフリップミラーを配置した赤外線カメラチップ(Xeva1.7320、Xenics)に向けられました。ミラーを傾けることで、図4に示すようにスペクトル登録が可能になりました。フリップミラーの前にアイリス絞りを使用して、1つのコアのみのスペクトル登録を制限し、2番目のコアの画像を切り取りました。絞りの位置合わせはカメラによって監視されました。最後に、開口部の後の25mm対物レンズで光を集光ファイバー端に集光することで、スペクトル登録が改善されました。

実験では、赤外線カメラがほぼフラットなスペクトル感度を持つ最長の波長である1700nmの励起波長を使用しました。最長の波長を選択したのは、以前の研究[16]で示されているように、デュアルコアの非対称性の影響は波長を長くすることで弱まるためです。DCFの非対称性により、線形領域での励起コアと非励起コア間の出力伝達比が低下します。したがって、非線形結合性能にも悪影響があります[24]。予備実験により、新しい全固体DCFの場合、1700nm励起の方が1500nmの場合よりもスイッチング結果が優れていることが確認されました。長い波長の利点は、ファイバーの分散プロファイル(図3a)にも依存しており、1700nmでは3次分散(TOD)が無視できることがわかります。したがって、この波長では、分散波生成が弱くなり、ソリトン伝搬の乱れが少なくなることが期待されます[14]。パルス幅を経験的に

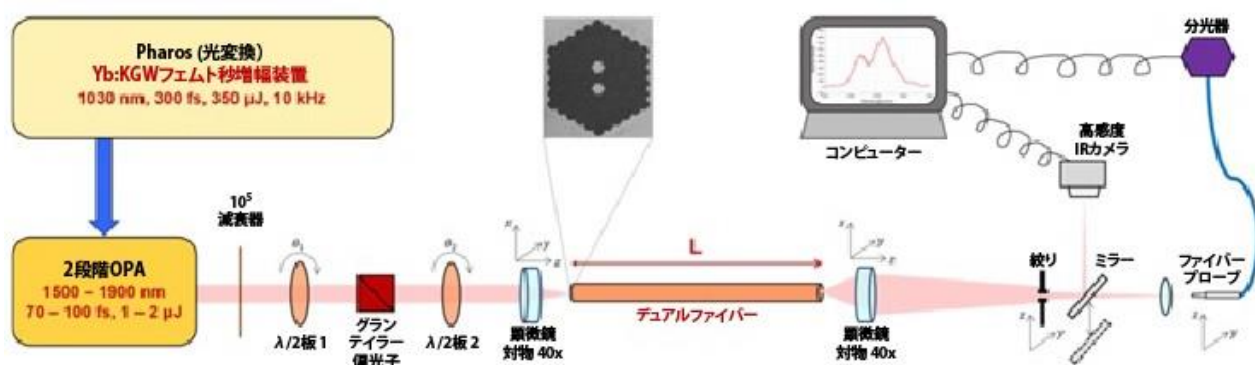


図 4.デュアルコア光ファイバーの非線形スイッチングを調査するための実験装置。

最適化した結果、100fsの方が、より短いパルス幅よりも、研究対象のDCFでのスイッチングに有利であることがわかりました。

次に、ファイバーの長さ($ER(E_{in})$)シリーズの2つの極端な正と負の値の差を45~25mmの範囲でカットして最適化しました。0.5~3nJの間でパルスエネルギーを増加させながら、カメラ画像とスペクトルのシリーズをいくつか収集しました。このエネルギー範囲では、中程度のスペクトルの広がりや非線形相互作用が観察されました。3nJを超えるパルスエネルギーではスイッチングは観察されませんでした。最高のスイッチングコントラストを特定するために、すべてのファイバー長と異なる偏光角度で同じカメラ画像とスペクトルのシリーズを登録しました。DCFは本質的に複屈折性があるため、ファイバーを切断するたびに2番目の半波長板を回転させて、偏光の影響を分析しました。

3.結果と考察

ファイバーカットバック手順の枠内で、X偏光場に対して35mmのファイバー長で最も興味深いスイッチング性能が観察されました。この偏光方向は、実験室座標の垂直軸からわずかにずれており(図5)、最後の画像の2.98nJエネルギーの白い矢印で示されています。矢印の長さは、2つのコアの中心間の距離 $3.1\mu\text{m}$ に対応します。図5に示すカメラ画像からわかるように、入力パルスエネルギー(E_{in})が単調に増加すると、優れたスイッチング性能が観察されました。パルスエネルギーが0.89nJの初期の下部コア優位性は、エネルギーレベル1.65~1.95nJで上部コア優位性に移行します。エネルギーがさらに増加すると、2.27nJで極端な逆スイッチングが発生します。上部コアへの2番目の切り替えステップは、2.27nJと2.62nJのエネルギーレベルの間で行われ、その優位性は最大適用エネルギー2.98nJまで維持されます。入力パルスエネルギーごとに、両方のコアの領域全体にわたって画像上でキャプチャーされた強度を個別に積分しました。得られた相対エネルギー値 $E_{bottom}(E_{in})$ と $E_{top}(E_{in})$ を使用して、DC消光比を $ER(E_{in})=10\cdot\log(E_{bottom}(E_{in})/E_{top}(E_{in}))$ として計算しました。 $ER(E_{in})$ の値は、それぞれ下部コアの場合は正、上部コアが優位な場合は負になります。スイッチングの最も重要な特性の1つはスイッチングコントラストです。これは、 $ER(E_{in})$ シリーズの2つの極端な正の値と負の値の差です。

消光比の入力パルスエネルギーへの依存性は、図6aに示されています。二重スイッチングの結果として、パルスエネルギーの単調増加で、 $ER(E_{in})$ の符号が正から負に2回変化します。エネルギーレベル0.89nJと2.62nJの間で最高のスイッチングコントラストを特定しました。スイッチングコントラストは16.7dBで、図6aでは垂直矢印で示されています。カメラ画像と同じ実験条件で、各コアの出力で2つのスペクトル、 $S_{bottom}(\lambda, E_{in})$ と $S_{top}(\lambda, E_{in})$ を個別に記録しました。次に、スペクトル分解消光比を $ER(\lambda, E_{in})=10\cdot\log(S_{bottom}(\lambda, E_{in})/S_{top}(\lambda, E_{in}))$ として計算しました。図6bは、 E_{in} の選択されたレベルでの入力パルスエネルギーに対する $ER(\lambda, E_{in})$ の依存性を示しています。これは、二重スイッチング動作のスペクトルの詳細を示しています。パルスエネルギー

を0.71nJ(黒の点線)から3.14nJ(黒の実線)に増加させると、全体的な非線形スイッチング傾向が明らかになります。これらのレベルは、図5に示すカメラ登録中に印加されたパルスの最小および最大エネルギーにほぼ対応しています。図6bの対応する2つの $ER(\lambda, E_{in})$ 曲線は、1720nmと1740nmの間の領域を除いて、正のセクションと負のセクションの間で十分に分離されています。したがって、これらは、図6aの対応するカメラデータと同じグローバルスイッチング動作を示しています。つまり、それぞれ、低エネルギーで正のER値、高エネルギーで負のER値です。図6bの挿入図は、印加パルスエネルギーが最大3.14nJの場合の上部コアのスペクトルを示しています。この最大パルスエネルギーが印加されると、スイッチングが最も広い登録済みスペクトル帯域幅をカバーすることがわかります。

さらに、図6bでは二重スイッチング動作が明らかです。ここでは、1.44nJと2.05nJの中間パルスエネルギーでの $ER(\lambda)$ 曲線も示されています。第一スイッチ、バックスイッチ、および第二スイッチステップは、対応する曲線の間に矢印でマークされています。これらは連続した順序で報告され、常に E_{in} が増加する方向に向いています。エネルギー範囲0.71nJ~1.44nJでの最初のスイッチングはかなり説得力があります。高エネルギー曲線は低エネルギー曲線の下にあり、ほとんどが負の消光比セクションにあります。

エネルギー範囲1.44~2.05nJでのバックスイッチングステップも、1700nm付近と低強度ウィングでの例外を除いて、適切な特性を持っています。2回目のスイッチング(エネルギー範囲2.05~3.14nJ)の場合でも、高エネルギー曲線は低エネルギー曲線よりもほぼ完全に下に位置し、それぞれ負のセクションと正のセクションで大きな変位が見られます。したがって、消光比のスペクトルプロファイルは、カメラ登録によって最初に観察された二重スイッチング動作も確認しています。測定されたスペクトルの結果は、16.7dBのレベルであったカメラデータよりも低いグローバルスイッチングコントラスト値を示しています。2つの黒い曲線(0.71, 3.14nJ)間のスペクトル分解ERの差は、10dBのレベルで最大になります。ただし、別々に登録されている間に $S_{bottom}(\lambda, E_{in})$ と $S_{top}(\lambda, E_{in})$ に異なる影響を与える色収差のために、スペクトル測定がより歪んでいることは明らかです。さらに、スペクトルは、連続して記録された2つのエネルギー依存スペクトルシリーズ間のOPAの出力変動によっても影響を受けました。これらは、装置の記録部分全体を再調整した後、2つの出力チャネルに対して別々に取得されました。したがって、上記の歪みのないIRカメラの結果は、積分スイッチングコントラストの評価に適しています。歪みのない実験条件の場合、さらに説得力のあるスペクトル結果と、スペクトル分解されたスイッチングコントラストのより高い値が確実に期待できます。説明した欠点にもかかわらず、スペクトル結果は、観察された新しいスイッチングパフォーマンスの広帯域特性を説得力を持って明らかにしました。損失の測定平均値が $0.008\pm 0.001\text{dB/mm}$ であり、ファイバー長が35mmであることを考慮すると、ファイバー損失の影響は無視できることも言及する価値があります。

一般的な観点から、非線形スイッチングの観察された特性は、以前の研究と比較していくつかの利点があります。まず、積分エネルギースイッチングコントラストの値が16.7dBであり、これはDCFベースの非線形カップラーの場合にこれまで観察された最高の値です[1,10]。次に、スペクトル登録により、スイッチング性能が広帯域特性を持つこ

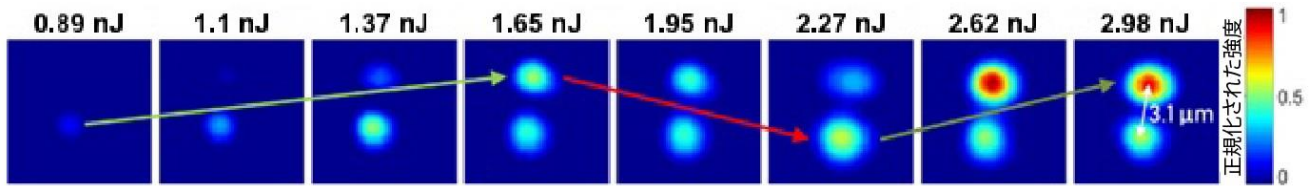


図 5. 1700nm、100fs 入力パルスの異なるエネルギーにおけるデュアルコア ファイバーの出力の赤外線カメラ画像。画像のスケールは、右側の画像の白い矢印で示されています。

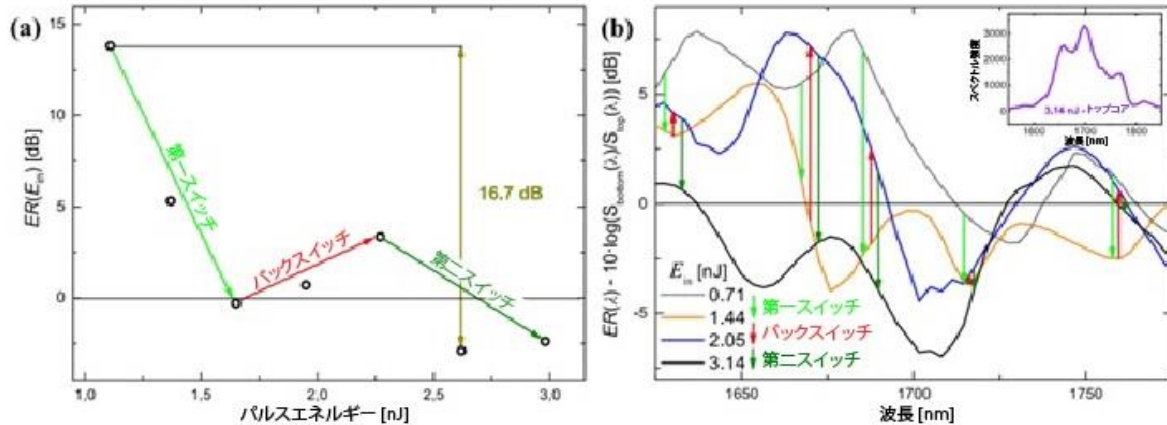


図 6.(a) 図 5 のカメラデータを処理して取得したデュアルコア消光比の入力パルスエネルギー依存性。(b) 選択したパルスエネルギーでのスペクトル分解消光比 λ の曲線。 $S_{bottom}(\lambda)$ と $S_{top}(\lambda)$ は、カメラ画像と同じ実験条件下で両方のコアに対して個別に記録されました。3 つの矢印(緑、赤、オリーブ)は、それぞれ異なるスペクトル領域の対応する曲線間の第一スイッチ、バックスイッチ、および第二スイッチステップを示します。3.14nJ のパルスエネルギーの場合に記録され、上部コアから収集されたスペクトルが挿入図に示されています。(この図の凡例の色に関する説明の解釈については、この記事の Web ページを参照してください。)

とが示されました。最後に、これは、カメラとスペクトル登録によって同時に DCF の場合の二重スイッチング動作の最初の実証です。過去には、有意なスイッチングコントラストは、非線形に広がったスペクトルの限られた領域でのみ観察されました[11,16]。したがって、ここで提示された結果は、アプリケーションの観点から重要な重要性を持っています。これらは、理論研究で予測されているように、入力パルスを分割することなく非線形空間変換するソリトン伝播レジーム効果を示しています[21,22]。ただし、これまで、この広帯域スイッチング特性は、異常なスペクトル領域での DCF ベースのカップラーの場合に実証されたことはありません。得られた結果に基づいて、ソリトン伝播の概念は以下の発見によって裏付けられます。

(a) 励起波長は DCF 異常分散領域の中央でした。(b) パルスエネルギーは、50%の結合効率を考慮すると、1nJ 前後とかなり中程度でした。(c) ダブルスイッチングは、3 つのステップすべてで広帯域特性を示しました。(d) 最も高いパルスエネルギーを適用した場合でも、スペクトルの広がりや滑らかさは中程度で、スペクトルは滑らかでした。これらすべての観察結果は、研究された実験条件下で低次のソリトンパルスが発生し、2 つのチャンネル間でのパルスの方向転換が可能になったことを示しています。もちろん、アプリケーションの可能性とソリトン状態は、2 つの出力チャンネルの個別の時間領域診断によって確認する必要があります。最近のスペクトル記録から、この目標を達成するには、ソースの出力安定性と記録光学スキームの両方を改善する必要があることは明らかです。提示された複雑な増幅器-OPA システムの代わりに発振器ベースのソースを使用すれば、出力安定性の探求は管理可能です。ただし、1700nm 波長で利用できる超高速発振器はありません。したがって、C バンドで実証された伝搬モードを確立するためには、ファイバーの設計を変更する必要があります。最も重要なのは、デュアルコアの非対称性を改善することです。これは、波長が短くなるとスイッチング性能に悪影響を与えるためです[16]。

しかし、観測されたエネルギー依存性特性は、これまでの実験研究とも、古典的な非線形方向性結合器理論とも異なることはすでに述べておきましょう。この理論は、デュアルコア対称性の非線形歪みによる単一スイッチングのみに基づいているため、パルスエネルギーの単

調増加下での高コントラストの広帯域二重スイッチングを説明できません[24]。このようなプロセスは、研究対象のファイバーの場合、1700nm で 5mm である L_c のとき、まさに最も効果的であるはずである。しかし、現在の実験結果では、 L_c の 7 倍である 35mm のファイバー長で優れたスイッチング性能が明らかになっています。もう 1 つの興味深い効果は、二重スイッチング動作が、短いファイバーと長いファイバーの両方で順次消えていくことです。実際、長さ 25mm または 45mm ではスイッチング効果は記録されていません。提示された観察の 1 つの可能な解釈は、高次ソリトンのスイッチング可能な自己トラッピングであり、これは広帯域特性と高レベルのスイッチングコントラストを約束します[15,25]。同様の六角形コア DCF の数値研究の枠組みの中で、1700nm の励起波長を考慮して、高コントラストスイッチングに適した 32mm の同等の最適ファイバー長を得ました[22]。ただし、スイッチングエネルギーに関しては、数値予測と実験結果の間にいくつかの矛盾があります。自己トラッピングソリトン伝播レジームが発生すると予測されるサブ nJ 範囲に対して大幅に高いパルスエネルギーでの最初のスイッチングを実証しました。もう 1 つの未解決の問題は、実際の DCF カプラの場合に常に存在するデュアルコア非対称性の役割です。その影響は、前述の理論的研究[21]では取り上げられていませんでした。より多くの理論的な概念を組み合わせると、二重スイッチングの最初のステップはデュアルコア非対称性の非線形除去[16,26]に基づいており、2 番目のステップはソリトンの自己トラッピング[15,25]に基づいている可能性があります。この概念は、ボトムコア励起および同一の実験条件の場合の実験観察によって裏付けられています。その場合、単一のスイッチング動作のみが観察されました。したがって、実際の DCF 構造に基づいて数値シミュレーションを開始する動機があり、これには本質的に非対称効果も組み込まれます。ただし、このような複雑な研究はすでに上記の実験作業の範囲を超えており、さらなる入力が必要です。

4.まとめ

本稿では、ソリトン伝播領域における特殊なデュアルコアファイバーで、フェムト秒パルスの効率的な非線形自己スイッチングを実験的に実証しました。このファイバーの特徴は、意図的に開発された、屈折率コントラストが 0.4 レベルの熱的に整合された 2 つの軟質ガラスの組み合わせです。低パルスエネルギー範囲で想定されるスイッチング性能のためにファイバー構造を最適化しました。そのマイクロディメンションコアは、高度に非線形なガラスで作られています。複雑なカットバック研究の枠組みの中で、実験調査により、1700nm、100fs 励起パルスを使用して、最適な 35mm ファイバー長で新しいスイッチング性能が得られました。2 つの出力チャネルのカメラとスペクトルの両方の登録により、二重スイッチング動作が確認されました。全体的なスイッチングコントラストは 16.7dB レベルでした。これは、0.89nJ と 2.62nJ のポンパルスエネルギーに対するカメラの消光比から計算されました。さらに、処理されたスペクトル曲線はスイッチングの広帯域特性を明らかにし、全光信号処理の分野で高い応用可能性を秘めています。得られた結果は、高いスイッチングコントラスト、広帯域スイッチング特性、および二重スイッチング動作を明らかにしており、以前の実験研究と比較して大きな進歩を示しています。これらの成果は、同様の条件での理論研究によって予測されていたソリトン自己トラッピングに基づく特別なスイッチング原理の初の実現を示しています。今後、専用の数値シミュレーションと、改善された実験条件での出力フィールドの時間領域研究の両方によって、この新しい現象のさらなる体系的な調査を計画しています。

利益相反の申告

著者らは、本論文で報告された研究に影響を及ぼす可能性のある、競合する金銭的利益や個人的な関係は存在しないことを宣言します。

謝辞

この研究は、ポーランド国立科学センター（プロジェクト番号 2016/23/P/ST7/02233、POLONEZ プログラム、マリー・スクウォドフスカ・キュリー助成契約番号 665778 に基づく欧州連合のホライズン 2020 研究イノベーションプログラムから資金提供を受けている）(I.B., M.L., D.P., R.B.)、スロバキア研究開発庁（契約番号 APVV-17-0662 および SK-AT-2017-0026）(I.B., F.U.)、オーストリア機関 OeAD（契約番号 SK02_2018）(I.A., A.P., A.B.)、Łukasiewicz Research Network—Institute of Electronic Materials Technology の内部助成金（番号 S510-1024-19）(I.B., M.L., I.A.A.P. および A.B.) は、オーストリア研究振興機構 FFG (EurostarsEureka プロジェクト番号 12576HABRIA、FFG プロジェクト番号 867822) およびオーストリア科学基金 FWF (P27577-N27) の財政的支援に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] A. Betlej, S. Sunstov, K.G. Makris, L. Jankovic, D.N. Christodoulides, G.I. Stegeman, J. Fini, R.T. Bise, D.J. DiGiovanni, All-optical switching and multifrequency generation in a dual-core photonic crystal fiber, *Opt. Lett.* 31 (2006) 1480, <http://dx.doi.org/10.1364/OL.31.001480>.
- [2] A.G. Coelho Jr., M.B.C. Costa, A.C. Ferreira, M.G. da Silva, M.L. Lyra, A.S.B. Sombra, Realization of all-optical logic gates in a triangular triple-core photonic crystal fiber, *J. Lightwave Technol.* 31 (5) (2013) 731–739, <https://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?uri=jlt-31-5-731>.
- [3] C.C. Lee, P.K.A. Wai, H.Y. Tam, L. Xu, C. Wu, 10-Gb/s Wavelength transparent optically controlled buffer using photonic-crystal-fiber-based nonlinear optical loop mirror, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 19 (2007) 898–900, <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2007.897472>.
- [4] S. Trillo, E.M. Wright, G.I. Stegeman, S. Wabnitz, Soliton switching in fiber nonlinear directional couplers, *Opt. Lett.* 13 (1988) 672, <http://dx.doi.org/10.1364/OL.13.000672>.
- [5] Youfa Wang, Wenfeng Wang, Nonlinear optical pulse coupling dynamics, *J. Lightwave Technol.* 24 (2006) 2458–2464, <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2006.874552>.
- [6] A.H. Arnous, S.A. Mahmood, M. Younis, Dynamics of optical solitons in dualcore fibers via two integration schemes, *Superlattices Microstruct.* 106 (2017) 156–162, <http://dx.doi.org/10.1016/J.SPMI.2017.03.044>.

- [7] J. Hu, Y.-P. Huang, P. Kumar, Self-stabilized quantum optical fredkin gate, *Opt. Lett.* 38 (2013) 522, <http://dx.doi.org/10.1364/OL.38.000522>.
- [8] H.C. Nguyen, D.-I. Yeom, E.C. Mägi, L.B. Fu, B.T. Kuhlmeier, C. Martijn de Sterke, B.J. Eggleton, Nonlinear long-period gratings in as₂se₃ chalcogenide fiber for all-optical switching, *Appl. Phys. Lett.* 92 (2008) 101127, <http://dx.doi.org/10.1063/1.2898213>.
- [9] L. Wang, J. Zeng, L. Zhu, D. Yang, Q. Zhang, P. Zhang, X. Wang, S. Dai, Alloptical switching in long-period fiber grating with highly nonlinear chalcogenide fibers, *Appl. Opt.* 57 (2018) 10044, <http://dx.doi.org/10.1364/AO.57.010044>.
- [10] S.R. Friberg, A.M. Weiner, Y. Silberberg, B.G. Sfez, P.S. Smith, Femtosecond switching in a dual-core-fiber nonlinear coupler, *Opt. Lett.* 13 (1988) 904, <http://dx.doi.org/10.1364/OL.13.000904>.
- [11] P. Stajanca, D. Pysz, G. Andriukaitis, T. Balciunas, G. Fan, A. Baltuska, I. Bugar, Ultrafast multi-wavelength switch based on dynamics of spectrally-shifted solitons in a dual-core photonic crystal fiber, *Opt. Express* 22 (2014) 31092, <http://dx.doi.org/10.1364/OE.22.031092>.
- [12] Y.S. Kivshar, M.L. Quiroga-Teixeiro, Influence of cross-phase modulation on soliton switching in nonlinear optical fibers, *Opt. Lett.* 18 (1993) 980, <http://dx.doi.org/10.1364/OL.18.000980>.
- [13] B.A. Malomed, A variety of dynamical settings in dual-core nonlinear fibers, in: *Handb. Opt. Fibers*, Springer, Singapore, 2018, pp. 1–54, http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-1477-2_70-1.
- [14] J. Herrmann, U. Griebner, N. Zhavoronkov, A. Husakou, D. Nickel, J.C. Knight, W.J. Wadsworth, P.S. Russell, G. Korn, Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers, *Phys. Rev. Lett.* 88 (2002) 1739011–1739014, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.173901>.
- [15] P. Stajanca, I. Bugar, Nonlinear ultrafast switching based on soliton self-trapping in dual-core photonic crystal fibre, *Laser Phys. Lett.* 13 (2016) 116201, <http://dx.doi.org/10.1088/1612-2011/13/11/116201>.
- [16] L. Curilla, I. Astrauskas, A. Pugžlys, P. Stajanca, D. Pysz, F. Uherek, A. Baltuska, I. Bugar, Nonlinear performance of asymmetric coupler based on dualcore photonic crystal fiber: Towards sub-nanojoule solitonic ultrafast all-optical switching, *Opt. Fiber Technol.* 42 (2018) 39–49, <http://dx.doi.org/10.1016/j.yofte.2018.02.020>.
- [17] X. Feng, T. Monro, P. Petropoulos, V. Finazzi, D. Hewak, Solid microstructured optical fiber, *Opt. Express* 11 (2003) 2225, <http://dx.doi.org/10.1364/OE.11.002225>.
- [18] M. Klimczak, B. Siwicki, P. Skibiński, D. Pysz, R. Stępień, A. Heidt, C. Radzewicz, R. Buczyński, Coherent supercontinuum generation up to 23µm in all-solid softglass photonic crystal fibers with flat all-normal dispersion, *Opt. Express* 22 (2014) 18824, <http://dx.doi.org/10.1364/OE.22.018824>.
- [19] J. Cimek, R. Stępień, G. Stępniewski, B. Siwicki, P. Stafiej, M. Klimczak, D. Pysz, R. Buczyński, High contrast glasses for all-solid fibers fabrication, *Opt. Mater. (Amst)* 62 (2016) 159–163, <http://dx.doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2016.09.061>.
- [20] I.M. Uzunov, R. Muschall, M. Göllés, Y.S. Kivshar, B.A. Malomed, F. Lederer, Pulse switching in nonlinear fiber directional couplers, *Phys. Rev. E* 51 (1995) 2527–2537, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.51.2527>.
- [21] M. Longobucco, J. Cimek, L. Čurilla, D. Pysz, R. Buczyński, I. Bugár, All-optical switching based on soliton self-trapping in dual-core high-contrast optical fibre, *Opt. Fiber Technol.* 51 (2019) 48–58, <http://dx.doi.org/10.1016/J.YOFTE.2019.04.009>.
- [22] M. Longobucco, P. Stajanca, L. Čurilla, R. Buczyński, I. Bugár, Applicable ultrafast all-optical switching by soliton self-trapping in high index contrast dualcore fibre, *Laser Phys. Lett.* 17 (2020) 025102, <http://dx.doi.org/10.1088/16122202X/ab63d8>.
- [23] R. Buczyński, H.T. Bookey, D. Pysz, R. Stępień, I. Kujawa, J.E. McCarthy, A.J. Waddie, A.K. Kar, M.R. Taghizadeh, Supercontinuum generation up to 2.5µm in photonic crystal fiber made of lead-bismuth-galate glass, *Laser Phys. Lett.* 7 (2010) 666–672, <http://dx.doi.org/10.1002/lapl.201010039>.
- [24] G.P. Agrawal, *Fiber couplers*, in: *Appl. Nonlinear Fiber Opt.*, Academic Press, 2008, pp. 54–99, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-012374302-2.50003-6>.
- [25] S. Minardi, F. Eilenberger, Y.V. Kartashov, A. Szameit, U. Röpke, J. Kobelke, K. Schuster, H. Bartelt, S. Nolte, L. Torner, F. Lederer, A. Tünnermann, T. Pertsch, Three-dimensional light bullets in arrays of waveguides, *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010) 263901, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.263901>.
- [26] S. Trillo, S. Wabnitz, Nonlinear nonreciprocity in a coherent mismatched directional coupler, *Appl. Phys. Lett.* 49 (1986) 752–754, <http://dx.doi.org/10.1063/1.97536>.

