

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月17日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760326

研究課題名（和文） ダークパルスの精密合成とその非線形光学応用

研究課題名（英文） Precise dark pulse synthesis and its nonlinear applications

研究代表者

柏木 謙 (KASHIWAGI KEN)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：10509730

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、周波数軸上での強度・位相変調による光パルス合成技術を利用して、ダークパルス、特にダークソリトンの合成とその非線形光学応用について検討を進めた。

まずは、光パルス合成が可能な素子である光パルスシンセサイザを用いて、ダークパルスを高精度に生成する技術を開発した。続いて、光パルスシンセサイザで合成したダークソリトンを正常分散ファイバに伝搬させて、理論通りの光強度でソリトン伝搬することを実験的に示した。さらには、高強度では高次ソリトン圧縮によりパルス幅が減少すると共にスペクトルが拡大することを確認した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we generated dark pulses, especially dark solitons, by line-by-line intensity and phase modulation in frequency domain. We investigated their fiber transmission and optical nonlinear characteristics.

We developed a technique to precisely synthesize dark pulses using an optical pulse synthesizer. We transmitted the dark solitons through a normal dispersion fiber and experimentally confirmed that their soliton transmission power matched with the theory. In the high power regime, the pulse was compressed and spectrally broadened due to the higher order soliton compression.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：光パルス合成、光パルスシンセサイザ、ダークパルス、光周波数コム、光学非線形

1. 研究開始当初の背景

本研究課題では、ダークパルス、特にダークソリトンの合成と非線形光学応用について検討を進める。ダークパルスとはある一定の光強度背景中に強度がゼロとなる窪み部分のことを指し、このような形状から“ダーク”パルスと呼ばれる。それに対して、背景光強度がゼロで、光強度が凸状である通常のパルスを、ダークパルスに対して“ブライ”トパルスと呼ばれる。

ダークパルスは、ブライトパルスに対して、様々な優位性を持っているが、その特殊な形状から実際に発生することが困難であり、実験的な検討が不十分であった。

2. 研究の目的

本研究課題では、実験的にダークパルス、特にダークソリトンの特性を実験的に明らかにする。さらには、このような特殊波形を持つパルスの非線形光学応用について検討

する。そのために、研究代表者の開発してきた任意形状の光パルスが合成可能な光パルスシンセサイザを利用する(図 1)。光パルスシンセサイザは光の時間波形とスペクトルがフーリエ変換を通じて対応していることを原理として、周波数軸上で任意の光スペクトルを生成して、その結果として光の時間波形を合成するものである。この時、時間波形は強度波形だけではなく、位相波形も任意形状とすることができる。

従来はこのような手法を用いても精密にダークパルス・ダークソリトンを合成することができなかったため、まずは精密合成を目的とした。その後、ダークソリトンのファイバ伝搬特性の実験的な検討と非線形光学応用について検討する。

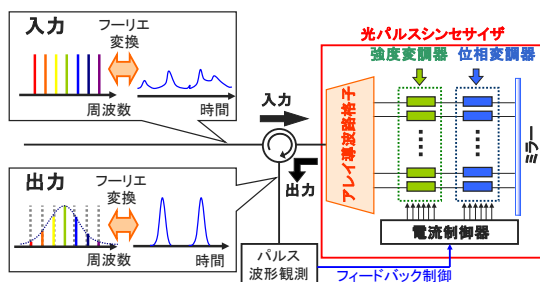


図 1 光パルス合成の模式図

3. 研究の方法

(1) 精密なダークパルス・ソリトンの合成

ダークパルス合成の研究では、ある幅を持つ太いブライツパルス中のダークパルスを主に利用していた。しかし、この方法ではブライツパルスのファイバ伝搬特性の影響を受けて、純粋なダークパルスの特性を観測することができない。研究代表者は通信波長帯での光パルス合成が可能な光パルスシンセサイザを用いて、精密な光パルス合成について検討を進めてきた。まずは、この手法を用いてダークパルスの精密に合成することを検討した。

ダークパルスの中でも特にダークソリトンは、パルスとなる窪みの前後で π 位相変化することが特徴で、このような特殊な波形であることから実際にパルスを合成することが困難であった。パルス合成は繰り返し波形を生成することから、図 2(a)のように繰り返し波形の端で π 位相シフトが発生してしまい、目標通りにダークソリトンのみを生成できなかった。そのため、研究代表者は、1つの繰り返し波形の中にダークソリトンを2つ合成することで、合計 2π の位相シフトにより、波形の連続性を確保することを考案し、精密にダークソリトンを生成することを可能とした(図 2(b))。これにより、純粋にダークソリトンのみのファイバ伝搬の影響を観測することが可能となった。

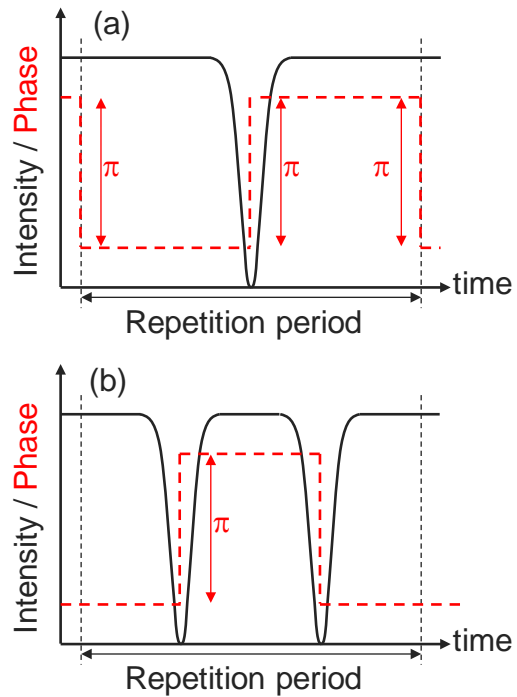


図 2 ダークソリトンの目標波形設定

(2) ダークソリトンの正常分散ファイバ中のソリトン伝搬の観測

(1)で精密に生成したダークソリトンを正常分散ファイバ中に伝搬させて、その出力波形の入力強度依存性を測定した。ソリトンパルスは、ある特定の強度で自身の起こす自己位相変調とファイバの分散の影響とが釣り合い、無歪み伝搬する。精密合成したダークソリトンのファイバ伝搬特性を、実験的に測定して、この理論と合致するかを調査した。この時、強度波形だけではなく、位相波形が維持されるかについても検討した。

4. 研究成果

(1) ダークパルスの精密合成

本研究課題で用いた実験系を図 3 に示す。中心波長 1540.7 nm のダークソリトンをパルス幅 10, 8, 6 ps で生成した。まず、単一周波数の光を 2 台の位相変調器で変調することで、12.5 GHz 間隔の光周波数コムを帯域幅 400 GHz で生成した。この光を光パルスシンセサイザに導入し、その出力波形を観測しながらフィードバック制御して、目標となるダークソリトンを生成した。ダークソリトンを 1 周期に 2 つ生成したため、繰り返し周波数は 25 GHz であった。図 4 は 10 ps 幅のダークソリトンの生成結果である。強度波形のコントラストも 20 dB 以上が得られ、スペクトルとともに目標通りのダークソリトンが得られたことを示している。

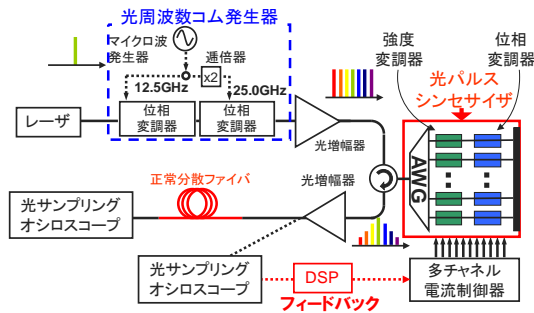


図3 ダークパルス合成とファイバ伝搬特性測定用の実験系

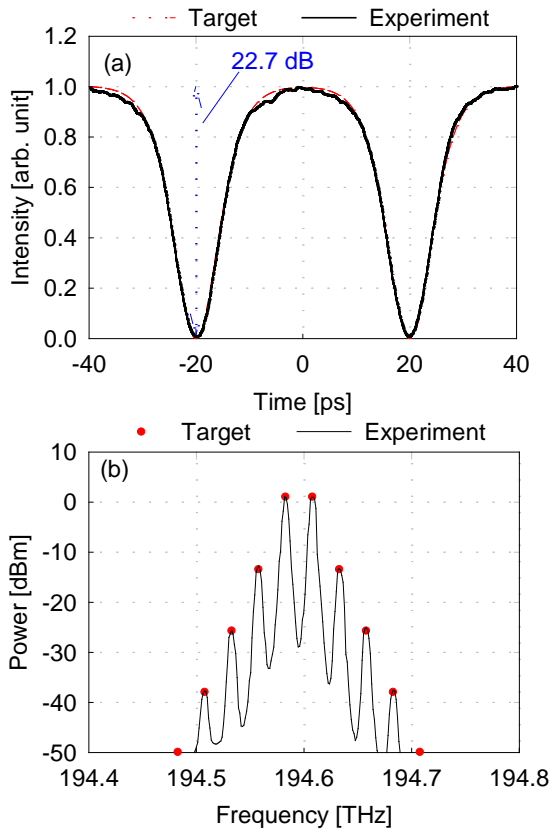


図4 10 ps 幅のダークパルス生成例
(a)強度波形, (b)スペクトル

(2)ダークソリトンの正常分散ファイバ中のソリトン伝搬の観測

(1)で生成したダークソリトンを正常分散ファイバ中に伝搬させて、ファイバ出力波形の入力強度依存性を測定した。幅 10 ps のダークソリトンのファイバ出力波形とスペクトルを図 5 に示す。同図には併せて入力パルスの波形とスペクトルピークについても示した。

パルスのピーク強度が 16.8 dBm である場合には、入力パルスと同様の波形とスペクトルが出力側で得られており、ソリトン伝搬していることがわかる。その強度より

も低い場合には、ファイバ分散の影響によりパルスが広がっている。逆にその強度よりも高い場合には、パルスが細くなっていることがわかる。このパルスの狭小化はブライツパルスと同様に、自己位相変調によるスペクトル拡大と正常分散ファイバによる分散補償による高次ソリトン圧縮によるものである。

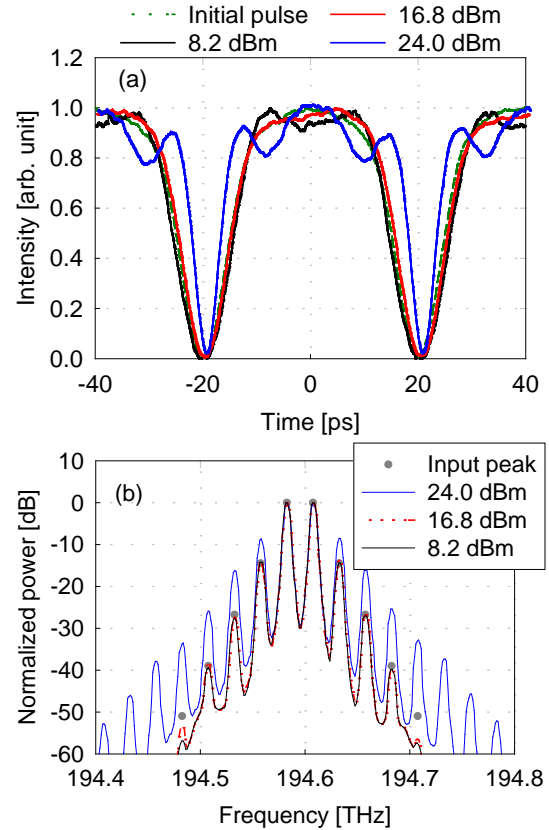


図5 ファイバ伝搬後の 10 ps 幅のダークソリトンの入力強度依存性(凡例はパルスのピーク強度を示す)
(a)強度波形, (b)光スペクトル

最後に、ダークソリトンの出力パルス幅の入力強度依存性を図 6 に示す。同図には併せて、ソリトン伝搬強度の理論値も示している。

幅 10, 8 ps の両方の場合で、強度が低い場合にはパルス幅が拡大し、強度が強くなるにつれてパルスが細くなっていることは、図 5 に示したことと同様である。そして、理論通りの強度でパルス幅が変化せずに伝搬しており、実験的にソリトン伝搬していることを示した。また、強度は系だけではなく、位相波形についてもファイバ伝搬後でも維持されていることを確認している。

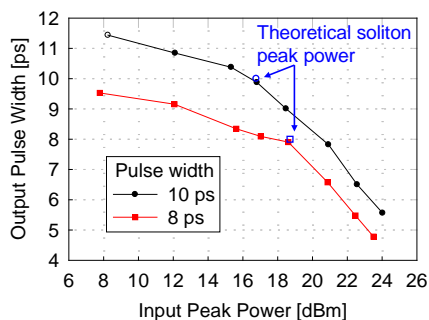


図 6 ファイバ伝搬後のパルス幅の入力強度依存性

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. Ken Kashiwagi, Hiroyuki Ishizu, Yuichiro Kodama, and Takashi Kurokawa, "Background suppression in synthesized pulse waveform by feedback control optimization for flatly broadened supercontinuum generation," *Optics Express*, Vol. 21, No. 3, pp. 3001-3009, 2013. 査読有り DOI:10.1364/OE.21.003001
2. Samuel Choi, Ken Kashiwagi, Yosuke Kasuya, Shuto Kojima, Tatsutoshi Shioda, and Takashi Kurokawa, "Multi-gigahertz frequency comb-based interferometry using frequency-variable supercontinuum generated by optical pulse synthesizer," *Optics Express*, Vol. 20, No. 25, pp. 27820-27829, 2012. 査読有り DOI:10.1364/OE.20.027820
3. Weifan Qiao, Kiyonobu Mozawa, Ken Kashiwagi, Yosuke Tanaka, and Takashi Kurokawa, "Fiber Transmission Characteristics of Phase Only Pulse and Its Dispersion Compensation in High Power Regime," *IEICE Electronics Express*, Vol. 9, No. 5, pp. 410-415, 2012. 査読有り DOI: 10.1587/elex.9.410
4. Ken Kashiwagi, Hiroyuki Ishizu, and Takashi Kurokawa, "Fiber Transmission Characteristics of Parabolic Pulses Generated by Optical Pulse Synthesizer," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 50, No. 9, pp. 092501, 2011. 査読有り DOI: 10.1143/JJAP.50.092501
5. Weifan Qiao, Kiyonobu Mozawa, Ken Kashiwagi, Yosuke Tanaka, Takashi

Kurokawa, "Generation of Phase Only Pulses Using Optical Pulse Synthesizer," *Applied Physics Express*, Vol. 4, No. 9, pp. 092703, 2011. 査読有り DOI: 10.1143/APEX.4.092703

[学会発表] (計 12 件)

1. 柏木謙, 黒川隆志, "光パルスシンセサイザを用いたマルチギガヘルツコム発生とその応用," 招待講演 レーザー学会学術講演会 第 33 回年次大会, 姫路商工会議所/イーグレ姫路, 兵庫県, 2013 年 1 月 28 日.
2. 長谷川梓, 柏木謙, 黒川隆志, "非対称短光パルスの生成と時間レンズによる結像," *Optics & Photonics Japan 2012*, タワーホール船堀 東京, 2012 年 10 月 24 日.
3. Azusa Hasegawa, Kiyonobu Mozawa, Ken Kashiwagi, and Takashi Kurokawa, "Generation of Optical Short Pulses with Asymmetric Waveforms and Their Imaging with a Time Lens," In The 17th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2012), Busan Exhibition & Convention Center (BEXCO), Busan, Korea, 4th Jul. 2012.
4. Ken Kashiwagi, Weifan Qiao, Kiyonobu Mozawa, Yosuke Tanaka, and Takashi Kurokawa, "Fiber Transmission of High Power Phase Only Pulse and Its Dispersion Compensation," In The 17th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2012), Busan Exhibition & Convention Center (BEXCO), Busan, Korea, 4th Jul. 2012.
5. Ken Kashiwagi, Kiyonobu Mozawa, Yosuke Tanaka, and Takashi Kurokawa, "Dark Soliton Synthesis Using Optical Pulse Synthesizer and Soliton Transmission in Normal Dispersion Regime," In The Conference on Lasers and Electro Optics 2012 (CLEO 2012), San Jose Convention Center, San Jose, California USA, 7th May. 2012.
6. 小島崇人, 粕谷洋介, 柏木謙, 崔森悦, 黒川隆志, "中心周波数の異なる 2 つのコム光を用いた 3 次元形状計測," 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 2012 年 3 月 18 日.
7. 長谷川 梓, 茂澤 清信, 柏木謙, 黒川隆志, "非対称短光パルスの生成と時間レンズによる結像," 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 2012 年 3 月 16 日.
8. 茂澤 清信, 喬 維凡, 柏木謙, 田中 洋

介, 黒川 隆志, “光パルスシンセサイザによるダークソリトン合成とファイバ伝播特性,” 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 2012 年 3 月 16 日.

9. Kiyonobu Mozawa, Weifan Qiao, Ken Kashiwagi, Takashi Kurokawa, “Dark Soliton Generation using Optical Pulse Synthesizer, ” In The Conference on Lasers and Electro-Optics / Pacific Rim (CLEO/PR 2011), Sydney Convention Center, Sydney, Australia, 31st Aug. 2011.
10. Weifan Qiao, Kiyonobu Mozawa, Ken Kashiwagi, Yosuke Tanaka, and Takashi Kurokawa, “Generation of Phase Only Pulses and Their Fiber Transmission Characteristics ” In The Conference on Lasers and Electro-Optics / Pacific Rim (CLEO/PR 2011), Sydney Convention Center, Sydney, Australia, 30th Aug. 2011.
11. Takashi Kurokawa, and Ken Kashiwagi, “Optical Short Pulse Synthesis and Its Applications (Invited),” In The Conference on Lasers and Electro-Optics / Pacific Rim (CLEO/PR 2011), Sydney Convention Center, Sydney Australia, 30th Aug. 2011.
12. Ken Kashiwagi, Hiroyuki Ishizu, Yosuke Mizuno, and Takashi Kurokawa, “Optical Pulse Compression with Waveform Reshaping Using Pulse Synthesizer and Cascaded Fiber Pair,” In The Conference on Lasers and Electro-Optics / Pacific Rim (CLEO/PR 2011), Sydney Convention Center, Sydney Australia, 30th Aug. 2011.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柏木 謙 (KASHIWAGI KEN)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：10509730

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし