

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04056

研究課題名（和文）ファイバヒューズの発生伝搬を抑圧する方法の検討

研究課題名（英文）Suppression of both fiber fuse initiation and propagation

研究代表者

黒河 賢二（Kurokawa, Kenji）

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：60748458

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：パルス光入力により、既設光ファイバ伝送路を構成する単一モードファイバにおいてファイバヒューズを発生させず、かつ、万が一、発生してもファイバヒューズを伝搬不能にできることを明らかにした。具体的には、分散シフトファイバにおいて波長1.55 μm のパルス光を用い、ファイバヒューズ伝搬閾値の5倍以上である平均パワー6 Wにおいてファイバヒューズの発生ならびに伝搬の抑圧を実証した。そして、長さ1.1 kmの汎用単一モードファイバSMFにおいて波長1 μm のパルス光を用い、ファイバヒューズを抑圧した状態で平均入力パワー2 Wの光ファイバ給電を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ファイバヒューズはミクロンサイズの熱孤立波の伝搬現象であり、燃烧学が対象とする燃烧伝搬現象と類似している。今回の研究成果は、マイクロ燃烧学において発熱量の時間的変動が着火ならびに消炎に与える影響に関して1つの知見を与え得ると考える。

また、今回の成果により光ファイバ給電におけるファイバヒューズに起因した入力パワー制限が緩和できることから、災害による電源喪失時に通信ビル等から遠隔で通信装置やモニターカメラ等に供給可能な電力量の大幅な増加が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The research objective is to prevent fiber fuses from occurring when high input power is applied to single-mode fibers that make up existing optical fiber transmission lines, and, even if a fiber fuse does occur, it will not propagate. We demonstrated that the initiation and propagation of fiber fuses can be suppressed at an average power of 6 W, which is more than five times the fiber fuse propagation threshold, by using pulsed light with a wavelength of 1.55 μm in a dispersion-shifted fiber. Furthermore, using pulsed light with a wavelength of 1 μm in a 1.1 km long standard single-mode fiber (SMF), we achieved optical fiber power supply with an average input power of 2 W while suppressing fiber fuses.

研究分野：光通信

キーワード：ファイバヒューズ 伝搬抑圧 パルス光 光ファイバ給電 ハイパワー

1. 研究開始当初の背景

ファイバヒューズは、ファイバコアにおける局所的な温度上昇を起因として熱孤立波が発生し、光ファイバ内を光源側に向かって伝搬していく現象である[1, 2]。伝搬後のコアでは気泡の形成による恒久的な破壊が起こり、光が伝搬できなくなるという致命的な問題が発生する。ファイバヒューズは一度発生すると、入力パワーを伝搬閾値(ファイバヒューズ伝搬を維持する最低パワー)以下にしない限り伝搬が停止しない。従って、ファイバヒューズは、光伝送用光ファイバならびに光伝送路を構成する光増幅器等の光デバイスの破壊という大きな問題を引き起こす危険性を有している。このファイバヒューズの伝搬閾値は、既存の光伝送路に用いられている汎用型単一モードファイバ(SMF)や分散シフトファイバ(DSF)において波長 $1.55 \mu\text{m}$ で約 $1.2 \sim 1.5 \text{ W}$ と小さく、比較的低いパワーで問題が発生する。このファイバヒューズによる光ファイバへの入力パワーの制限は、益々増大する光通信伝送容量に対する制限をもたらすとともに、無線基地局への光ファイバ給電や防災用センサおよびモニターカメラへの光給電における入力パワー制限につながり、大きな問題となる。

これまでファイバヒューズへの対策として行われてきた研究は、①発生したファイバヒューズを停止させるファイバヒューズ停止用光学部品の研究[3]、②ファイバヒューズの発生を検知して光源をシャットダウンする方法の研究[4]、③伝搬閾値が高くファイバヒューズが発生しにくい光ファイバの研究[5, 6]、に分類することができる。①と②についてはファイバヒューズが発生した後の対処法であり、③については、空孔を有する特殊なファイバ構造のため伝送路用ファイバとしてはコストが高くなるという問題があった。すなわち、従来の研究においては、特殊なファイバではなく既存の光伝送路に用いられている単一モードファイバにおいてファイバヒューズを発生させない方法についての報告例がなかった。最近、研究代表者らは、入力光を強度変調することにより SMF においてファイバヒューズの発生を抑圧できることを明らかにしていた[7]。

2. 研究の目的

本研究の目的は、防災用のモニターカメラや各種 IOT センサへの光ファイバ給電等に伴う光ファイバ内パワーの増大時において、ファイバヒューズの発生伝搬による恒久的な破壊を避けることができる安全な光ファイバ伝送路を提供することである。具体的には、既設の光ファイバ伝送路を構成する単一モードファイバにおいて、ファイバヒューズ発生を抑圧可能な入力光強度変調法をさらに拡張し、光パルスを入力光として用いることにより、高入力時にファイバヒューズを発生させず、かつ、万が一、発生した場合でもファイバヒューズを伝搬させない技術を確認することである。

3. 研究の方法

本研究では、以下の3項目について検討を行った。まず、入力光が1波長のパルス光である場合におけるファイバヒューズの発生抑圧ならびに伝搬抑圧条件の検討を行った。次に、波長多重(WDM)システムへの応用を念頭においた入力光が2波長の場合におけるファイバヒューズの発生抑圧ならびに伝搬抑圧条件を検討した。そして、入力光にパルス光を用いたファイバヒューズ抑圧型光ファイバ給電の検討を実施した。

4. 研究成果

(1) パルス光によるファイバヒューズの発生抑圧ならびに伝搬抑圧の検討[8]

図1に実験系を示す。光源には波長 $1.55 \mu\text{m}$ のファブリペローLDを用い、AO変調器によりデューティ比 0.5 の矩形波パルス光を発生した。パルス光をエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)で増幅した後、DSFに入射した。まず、パルス光入力によるファイバヒューズの伝搬抑圧特性の検討を以下のようにして行った。最初に、ファンクションジェネレータの出力を off にすることにより連続(CW)光を入力した状態で融着接続機の電気放電によりファイバヒューズを発生させる。次に、ファイバヒューズがDSFを伝搬中にファンクションジェネレータの出力を on にすることにより、CW光からパルス光に変換し、パルス光に変換したことにより伝搬中のファイバヒューズが停止消滅するかどうかを確認する。パルス光の周期を変えて伝搬停止の有無を確認することにより、伝搬停止に必要な最小パルス周期を求めた。

図2に伝搬抑圧に必要な最小パルスオフ時間のパルス光平均入力パワーへの依存性を示す。ここで、デューティ比が 0.5 より、パルス

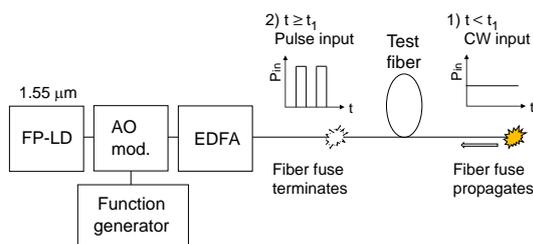


図1 ファイバヒューズ伝搬抑圧実験系

オフ時間はパルス周期の 1/2 となる。図 2 において白丸と黒四角は、それぞれファイバヒューズが停止した場合と停止しなかった場合を表している。図 2 より、平均入力パワーが 3.4 W の時には、パルスオフ時間が約 6 μs の矩形波パルス光を用いることによりファイバヒューズ伝搬が停止することがわかる。DSF のファイバヒューズ伝搬閾値が 1.1 W であることから、伝搬閾値の約 3 倍の平均入力パワーである 3.4 W においてもパルス光を用いることによりファイバヒューズ伝搬を抑圧できることがわかった。また、平均入力パワーが小さくなるにつれ、伝搬抑圧に必要なパルスオフ時間も小さくなることがわかった。伝搬停止のメカニズムは、以下のように考えられる。パルスオフ時間においては、入力光の吸収による発熱がなくなり熱伝導による放熱のみとなるため、ファイバヒューズの温度が低下する。そのため、パルスオフ時間が長くなるとファイバヒューズの温度低下が大きくなり、ファイバヒューズ伝搬を維持できなくなってしまう。また、平均入力パワーが小さくなると、CW 光入力時におけるファイバヒューズ温度も低くなるため、伝搬停止に必要なパルスオフ時間も小さくなると考えられる。

また、図 2 の白丸で示されたパルス光入力時において電気放電を用いたファイバヒューズの発生確率を測定したところ、平均入力パワーが 2.2, 2.8, 3.4 W のいずれにおいても 10 回の試行中 10 回ともファイバヒューズが発生しなかった。こうして、矩形波パルス光を用いることにより、DSF において平均入力パワー 3.4 W までファイバヒューズの発生のみならず伝搬も抑圧できることがわかった。

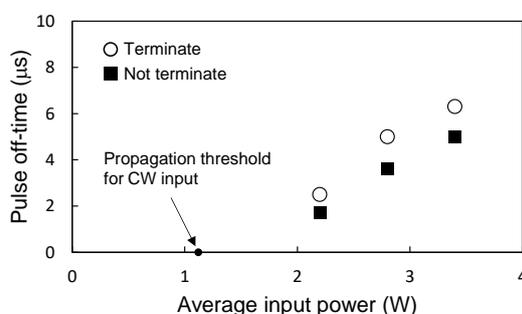


図 2 伝搬抑圧に必要な最小パルスオフ時間

(2) 2 波長入力におけるファイバヒューズ発生抑圧特性 [9]

2 波長の入力光のうち 1 波長を給電光として用い、もう 1 波長をセンサやモニターカメラとのやりとり用にする信号光とするシステムを念頭において検討を行った。装置の都合上、波長 1.48 μm の光を CW 光、波長 1.55 μm の光を光給電用の高出力矩形波パルス光とした。2 波長の光を WDM カプラで合波することにより強度変調光とし、テストファイバに入射した。強度変調光の消光比 r_e は、 $r_e = P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$ と定義される。ここで、 P_{max} と P_{min} は、それぞれ強度変調光の瞬時ピークパワーの最大値と最小値を表す。なお、 P_{min} は波長 1.48 μm の CW 光入力パワーとなる。図 3 に DSF におけるファイバヒューズ発生確率の消光比 (r_e) 依存性を示す。WDM 光の平均入力パワーは 2.2 W (黒丸) と 3.4 W (黒四角) であった。融着接続機の電気放電を用いたファイバヒューズ発生は確率的となるので、各消光比について 10 回ずつ試行し発生確率を求めた。入力パワーが 3.4 W の場合、 r_e が 1.9 のとき 10 回とも発生したので発生確率は 1 となった。 r_e が 1.9 から大きくなるにつれて発生確率が下がり、 r_e が 2.3 でファイバヒューズは一度も発生しなかった。したがって、DSF における入力パワーが 3.4 W の場合、2 波長 WDM システムにおいて消光比 r_e が 2.3 の強度変調によりファイバヒューズ発生を抑圧できることがわかった。入力パワーが 2.2 W の場合には、図 2 に示すように、発生抑圧に必要な消光比 r_e は 1.8 へと小さくなった。こうして DSF において 2 波長入力の場合でも、合計平均入力パワーが 3.4 W まで、パルス光を用いて発生抑圧が可能であることがわかった。SMF においても同様に発生抑圧が可能であることがわかった。

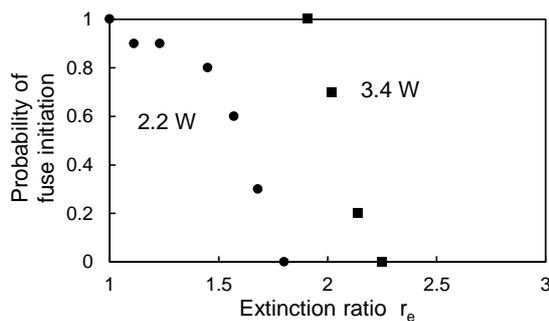


図 3 ファイバヒューズ発生確率の消光比依存性

(3) DSF における平均入力パワー 6 W でのファイバヒューズ伝搬抑圧 [10]

研究成果 (1) で述べた AO 変調器により発生するパルス光の場合、EDFA のパルスパターン効果により光パルス先端部にスパイク状ノイズが発生するため平均入力パワーを上げられないという問題が生じた。そこで、より高い平均入力パワーでの伝搬抑圧実験を実施可能とするため、LD の直接変調により、立ち上がり時間が遅く、デューティ比の大きいパルス光を発生させて実験に用いた。図 4 に LD の直接変調によるパルス光を用いた場合の伝搬停止に必要な最小パルスオフ時間の平均入力パワー依存性を示す。図 4

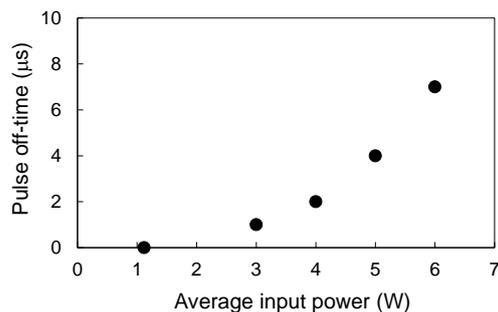


図 4 伝搬抑圧に必要な最小パルスオフ時間

より、伝搬停止に必要なパルスオフ時間が平均入力パワーの増加とともに長くなり、平均入力パワーが 6 W においてもパルスオフ時間を 7 μs とすることでファイバヒューズの伝搬を抑圧できることがわかった。以上の測定結果から、LD の直接変調により発生した矩形波状パルス光を用いることにより、DSF における連続光入力時の伝搬閾値である 1.1 W の 5 倍以上である平均入力パワー 6 W においてもファイバヒューズの伝搬を停止ができることがわかった。

さらに、波長 1.48 μm の CW 光と波長 1.55 μm の LD 直接変調によるパルス光の 2 波長入力において、波長 1.48 μm の CW 光パワーが 0.8 W のとき、平均パワー 4 W のパルス光のパルスオフ時間を 7 μs とすることにより、DSF を伝搬中のファイバヒューズを停止消滅できることがわかった。

(4) SMF における波長 1 μm 帯でのファイバヒューズ抑圧型光パワー伝送[11]

SMF における波長 1 μm 帯でのファイバヒューズ抑圧型光パワー伝送の検討を行うため、まず、ファイバヒューズ伝搬抑圧特性を測定した。波長 1 μm 帯の ASE 光源とバンドパスフィルタを用いて発生した CW 光を A0 変調器によりパルス化し、イッテルビウム添加光ファイバ増幅器を用いて平均パワー 2 W まで増幅した。パルス光のデューティ比は 0.5 であった。研究成果 (1) と同様に、CW 光入力状態でファイバヒューズを発生し、SMF を伝搬中にパルス化して伝搬停止に必要な最小パルス周期を求めた。図 5 に伝搬停止に必要な最小パルス周期の平均入力パワー依存性を示す。伝搬停止に必要なパルス周期は、平均入力パワーにほぼ比例して大きくなることがわかった。平均入力パワーが 2.0 W の時、伝搬停止に必要な最小パルス周期は 7.5 μs になることがわかった。

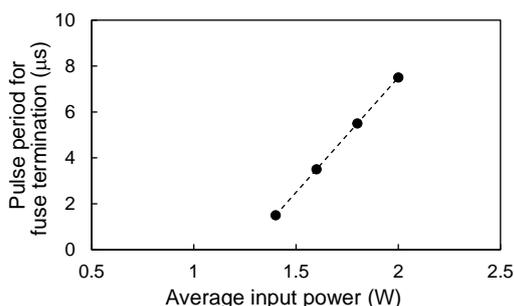


図 5 伝搬抑圧に必要な最小パルス周期

そこで、パルス周期が 7.5 μs で平均パワーが 2.0 W の矩形波パルス光を用いて長さ 1.1 km の SMF における光パワー伝送を行った。1.1 km 伝搬後の平均出力パワーは 1.66 W であった。SMF からの出力光を市販の光電変換器により電力変換した際の I-V 特性を図 6 に示す。光電変換により 230 mW の電力を得た。用いた光電変換器が波長 915–980 nm 用のものであったため、光電変換効率が約 14% と低い値であった。入力波長 1064 nm に適した光電変換器の使用によりさらに高い変換効率が期待できる。こうして、ファイバヒューズを抑圧した状態で SMF における波長 1 μm 帯での光パワー伝送を実現できることがわかった。

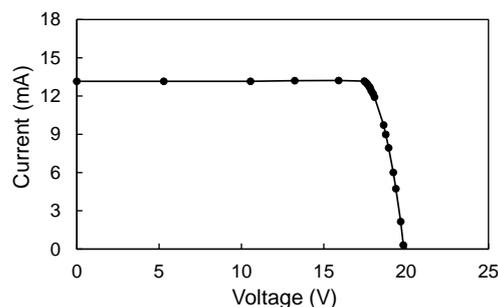


図 6 SMF 出力光の光電変換時 I-V 特性

<引用文献>

- 1) R. Kashyap and K. J. Blow, "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres," *Electron. Lett.* vol.24, pp.47-49, 1988.
- 2) D.P. Hand and P.St.J. Russell, "Solitary thermal shock waves and optical damage in optical fibers: the fiber fuse," *Opt. Lett.*, vol.13, pp.767-769, 1988.
- 3) S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi, Y. Shuto, and R. Nagase, "Fiber fuse terminator," *Proc. Pacific Rim Conf. on Lasers and Electro-optics*, vol.1, p.386, 2013.
- 4) K. S. Abedin, M. Nakazawa, and T. Miyazaki, "Backreflected radiation due to a propagating fiber fuse," *Opt. Express*, vol.17, pp.6525-6531, 2009.
- 5) E. M. Dianov, I. A. Bufetov, A. A. Frolov, Y. K. Chamorovsky, G. A. Ivanov, and I. L. Vorobjev, "Fiber fuse effect in microstructured fibers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.16, pp.180-181, 2004.
- 6) K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki, and H. Tsuchiya, "Fiber fuse phenomenon in hole-assisted fibers," *Proc. ECOC2008*, P.1.14, 2008.
- 7) S. Ishikawa, K. Kurokawa, N. Hanzawa, T. Matsui, and K. Nakajima, "Suppression of fiber fuse initiation by amplitude modulation of input light," *Microoptics conference P-28*, 2019.
- 8) K Kurokawa and D. Shimokura, "Termination of fiber fuse propagation using optical

- pulses,” Microoptics conference P0-1, 2021.
- 9) 小熊 崇也、下倉 大輝、黒河 賢二、WDM システムにおける入力光強度変調によるファイバビ
ューズ発生抑圧、電子情報通信学会論文誌 B、vol. J105-B、pp. 307-309、2022.
 - 10) M. Koga and K. Kurokawa, “Termination of fiber fuse propagation in DSF at 6 W
input using optical pulses,” 電気学会 電子・情報・システム部門大会、SS1-2、2022.
 - 11) M. Ono, K. Kurokawa, M. Wada, K. Ohmoto, T. Matsui, K. Nakajima, “Optical power
delivery with suppressed fiber fuse in SMF at a wavelength of 1 μm ,” Proc. ICETC,
P1-5, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 大野 雅浩、黒河 賢二	4. 巻 J107-B
2. 論文標題 波長1 μmパルス光を用いたSMFにおけるファイバビュース伝搬抑圧	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B 通信	6. 最初と最後の頁 226 ~ 229
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transcomj.2023GWL0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ono Masahiro, Kurokawa Kenji, Wada Masaki, Omoto Kouhei, Matsui Takashi, Nakajima Kazuhide	4. 巻 13
2. 論文標題 Optical power delivery with suppressed fiber fuse in standard single mode fiber at a wavelength of 1064 nm	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	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） 10.23919/comex.2024TCL0009	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 -

1. 著者名 小熊 崇也、下倉 大輝、黒河 賢二	4. 巻 J105-B
2. 論文標題 WDMシステムにおける入力光強度変調によるファイバビュース発生抑圧	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B 通信	6. 最初と最後の頁 307 ~ 309
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transcomj.2021GWL0002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 M. Ono, K. Kurokawa, M. Wada, K. Ohmoto, T. Matsui, K. Nakajima
2. 発表標題 Optical power delivery with suppressed fiber fuse in SMF at a wavelength of 1 μm
3. 学会等名 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Wada, K. Kurokawa, T. Matsui, H. Iida, and K. Nakajima
2. 発表標題 High-Efficiency and Long-Distance Power-over-Fibre Transmission using a 125- μ m Cladding Diameter 4-Core Fibre
3. 学会等名 European Conference on Optical Communications (ECOC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masaya Koga, Kenji Kurokawa
2. 発表標題 Termination of fiber fuse propagation in DSF at 6 W input using optical pulses
3. 学会等名 電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takaya Oguma, Daiki Shimokura, Kenji Kurokawa
2. 発表標題 Suppression of fiber fuse initiation by AM of input light in a WDM system
3. 学会等名 電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Kurokawa, Daiki Shimokura
2. 発表標題 Termination of fiber fuse propagation using optical pulses
3. 学会等名 MICROOPTICS CONFERENCE(MOC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Kurokawa, Hiroyuki Iida, Nobutomo Hanzawa, Takaya Oguma, Yoko Yamashita, Takayoshi Mori, Takashi Matsui, Kazuhide Nakajima
2. 発表標題 Stimulated Raman Scattering and Power-over-Fiber Property of Multi-core Fiber
3. 学会等名 Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小熊崇也 飯田裕之 黒河賢二 半澤信智 山下陽子 松井隆 中島和秀
2. 発表標題 4 コアファイバを用いた光パワー伝送の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
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
---------	---------