

ファイバヒューズ抑圧法の研究

代表研究者

黒河 賢二

北見工業大学工学部 教授

1 はじめに

ファイバヒューズ現象とは、数 W の高パワーが入力されている光ファイバが局所的に加熱されることでプラズマが発生し、それが光源に向かって伝搬していく現象のことである[1, 2]。一度ファイバヒューズ現象が起こると、光源を停止するか、または伝搬閾値（ファイバヒューズが伝搬し得る最低の光パワー）以下に入力パワーを低下させない限りファイバヒューズは伝搬し続ける。さらに、ファイバヒューズが発生し伝搬した後はコア内に弾丸型の気泡が形成されるため、光パワーを伝送することが出来なくなる。光通信に用いられている従来型の単一モードファイバである SMF や分散シフトファイバ (DSF) の伝搬閾値は、波長 1.55 μm で約 1.2~1.4 W と報告されている。今後も増大し続けるとされるネットワークトラフィックにより、光ファイバに入力される光のパワーが伝搬閾値を超えることが予想され、ファイバヒューズの発生が危惧されている。

ファイバヒューズの対策について種々の方法が提案されている。その一つとして、伝送路中で発生したファイバヒューズを停止するための光ファイバ型デバイスが挙げられる。テーパ型光ファイバ[3]や TEC (Thermally diffused Expanded Core) 型光ファイバ[4]、あるいは、従来型のマルチモードファイバの 1 つであるグレーデッドインデックスファイバ (GIF) [5]を用いたファイバヒューズ停止部品が作成され、入力パワーが 2 W 程度においてファイバヒューズを停止できることが報告されている。また、伝搬するファイバヒューズからの後方散乱光を検出すること[6]、あるいは、ファイバヒューズが放つ可視光をファイバ外部に設置した受光器によってモニターすること[7]により、ファイバヒューズの発生を検知し速やかに光源を遮断する方式も報告されている。一方、光ファイバの断面内に空孔を有するフォトニック結晶ファイバ(PCF)や空孔アシストファイバ(HAF)では、ファイバヒューズの伝搬閾値が SMF と比較して非常に大きな値になることが報告されている[8-10]。その特長を活かし、HAF を用いたファイバヒューズ停止部品が作成され、高いファイバヒューズ抑圧力を持つことが報告されている[11]。しかしながら、これまで SMF において入力パワーが十分高い時にファイバヒューズの発生自体を抑圧する方法についての報告例はない。

本研究では、まず、入力光を振幅変調することにより SMF においてファイバヒューズが発生することを抑圧するという新しいファイバヒューズ抑圧方法について検討を行った。次に、市販のマルチモードファイバを用いたファイバヒューズ停止部品、特に GIF より基本モードのモードフィールド径 (MFD) の大きなステップ型マルチモードファイバ (SIF) を用いた停止部品について検討を行った。

2 振幅変調によるファイバヒューズの発生抑圧

高入力時に光源の振幅変調によりファイバヒューズの発生を抑圧する方法について基本的な検討を行った。図 1 に実験系を示す。光源は波長 1.55 μm のファブリペローLD であり、ファンクションジェネレータを用い

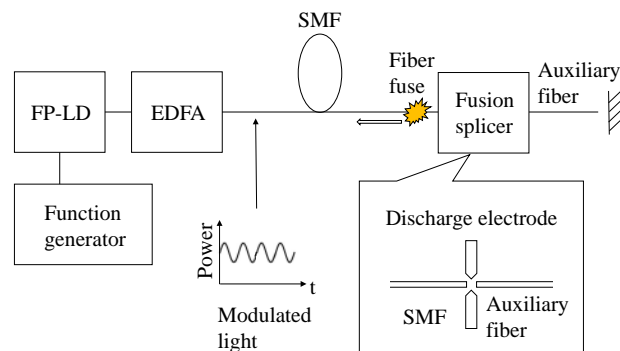


図 1. 実験系

て正弦波変調を加えた。変調周波数は 100 kHz であった。変調光はエルビウム光ファイバ増幅器 (EDFA) で増幅され、SMF に入力された。波長 1.55 μm における SMF の MFD は 10.2 μm であった。ファイバヒューズは、再現性が良く定量的な評価に適している融着接続機の電気放電を用いて発生させた。平均入力パワーは 5 W であった。SMF から的高出力光による融着接続機の損傷を防ぐために、補助ファイバとして GIF を用いた。

図 2(a) に変調光の消光比 r_e が 1.2 の場合における EDFA への入力光波形を示す。ここで消光比 r_e は、 $r_e = P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$ で定義される。但し、図 1(a) に示すように、 P_{max} と P_{min} は、それぞれ変調光の最大パワーならびに最小パワーである。光波形はフォトダイオードを用いて測定した。図 2(b) は入力光の消光比 r_e が 1.2 の場合における EDFA からの出力光波形を示し、EDFA からの出力光の消光比が入力光の消光比と同じく $r_e=1.2$ となることがわかる。図 2(c) と (d) は、それぞれ EDFA からの出力光の消光比が 1.6 と 2.1 の場合の波形を示す。

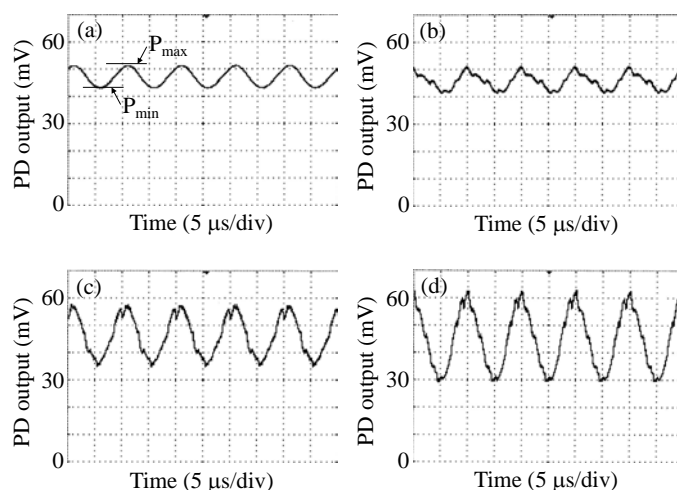


図 2. (a) EDFA 入力波形 ($r_e=1.2$ の場合), (b)–(d) EDFA 出力波形
(b), (c), (d) は、それぞれ $r_e=1.2, 1.6, 2.1$ の場合)

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であるので[12]、図 2(b), (c), (d) に示される各消光比において各 10 回ファイバヒューズ発生の有無を測定し、発生確率を求めた。各消光比におけるファイバヒューズの発生確率を図 3 に示す。消光比が 1.2 の場合には、連続光の場合と同様に発生確率は 1 となるが、消光比が 1.6 と大きくなると発生確率は 0.6 に下がり、消光比が 2.1 まで大きくなると発生確率が 0 となりファイバヒューズが発生しなくなることがわかった。ここで、入力が連続光 (CW 光) の場合、入力パワーが 3.8 W 以上では必ずファイバヒューズが発生することがわかっている。今回の実験では、平均入力パワーは 5 W であり、3.8 W よりも十分大きな入力パワーとなっている。従って、本実験結果より光源の振幅変調によりファイバヒューズの発生を抑圧できることが明らかとなった[13]。

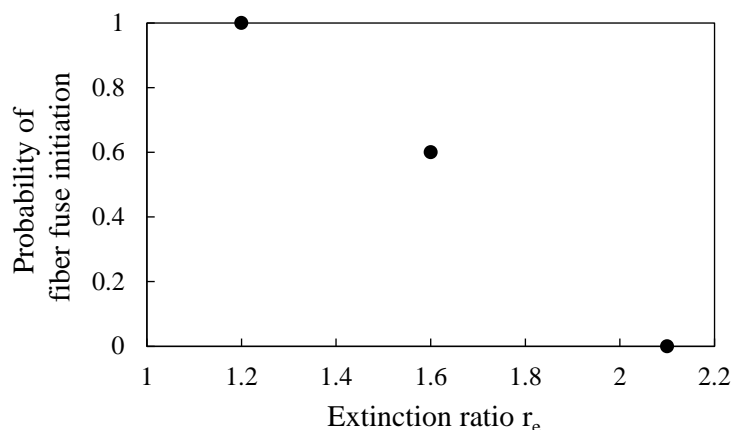


図 3. 消光比と発生確率の関係

3 ステップ型マルチモードファイバ（SIF）を用いたファイバヒューズ停止部品

SMF と SMF の間にステップインデックス型マルチモードファイバ（SIF）を挟むことにより、市販ファイバで構成されファイバヒューズ抑止力が高く低損失なファイバヒューズ停止部品について検討を行った。図 4 にファイバヒューズ停止部品の構成図を示す。ファイバヒューズ停止部品は SMF の間に市販の SIF を融着接続した構造となっている。今回用いた SMF の波長 $1.55 \mu\text{m}$ における MFD は $10.2 \mu\text{m}$ であり、SIF の基本モードの MFD は $38.0 \mu\text{m}$ である。なお、SIF の基本モードの MFD については文献 14 に記載の値を用いた。SMF を伝搬してきた光が SIF に中心軸を合わせた状態で入射した際、基本モードと高次モード $LP_{0,n}$ ($n=1, 2, \dots$) が励振されると考えられる。ファイバヒューズの伝搬閾値が MFD に比例すること [15, 16]、そして、SIF における主な励振モードの 1 つである基本モードの MFD が $38.0 \mu\text{m}$ と大きいことから、図 4 に示す SIF を用いたファイバヒューズ停止部品には高い抑止力を期待することができる。



図 4. ファイバヒューズ停止部品の構成図

次に、ファイバヒューズ停止部品の作成方法について述べる。

- 1) まず、SMF と SIF を融着接続する。
- 2) 次に、SIF を目標長に合わせて切断する。SIF の目標長については、モードフィールドアダプタに関する文献 14 の中に記載されている透過率のシミュレーション結果に基づき決定した。図 5 にシミュレーション結果のグラフを示す。横軸が SIF の長さを表し、縦軸が透過率を表す。図 5 より SIF 長が約 10.2 mm ($10200 \mu\text{m}$) の時、透過率が 0.9 以上となることがわかる。そこで、SIF 長の目標値を 10.2 mm とした。目標長にそった SIF の切断に関しては、光ファイバカッターに付属した切断長のスケールを用いて目視により行った。

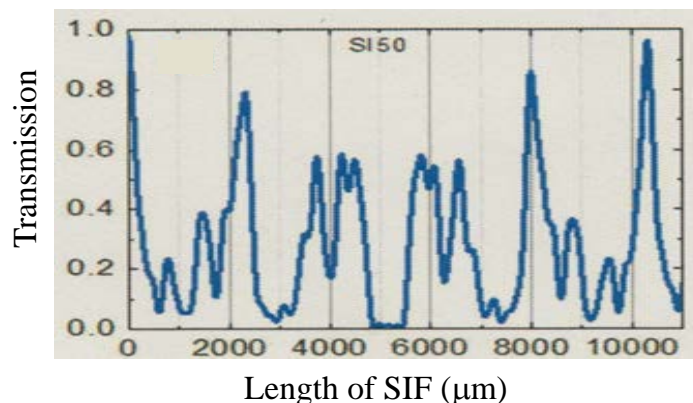


図 5. SIF 長に対する停止部品の透過率のシミュレーション結果 文献[14]より

- 3) 切断した SIF と SMF を融着接続する。作成した停止部品の透過率を CW 光源と光パワーメータを用いて測定する。

作成したファイバヒューズ停止部品の波長 $1.55 \mu\text{m}$ における透過率の SIF 長依存性を図 6 に示す。図 6 より、実際に作成したファイバヒューズ停止部品の透過率は SIF 長が約 10.1 mm で最大となり、最大値は約 0.9 であった。そして、その前後で透過率が急激に下がることがわかった。作成した停止部品の SIF 長はデジタルマイクロスコープを用いて計測を行った。この計測における測定精度は 0.1 mm 程度であった。従って、透過率が最大となる SIF 長については、図 5 に示すシミュレーション結果とほぼ一致することがわかった。

また、図 5 に示す透過率のシミュレーション結果は、SIF 長が 0 から約 10.2 mm の範囲を 1 周期として SIF 長に対して周期的に変化すると考えられる。したがって、図 6 において SIF 長が 12.4 mm 近辺で観測された

透過率 0.52 の点は、図 5 において SIF 長が約 2300 μm のピーク付近に対応していると考えられる。また、図 6 において SIF 長が約 12.7 mm の時透過率が低いのは、図 5 において SIF 長が約 2500~3000 μm の領域で透過率が低いことに対応していると考えられる。

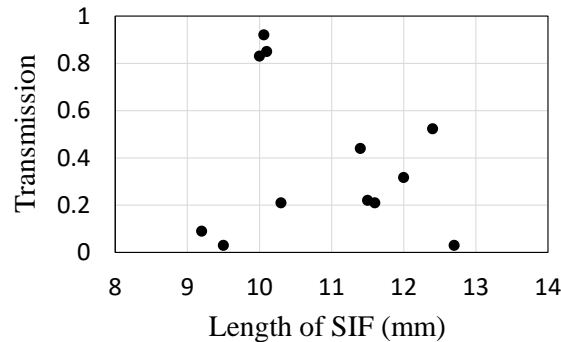


図 6. 作成した停止部品の透過率の SIF 長依存性

作成したファイバヒューズ停止部品を用いてファイバヒューズの停止を確認するための実験系を図 7 に示す。光源には波長 1.55 μm の CW ファイバレーザを用いた。ファイバヒューズは融着接続機の電気放電を用いて発生させた。なお、ファイバヒューズを発生させる際に SMF から出射する高出力光により融着接続機が損傷するのを防ぐために、補助ファイバを用いて SMF からの出射光を遮光板へと導いた。入力パワーについては、停止部品を構成する SIF 内でのパワーが 6W となるように調整を行った。

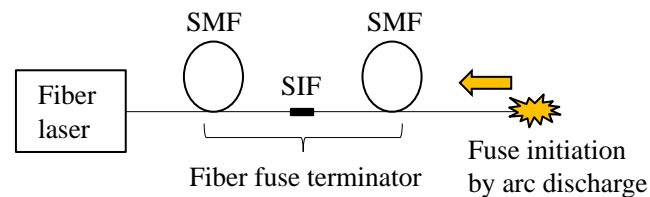


図 7. 停止部品を用いてファイバヒューズの停止を確認するための実験系

ファイバヒューズ停止部品を構成する SIF 内のパワーが 6W の時、ファイバヒューズが SIF 内で停止することを確認した。図 8 にファイバヒューズが停止した位置の顕微鏡写真を示す。ファイバヒューズは図 8 の右から左に向かって SIF 内を伝搬し、SIF と SMF との融着接続点から約 2.9 mm の位置で停止した。停止位置近辺に大きな気泡が形成されている様子が見られる。これまで TEC 型光ファイバや GIF を用いたファイバヒューズ停止部品において入力パワーが 2 W 程度の時ファイバヒューズが停止することが確認されていたが、SIF を用いたファイバヒューズ停止部品ではその約 3 倍高い入力パワーである 6 W においてファイバヒューズの停止を確認することができた[17]。

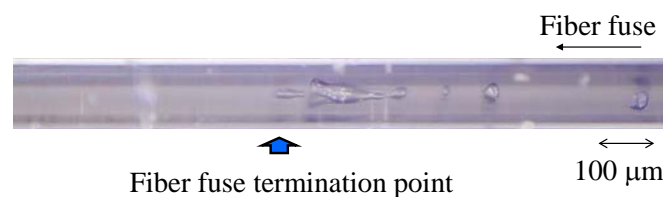


図 8. SIF 内でファイバヒューズが停止した位置の顕微鏡写真

4 まとめ

本研究では、まず、入力光を振幅変調することにより SMF においてファイバヒューズが発生することを抑圧するという新しいファイバヒューズ抑圧方法について検討を行った。次に、市販のマルチモードファイバであるステップ型マルチモードファイバ (SIF) を用いたファイバヒューズ停止部品について検討を行った。

高入力時に光源の振幅変調によりファイバヒューズの発生を抑圧する方法についての基本的な検討の結果、平均入力パワーが同じであるにも関わらず正弦波変調光の消光比に依存してファイバヒューズの発生確率が変化することが明らかとなった。そして、入力光波長が $1.55 \mu\text{m}$ で入力平均パワーが 5 W の時、周波数 100 kHz の正弦波変調光の消光比が 2.1 において SMF におけるファイバヒューズ発生を抑圧できることがわかった。今後、振幅変調によりファイバヒューズ発生を抑圧するための条件についてより詳細な検討を進めていく予定である。

市販のマルチモードファイバ SIF を用いたファイバヒューズ停止部品の検討については、シミュレーションに基づいた SIF 長の精密な制御により、入力パワー 6 W においてファイバヒューズを停止可能な低損失停止部品の作成に成功した。従来の停止部品の動作パワーは 2 W 程度であるので約 3 倍まで能力を高めることができることがわかった。

【参考文献】

- [1] R. Kashyap and K. J. Blow, "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibre," *Electron. Lett.*, vol.24, no.1, pp.47-49, Jan, 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, no.9, pp.767-769, Sep. 1988.
- [3] D. P. Hand and T. A. Birks, "Single-mode tapers as 'fiber fuse' damage circuit-breakers," *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 1, pp. 33-34, Jan, 1989.
- [4] 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, 2003.
- [5] 藤田 仁, 森下裕一, "GI ファイバによるファイバヒューズの遮断," 2004 信学ソ大, no.B-10-5, p.234, 2004.
- [6] K.S. Abedin, M. Nakazawa, T. Miyazaki, "Backreflected radiation due to a propagating fiber fuse", *Opt. Express*, vol. 17, no. 8, pp. 6525-6531, 2009.
- [7] T. Kinoshita, N. Sato and M. Yamada, "Detection and termination system for optical fiber fuse," *Proc. OptoElectronics and Commun. Conf.*, paper WS4-6, 2013.
- [8] 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, Jan. 2004.
- [9] K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki, and H. Tsuchiya, "Fiber fuse phenomenon in hole-assisted fibers," *Proc. European Conf. and Exhib. on Optical Commun.*, paper P.1.14, 2008.
- [10] N. Hanzawa, K. Kurokawa, K. Tsujikawa, T. Matsui, K. Nakajima, S. Tomita, and M. Tsubokawa, "Suppression of fiber fuse propagation in hole assisted fiber and photonic crystal fiber," *IEEE J. of Lightwave Technol.*, vol. 28, no. 15, pp. 2115-2120, Aug. 2010.
- [11] K. Kurokawa and N. Hanzawa, "Suppression of fiber fuse propagation and its break in compact fiber fuse terminator," *Proc. OptoElectronics and Commun. Conf.*, paper WS4-5, 2013.
- [12] S. Todoroki, "Quantitative evaluation of fiber fuse initiation with exposure to arc discharge provided by a fusion splicer," *Sci. Rep.*, **6**, 25366, (2016).
- [13] S. Ishikawa, K. Kurokawa, N. Hanzawa, T. Matsui, and K. Nakajima, "Suppression of fiber fuse initiation by amplitude modulation of input light," *Proc. Microoptics Conf.*, paper P-28, 2019.

- [14] P. Hohmann, A. Mafi, C. Jollivet, T. Tiess, N. Peyghambarian, and A. Schulzgen, "Detailed investigation of mode-field adapters utilizing multimode-interference in graded index fibers," *IEEE J. of Lightwave Technol.*, vol.30, no.14, pp.2289-2298, July, 2012.
- [15] N. Nishimura, K. Seo, M. Shiino, and R. Yuguchi, "Study of high-power endurance characteristics in optical fiber link", *Proc. Opt. Amp. and Appl.* paper TuC4, 2003.
- [16] K. Takenaga, S. Omori, R. Goto, S. Tanigawa, S. Matsuo, and K. Himeno, "Evaluation of high-power endurance of bend-insensitive fibers," *Proc. Optical Fiber Commun. Conf.*, paper JWA11, 2008.
- [17] S. Furuya and K. Kurokawa, "Fiber fuse terminator consisting of a step-index multimode fiber," *Proc. Microoptics Conf.*, paper P-62, 2019.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Suppression of fiber fuse propagation and its break in compact fiber fuse terminator	24th Microoptics Conference (MOC2019)	2019年11月
Fiber fuse terminator consisting of a step-index multimode fiber	24th Microoptics Conference (MOC2019)	2019年11月
Fiber fuse terminator consisting of a step-index multimode fiber spliced with SMFs	IEICE Communications Express	2020年掲載予定