

ファイバフューズ: 光通信にとっての眠れる悪魔

(独) 物質・材料研究機構
轟 眞市

1 はじめに

1970 年の 20 dB/km の損失を有する光ファイバの実現 [1] が現行の光通信技術の原点であることは本連載の第 1 回 [2] にも述べられているが、その開発の原動力になったのは、1966 年に発表された Kao 博士 (2009 年ノーベル物理学賞受賞) の予言 [3] である。オームの法則 (あるいはジュールの法則) によって減衰してしまう銅線中の電気信号よりも、もっと遠くに*1 銅線に沿って進む電気信号や空間を進む電磁波よりも、もっと大容量で信号を飛ばすには、光信号を高純度化したガラス繊維に通せば良い。

あれから 40 年以上経過した現在、光信号がガラスを発熱させる現象が、今後の光通信技術の発展に陰を落としている。ファイバフューズと呼ばれる現象 [4, 5, 28] で、一旦発生すると光ファイバを長距離に渡って破壊し続けることから、それが持続しうる条件まで光を注入する場合には、細心の注意を払った運用が不可欠となる。本連載の第 13 回 [6] にある通り、ワット級の光を扱うラマン増幅技術を採用した 10G-DWDM システムが 2004 年から運用されていることを考えれば、ファイバフューズが現実の脅威となりつつあることはご理解いただけると思う。

本稿は、この現象が発生・持続する条件を概観した上で、その対策として考えられていることをまとめる。

2 現象

光の減衰を究極にまで低減した通信用光ファイバであっても、外的要因によって光吸収体に変化する場合が

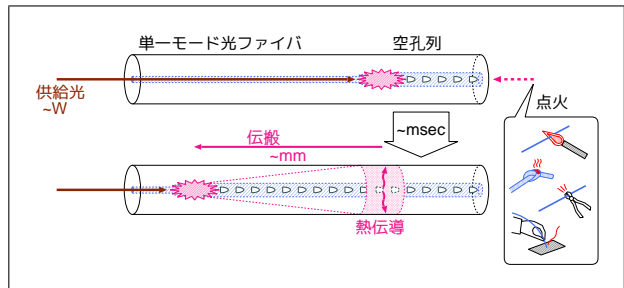


図 1 ファイバフューズと熱の伝搬速度の違い。

ある。数 W 程度の光を送っている回線の途中を局部的に加熱すると (図 1 右の囲み参照)、シリカガラスの熱分解生成物 (主に SiO₂) が伝送光を吸収して発熱し、それが雪崩を打つように進行して、コア部分にプラズマが閉じ込められた状態に達する。このプラズマがその場に留まっていれば、じきにクラッドが融解して内圧が保てなくなり消滅する。しかし伝搬光の供給が続けば、プラズマはエネルギーが注入される方向に向かって移動していく。図 1 に即して説明すれば、コアからの熱がクラッド表面 (直径 125 μm) に拡散するまでの数ミリ秒の間に、プラズマは数 mm 進んでしまうのである。

ファイバフューズが他の光誘起損傷現象と異なっているのは、この損傷点が安定に移動することにある。それを可能にしているのは、熱拡散速度よりも早くプラズマが移動する条件が整っているからである。すなわち、熱伝導度の小さいガラス、しかも耐熱温度が高いシリカガラスで構成され、伝搬光のエネルギーが直径数 μm の領域に集中して供給され続けるからである。

このプラズマの移動はソリトンとして理解することもできるが、光パルスや津波のような輸送現象としての古典的ソリトンではなく、エネルギーや物質の入出力を伴う反応領域の移動である「散逸ソリトン」[8] と捉える

*1 2012 年 6 月 1 日修正

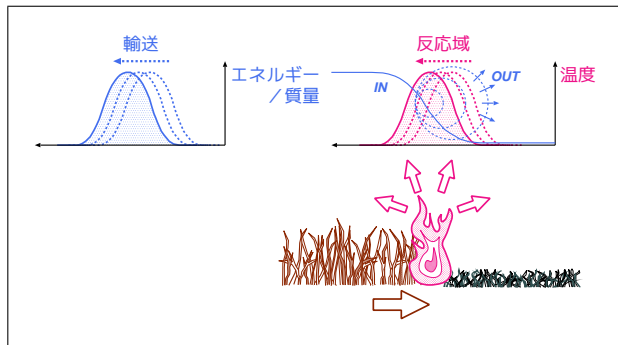


図2 古典的ソリトン(左)と散逸ソリトン(右)。

のが正しい(図2参照、野火も散逸ソリトン的一种である)。つまり、ファイバフェーズはその反応領域の形状が保たれるように、光と熱の入出力速度がバランスした状態で伝搬しているのである。

なお、フェーズから放出されるエネルギーは、熱伝導と輻射、およびプラズマからの発光が挙げられるが、コアの外に放射された光は反射や後方散乱で戻ってくる場合があり、それが再び吸収される自己ポンプ現象が確認されている[9]。具体的には、白色のナイロン心線(タイトバッファ、直径0.9 mm)中を伝搬するファイバフェーズは、同じ条件で光を注入した一次被覆(透明アクリル樹脂、直径0.25 mm)のみを施したファイバの場合よりも、自己ポンプされる分エネルギー状態が高くなる。

これら2つの場合における光伝搬の違いを、図3に示す。上に示した一次被覆のみの場合は、透明アクリル樹脂と空気の界面でフレネル反射する分だけが戻るに過ぎず、ファイバ軸方向に近い角度で放射された光は界面で全反射してフェーズから遠ざかってしまう。一方白色ナイロン心線の場合は、ファイバ軸方向を除いてどの方向に放射された光でもタイトバッファに到達し、その界面上にある白色顔料が可視光を散乱させるので、ある一定量の戻り光は必ず発生する。その戻り光がフェーズのエネルギーに戻されるルートは、プラズマ自体の光吸収やそれを取り囲むガラス融体中に含まれるシリカガラスの熱分解生成物による光吸収と考えられ、そのエネルギーが熱に変換される。

戻り光が発生する被覆条件として他に考えられるものに、リボンファイバにおける着色被覆やコネクタに用い

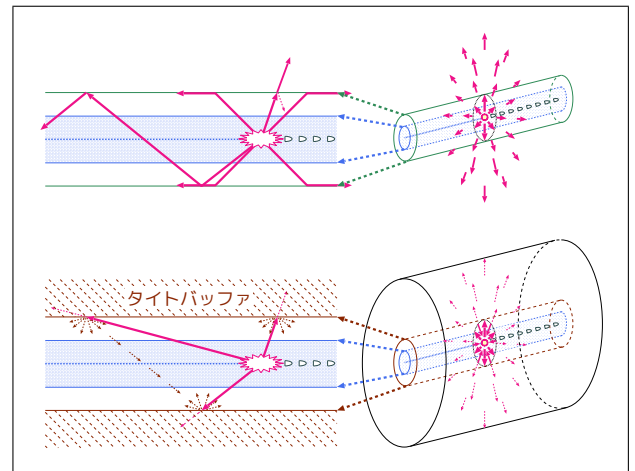


図3 タイトバッファ層の有無がもたらす発光伝搬経路の相違。

られるセラミックスフェルールがある。

3 伝搬条件

ファイバフェーズを伝搬させ続けることができる最小の光エネルギー(伝搬しきい値)は、主にファイバのモードフィールド径(MFD)と注入光の波長によって決まり[10, 11, 12]、さらにファイバの被覆状態によって変動する[9]。(ただし、ファイバ軸方向に孔が開いているホーリーファイバを除く。これについては第5.1節で取り扱う。)標準的な単一モード光ファイバ(SMF)の場合、おおむね1 W強と理解しておけば良い。

一般に、MFDが小さくなる程、波長が短くなる程、そして戻り光が多くなる程、伝搬しきい値は小さくなる。一例として、筆者が決定した伝搬しきい値を表1に示す。白色タイトバッファで被覆すると、約3%しきい値が低くなるのがわかる。

これまでも伝搬しきい値の報告例は多々あるが[11, 13, 14, 15]、相互に比較すると僅かに整合性を欠くところが見つかる。例えば、図4に示したSMFにおける伝

表1 Corning社 SMF-28e におけるファイバフェーズの伝搬しきい値[9]。

	波長	1310 nm	1480 nm
アクリル樹脂被覆(透明, 0.25 mmφ)		1.19 W	1.33 W
+ タイトバッファ(白色, 0.9 mmφ)		1.15 W	1.28 W

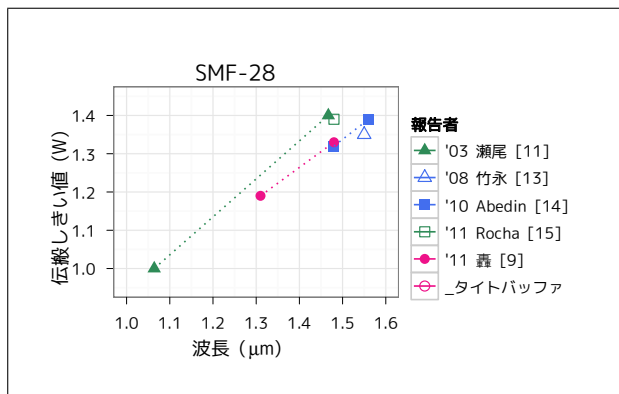


図4 伝搬しきい値 (SMF-28 の文献値) の波長依存性。

搬しきい値 (文献値) の波長依存性を見れば、0.1W 程度のばらつきがあることがわかる。これは、実験条件や決定方法が異なるためと考えられるが、そもそも伝搬しきい値に近づくとプラズマは不安定な状態になることも起因している。その顕著な例として挙げられるのは、しきい値付近で伝搬するフューズは融着点で再現性良く停止することである [9]。融着接続によって変動を受けた導波路構造を通過すると、プラズマの伝搬が維持できない状態に陥るのだと推察される。

この不安定性の存在を裏付ける証拠は、フューズが残す空孔列に記録されている。ファイバフューズの伝搬に伴う損傷の例として良く持ち出されるのは弾丸状の周期的空孔列だが、これは標準的な単一モード光ファイバの場合、注入光強度が 2 W 越えたときに現れる (図 5(a) 参照)。それ以下では周期性が失われるが (b)、1.3 W 付近で再び周期性が現れ (c)、さらに入力を絞ると一見不規則なパターンが現れる (d)[16]。

これは、(c) のパターンに「無空孔区間と細長い弾丸状空孔の対」が挿入されてできた構造であり、この伝搬状態を超高速カメラを用いてその場撮影すると、2 種類の伝搬モードが交互に現れていることが分かる [17]。また、注入光強度を絞りながらフューズを伝搬させると、無空孔区間の現れる割合が増えていき、最終的に自然停止するに至る [9]。すなわち、無空孔区間の出現頻度は、しきい値付近で伝搬するプラズマのエネルギー状態を示す尺度として使えるので、今後、伝搬しきい値を正確に定義する必要性がでてくれば、有用な情報となるであ

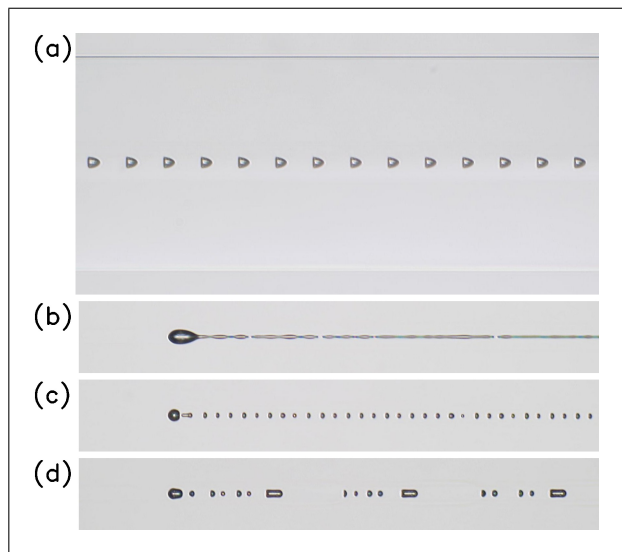


図5 ファイバフューズが通過した後の損傷の例。

ろう。

4 発生条件

伝搬しきい値以上の光を注入していても、ファイバフューズは再現性良く発生するとは限らない。第 2 節で述べた通り、プラズマが閉じ込められつつ熱拡散より速く移動できる条件が揃わないとフューズは飛び出してこない。経験上、注入光が弱くなるほど発生しにくくなる。よって、伝搬しきい値を決めるための実験では、まずフューズが発生しやすい条件で点火し、ただちに注入光強度を目的の値まで絞っていくことが行われる。この絞る速度の違いが、伝搬しきい値の正確性と関係すると考えられる。

一方、ファイバフューズが発生するのに必要な最小の光エネルギーをさまざまなファイバで調べた報告があり [18, 19]、おおむね 3 MW/cm² のパワー密度が必要と結論されている。

5 対策

考える方針は 2 つあり、ファイバフューズが発生・伝搬しにくい光ファイバを導入 (あるいは交換) すること、および発生しても線路の破壊を最小限に食い止める手段を講じることである。

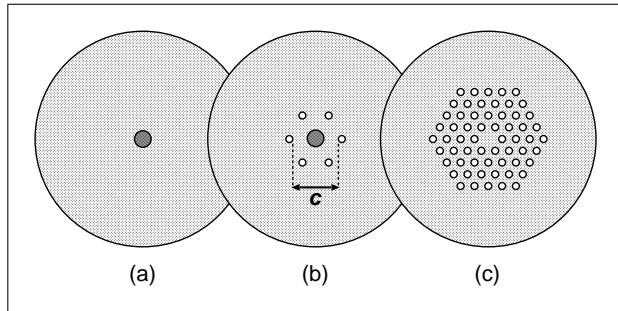


図6 ファイバの断面構造の例: (a) SMF, (b) HAF, (c) PCF.

5.1 フューズ耐性の向上

コアの周囲を空孔で囲んだ構造を有する光ファイバでは、ファイバフューズの伝搬や発生が困難であることが知られている [20, 21]。図 6(b) および (c) に示す様な、空孔アシストファイバ (HAF) やフォトニック結晶ファイバ (PCF) である。具体的には、SMF で発生させたフューズを融着接続した HAF や PCF に導く実験において、14 W (1.5 μm 帯) を注入しても融着点到達直後に停止してしまうことが報告されている [22]。ここから、これらのホーリーファイバにおける伝搬しきい値は、少なくとも SMF の場合よりも 1 桁大きいことがわかる。また、これらのファイバに通信波長帯の光を注入しつつ局所加熱してフューズを発生させた例は、筆者の知る範囲ではまだ報告されていない。

耐性が向上する理由として考えられるのは、プラズマを取り囲むガラス融液が空孔に接すると、内部の高い圧力を維持できなくなってプラズマが不安定化することである。実際、HAF における空孔領域の内接径 (図 6(b) における c) が大きすぎると、前節までに述べてきた SMF の場合と類似した伝搬挙動を示す [21] ので、融液層と空孔層との接触の有無が挙動の違いを生んでいると推察される。第 2 節で述べた散逸ソリトンの概念に基づけば、自由空間がクラッド (あるいは被覆) の外だけでなく内側にも出現したために、(プラズマを含む) 物質のフローバランスが SMF の場合より複雑になった、と捉えることができる。

5.2 フューズの停止法

今までに提案されたものは、大きく 2 種類に分類することができる。(1) 回線の途中に、伝搬しきい値の高い

区間、あるいは散逸ソリトンを不安定化させる区間を挿入する受動的手段、および (2) フューズの発生を検知して、それに対する光の供給源を停止あるいはその出力を伝搬しきい値以下に減衰させる能動的手段である。

前者において挿入するデバイスとしては、前項で述べたホーリーファイバの他に、局所的に MFD を拡大させた区間も利用できる [23]。ただし、どちらもフューズが停止できない条件が存在しうることに注意を払う必要がある。HAF の場合は c を適切に小さくする必要があるし、PCF や MFD 拡大区間の場合には伝搬しきい値を越える光入力には対応できない。

ファイバフューズの発生を検知するための監視対象として、次の 2 つが提案されている。信号光あるいはプローブ光の一部がファイバフューズ発生領域で反射されて戻ってくる現象 [14, 24]、およびフューズの通過に伴うファイバ心線表面の温度変化 [25] である。これらの検知信号を拾って自動パワー減衰 (APR) 機能 [26] を動作させれば良い。

5.3 応用

伝搬しきい値の大きいファイバの登場により、Power over Fiber 技術を併用した新しいアプリケーションの可能性が見えてくる。例えば、遠隔センサを光ファイバ回線のみで結び、センサの駆動エネルギーを光で送って遠隔側で光電変換し、センサからの電気信号を光信号として受けることが可能となる。既に、ラマン増幅のポンプ光をセンサの駆動エネルギーにも使う試み [27] が報告されているが、回線をホーリーファイバ化すれば、フューズ耐性のある現実的なシステムとなるであろう。

6 おわりに

1987 年に発見されたこの現象は、興味の対象が小さくかつ動きまわることが災いして、そのメカニズムについては長らく推察以上のことができないでいた。また、フューズが残す損傷形状の奇妙さに目を奪われて、その冷えて固まった形状とプラズマを取り囲む融液の状態を同一視する先入観に囚われた考察も散見された。その流れが変わったのは 2003 年以降である。計算機シミュレーションによるエネルギー入出力と伝搬の再現実験 ([7] 等)、および超高速ビデオカメラによるその場観察

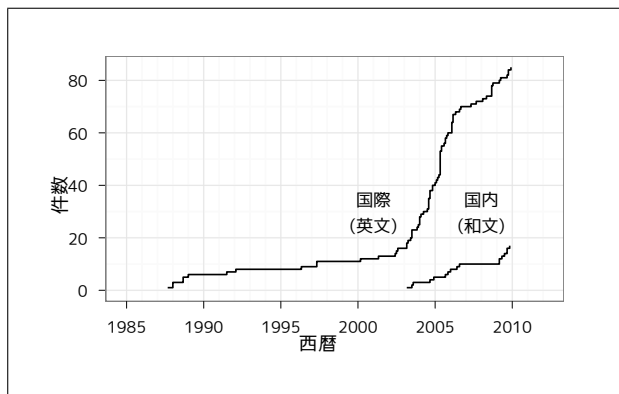


図7 ファイバフューズに関する論文数(口頭発表も含む)の推移。

出典: http://www.geocities.jp/tokyo_1406/node6.html

([16, 17] 等) によって、観測事実を合理的に説明できる材料が少しずつ積み上げられていった。

2003 年は日本人がファイバフューズ研究に参入し始めた年でもある。図7は現在までに発表された論文と口頭発表の累積数を和英別にプロットしたものである。英文文献の総数がやっと100を越えた程度の小さい研究コミュニティではあるが、ここ3年程、日本発の報告が数の上で優位に立っている。この光通信にとっての眠れる悪魔をもうしばらく寝かしておくための技術開発は、日本が牽引していく立場に十分あると考える。その目的のために、本稿や最近執筆した総説[28]、および拙作のファイバフューズ画像コレクション(<http://imeji.org/collections?q=todoroki>)が役に立つことを願って筆を置く。

参考文献

- [1] F. P. Kapron, D. B. Keck and R. D. Maurer: "Radiation losses in glass optical waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, **17**, 10, pp. 423–425 (1970).
- [2] 大橋 正治: "光ファイバ: 光ファイバの研究開発の歴史と今後の展開", *Optronics*, **30**, 1, pp. 173–180 (2011).
- [3] K. C. Kao and G. A. Hockham: "Dielectric-fibre surface waveguide for optical frequency", *Proc. Inst. Electr. Eng.*, **113**, 7, pp. 1151–1158 (1966).
- [4] R. Kashyap and K. J. Blow: "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres", *Electron. Lett.*, **24**, 1, pp. 47–49 (1988).
- [5] 光増幅器標準化委員会: "光増幅器 光ファイバフューズに関する一般情報", Technical report, (財) 光産業技術振興協会 (2010). (OITDA 規格 TP(技術資料)、英語題名: General information for optical fiber fuse).
- [6] 織田 一弘: "波長分割多重 (WDM) 技術", *Optronics*, **31**, 1, pp. 138–145 (2012).
- [7] Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi and R. Nagase: "Fiber fuse phenomenon in step-index single-mode optical fibers", *IEEE J. Quantum Electronics*, **40**, 8, pp. 1113–1121 (2004).
- [8] N. Akhmediev and A. Ankiewicz: "Dissipative solitons in the complex Ginzburg-Landau and Swift-Hohenberg equations", *Dissipative Solitons*, Vol. 661 of Lecture Notes in Physics, Springer-Verlag, Berlin, pp. 1–17 (2005).
- [9] S. Todoroki: "Threshold power reduction of fiber fuse propagation through a white tight-buffered single-mode optical fiber", *IEICE Electronics Express*, **8**, 23, pp. 1978–1982 (2011).
- [10] E. M. Dianov, I. A. Bufetov, A. A. Frolov, V. G. Plotnichenko, V. M. Mashinskii, M. F. Churbanov and G. E. Snopatin: "Catastrophic destruction of optical fibres of various composition caused by laser radiation", *Quantum Electron.*, **32**, 6, pp. 476–478 (2002).
- [11] 瀬尾 浩司, 西村 直也, 椎野 雅人, 湯口 廉一, 佐々木宏和: "光伝送路における耐ハイパワー特性の評価", *古河電工時報*, 112, pp. 15–20 (2003).
- [12] I. A. Bufetov and E. M. Dianov: "Optical discharge in optical fibers", *Physics-Uspekhi*, **48**, 1, pp. 91–94 (2005).
- [13] K. Takenaga, S. Omori, R. Goto, S. Tanigawa, S. Matsuo and K. Himeno: "Evaluation of high-power endurance of bend-insensitive fibers", *Proceedings of Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (2008)*. (JWA11).
- [14] K. S. Abedin, M. Nakazawa and T. Miyazaki: "Backreflected radiation due to a propagating fiber fuse", *Optics Express*, **17**, 8, pp. 6525–6531 (2009).
- [15] A. M. Rocha, F. Domingues, M. Facão and P. S. André: "Threshold power of fiber fuse effect for different types of optical fiber", the 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2011), Stockholm, Sweden, pp. 1457–1549 (2011). (Tu.P.13).
- [16] S. Todoroki: "Origin of periodic void formation during fiber fuse", *Optics Express*, **13**, 17, pp. 6381–6389 (2005).
- [17] S. Todoroki: "Transient propagation mode of fiber fuse leaving no voids", *Optics Express*, **13**, 23, pp. 9248–9256 (2005).
- [18] D. D. Davis, S. C. Mettler and D. J. DiGiovanni: "Experimental data on the fiber fuse", 27th Annual Boulder Dam-

- age Symposium: Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1995 (Eds. by H. E. Bennett, A. H. Guenther, M. R. Kozlowski, B. E. Newnam and M. J. Soileau), Vol. 2714 of SPIE Proceedings, SPIE, pp. 202–210 (1996). (Boulder, CO, USA, 30 Oct. 1995).
- [19] D. D. Davis, S. C. Mettler and D. J. DiGiovani: “A comparative evaluation of fiber fuse models”, Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1996 (Eds. by H. E. Bennett, A. H. Guenther, M. R. Kozlowski, B. E. Newnam and M. J. Soileau), Vol. 2966 of SPIE Proceedings, SPIE, pp. 592–606 (1997). (Boulder, CO, USA, 7 Oct 1996).
- [20] 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., **16**, 1, pp. 180–181 (2004).
- [21] K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki and H. Tsuchiya: “Fiber fuse phenomenon in hole-assisted fibers”, Proceedings of the 34th European Conference on Optical Communication, Vol. 5, pp. 27–28 (2008). (P.1.14).
- [22] 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”, J. Lightwave Technology, **28**, 15, pp. 2115–2120 (2010).
- [23] S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi, Y. Shuto and R. Naruse: “Fiber fuse terminator”, The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Vol. 1, p. 386 (2003). (W4J-(8)-6, Taipei, Taiwan, 22-26 Jul. 2003).
- [24] K. S. Abedin and M. Nakazawa: “Real time monitoring of a fiber fuse using an optical time-domain reflectometer”, Optics Express, **18**, 20, pp. 21315–21321 (2010).
- [25] A. M. Rocha, P. F. C. Antunes, M. F. F. Domingues, M. Facão and P. S. André: “Detection of fiber fuse effect using FBG sensors”, IEEE Sensors Journal, **11**, 6, pp. 1390–1394 (2011).
- [26] 高良 秀彦, 猿渡 正俊: “光ファイバ通信システムの安全基準の動向と今後の展開”, Optronics, **30**, 10, pp. 123–128 (2011).
- [27] F. Audo, M. Guegan, V. Quintard, A. Perennou, J. L. Bihan and Y. Auffret: “Quasi-all-optical network extension for submarine cabled observatories”, Opt. Eng., **50**, p. 045001 (2011).
- [28] S. Todoroki: “Fiber fuse propagation behavior”, Selected Topics on Optical Fiber Technology (Eds. by Y. Moh, S. W. Harun and H. Arof), InTech, Croatia, chapter 20, pp. 551–570 (2012). (ISBN 978-953-51-0091-1). <http://www.intechopen.com/articles/show/title/fiber-fuse->

propagation-behavior

Fiber fuse: sleeping devil for optical communication

Shin-ichi Todoroki

Principal researcher, National Institute for Materials Science

トドロキ シンイチ

所属: (独) 物質・材料研究機構 先端フォトニクス材料ユニット
 応用フォトニック材料グループ 主幹研究員