

ファイバヒューズ—その危うさと怪しさ

物質・材料研究機構 光材料センター

轟 真市

Fiber fuse—fatal and unusual

Shin-ichi TODOROKI

Optronic Materials Center, National Institute for Materials Science

光ファイバが長距離に渡って破壊される現象であるファイバヒューズに関して、現在までに分っていることをまとめたのち、筆者の研究を紹介する。毎秒約1mで動くファイバヒューズを超高速カメラで撮影し、また残された損傷の光学顕微鏡映像を統計処理することで、損傷発生メカニズムについて推理する。

1. はじめに

光で光ファイバが壊れてしまう現象であるファイバヒューズは、本誌読者のほとんどの方にとっては馴染みの無いものであろう。まぶしい輝点が光ファイバに沿って音もなく移動していく様子¹を間のあたりにすると、誰もが驚きの声を上げる(図1参照)。しかし、現実はそのようなのん気なものではない。輝点の軌跡には空孔が等間隔に並んでおり、その光ファイバはもはや光を通すことができない。21世紀になって、我々が取り扱えるレーザー光の強度は飛躍的に増大している(>2kW[2])。高強度光と光導波路を用いる全てのアプリケーションにとって、ファイバヒューズは現実的な脅威となっている。

筆者は2年前(2004年)の今頃、ひょんなことからファイバヒューズの研究に手を染めることになった²。本稿では、その仕事の中から2つの話題を提供し、なぜ周期的空孔が生成するのか(怪しさ)を推理するが、その前にファイバヒューズについて知られていること(危うさ)をまとめておきたい。

2. 2004年までに知られていたこと

ファイバヒューズの報告が最初に現れるのは1987年のことである[4]。その後複数のグループが研究に取り組み、併せて30報弱の報告がなされていた³。1990年代までの研究は、そのショッキングな現象に対する学問的興味が原動力となり、生成した損傷パターンの収集が中心であった。その現象に理論的枠組を与えようとするあまり、「自己推進自己収束損傷」や「熱衝撃孤立波」というモデルが提案されたが、その明確な裏付けまでには至っていない。各モデルの問題点は、首藤らによって指摘されている

〒305-0044 茨城県つくば市並木 1-1

FAX 029-854-9060

E-mail: TODOROKI.Shin-ichi@nims.go.jp

Homepage: <http://www.geocities.com/Tokyo/1406/>

¹ そのビデオ映像は、文献[1]オンライン版のFig.1で見ることができる。

² その子細は別の雑誌に寄稿したので、併せてご覧いただきたい[3]。

³ 筆者のホームページに現在までの論文リストがまとめてある。
<http://www.geocities.com/Tokyo/1406/node.6.html>



図1 NGF 若手懇談会（第80回，2005年7月，つくば市）で行なったファイバヒューズのデモ。光ファイバを手に並んだ面々の視線の先に，白くまぶしく光るファイバヒューズが音もなく走っている。

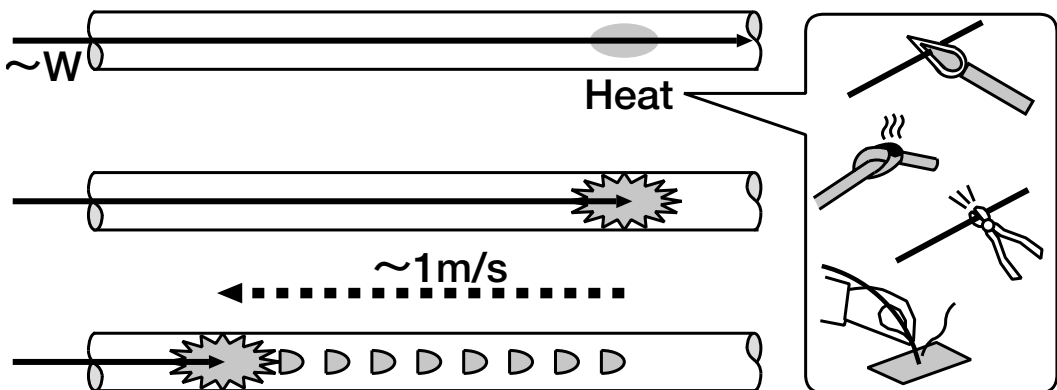


図2 ファイバヒューズが発生する条件。数 W の光が伝搬されている光導波路の一点を局所的に加熱すると，輝点が現れ，光源に向かって毎秒 1 m 位の速度で移動を始める。輝点の通った跡には，弾丸形状の空孔が周期的に並んでいる。

[5]。2000 年以降，より現実的なアプローチが増え，光コネクタや光伝送路における現象の検討[6,7]，発生したファイバヒューズを停止させるデバイスの提案[8,9]，計算機シミュレーションに基づくモデルの構築[5,10]などがなされている。

ファイバヒューズが発生するきっかけは，数 W の光（連続光でもパルス光でも良い）が伝搬している区間への，局所的加熱である（図2参照）。それは外部からの加熱でも，伝搬光を熱へ変換させるのも良い。シリカガラス製光

ファイバ（マルチモード[11]及び単一モード）だけでなく，フッ化物ガラスファイバやカルコゲナイドファイバ[12]，フォトニック結晶ファイバ[13]でも報告例があり，光導波構造を持つものであれば，物質の種類に寄らず発生すると考えられる。筆者は，半導体レーザーの故障品においても周期的損傷が残されていた，という話を聞いたことがある。本稿では，単一モードシリカガラス製光ファイバの例に限って話を進める。

そもそも光を遠くまで送り届けることのでき

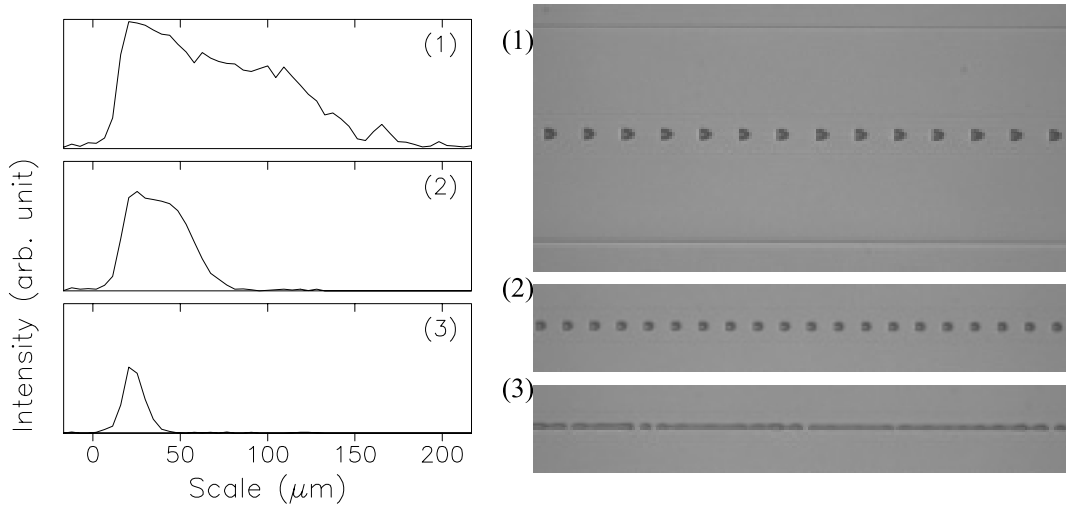


図3 超高速カメラ（露光時間：1 μ s [1]）で捉えた単一モード光ファイバ中を伝搬するファイバヒューズの強度分布（左）と跡に残された空孔列の光学顕微鏡写真（右）。伝搬光は左から入射し、波長は1480 nm、強度は（1）9.0 W、（2）3.5 W および（3）1.5 W。写真（1）の上下に見える線は光ファイバの外周であり、その間隔は125 μ m。写真とグラフの縮尺は同じ。

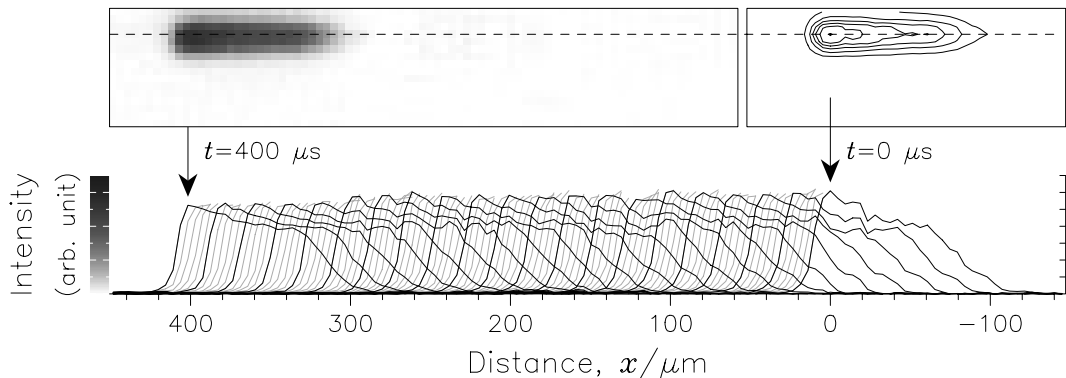


図4 （上）単一モードシリカガラスファイバ中を7.0 W 1480 nmの伝搬光を受けながら進むファイバヒューズを超高速カメラで撮影した写真とその強度マッピング。（下）写真上に引かれた点線に沿った強度分布曲線を、4秒毎に重ねたもの。

る光ファイバが、伝搬光のエネルギーを喰われて破壊される、というのは妙な話に聞こえる。これは、加熱によって光吸収が誘起されることを考慮すれば、納得が行く。Kashyapらは、Nd:YAGレーザー光（波長：1064 nm）を伝搬させた光ファイバの一部区間（1 m）を1100℃まで昇温させて、光吸収の温度依存性を測定したところ、1050℃から急激に増大したことを報告している[14]。首藤らは、光吸収の原因として次の3つを考慮すると、一連の実験データ

をうまく説明できるとしている[15]。すなわち、1) 点欠陥の生成 (Ge E'中心)、2) Ge添加シリカガラスの熱イオン化に伴う電子伝導、および3) シリカガラスから解離したSiO₂である。それぞれの波長依存性の重ね合わせを考えれば、ファイバヒューズが発生しうる波長域は相当広いと考えられる。現在までにファイバヒューズの発生が報告されている波長は、0.5 μ mから1.5 μ mに渡っている。

生成する輝点は、コア領域に閉じ込められた

プラズマと考えられる。ひとたび発生すれば、伝搬光のエネルギーを使って光が入射する方向のコア領域を溶かしながら移動を始める。これを止めるには、光源を切り離すか、その出力をファイバヒューズの伝搬限界閾値以下にまで落とさねばならない。さもなければ、光閉じ込め構造が物理的に途切れるところまで進み続ける。ファイバヒューズの伝搬速度は毎秒1m前後で、伝搬光強度を大きくすると増加する。その温度は、黒体輻射の測定に基づけば数千Kから 10^4 Kに達するとの報告がある[16]。

輝点を通った跡には、一般に弾丸形状の空孔(光源とは反対の方向を向いている)が周期的に並んでいる。空孔の間隔も伝搬光強度とともに増加する[17]。空孔の内部に対する顕微ラマン測定から、酸素の存在を指摘する報告がある[18]。輝点通過後のコア領域は屈折率分布でみる限り拡大しており[19]、着色しているという報告もある[18]。

この様に、ファイバヒューズがどの様に発生・伝搬し、何を残すかに関しては、一通りの知識が蓄積されていた。しかしながら、なぜファイバヒューズが周期的空孔を残すのか、そして、その形状がなぜ弾丸型なのかについて、説得力のある説明はなされないままであった。円筒状流体の表面に現れるレイリー不均一性に着目した説明が試みられた[17]が、後に示す筆者の実験結果やYakovlenkoによる理論的考察[20]には馴染まない内容であった。

3. ファイバヒューズの直接観察

これまでの一連の研究に一石を投じたのが、2004年9月に相次いで発表された、走っているファイバヒューズを直接捉えようとする試みである[21,22]。筆者は超高速カメラでファイバヒューズを撮影し、輝点の強度分布を得ることに成功した。カメラの露光時間(4 μ s)内に移動する距離は輝点の大きさより小さく、ほぼ静止画とみなすことができる映像を得た。(図1では露光時間が長いので、白い線になっ

てしまっていることにご注目頂きたい。)伝搬光強度の異なる条件で比べると、輝点が「火の玉」の様な尾をひく形状をしている場合に、弾丸状の空孔が残されることが分かった[23](図3参照)。一方、Bufetovらは、輝点の背後のガラスの状態に着目した高速度撮影(露光時間:10 μ s)を行ない、輝点の先頭が通過してから20-70 μ s後には、空孔の生成が確認できることを明らかにした[16]。

しかし、この手法をもってしても、先に述べた2つの謎を解くには無力であった。輝点の中で起こっていることを把握しない限り、その本質に迫れないのは明らかである。その話題に移る前に、輝点の直接観察によって分かることをまとめておく。

図4は、伝搬光強度を7.0Wとした時に発生したファイバヒューズを連続撮影した結果をまとめたものである。ここから、ファイバヒューズの伝搬速度は1m/sとわかる。この時発生した空孔列の間隔は20 μ mであったので、空孔が1個生成するのに要する時間は20 μ sであり、その間に5枚の写真を撮っていることになる。輝点の強度分布曲線は、ほぼ形を保ったまま等速移動していることがわかる。

4. 周期的空孔生成プロセスの推理

輝点の中で起こっていることを直接観察できないにしても、ファイバヒューズを止めた時に、その先頭部分に残されるものは確認することができる。図5(1)にご注目いただきたい。細長い空孔が残されており、その長さは図4に示した強度分布曲線の幅にほぼ一致している。ただしこの構造は、20 μ s間の空孔生成周期の中の一瞬を反映しているに過ぎない。他の瞬間を反映した構造を収集するために、同じ条件でファイバヒューズを停止させた試料を多数作製した。それらの写真を図5に示すが、その並べ方は次の規則に従っている。すなわち、右端の周期的空孔の位置を揃え、そこから左端の空孔先端までの距離が長くなる順序である。一番下

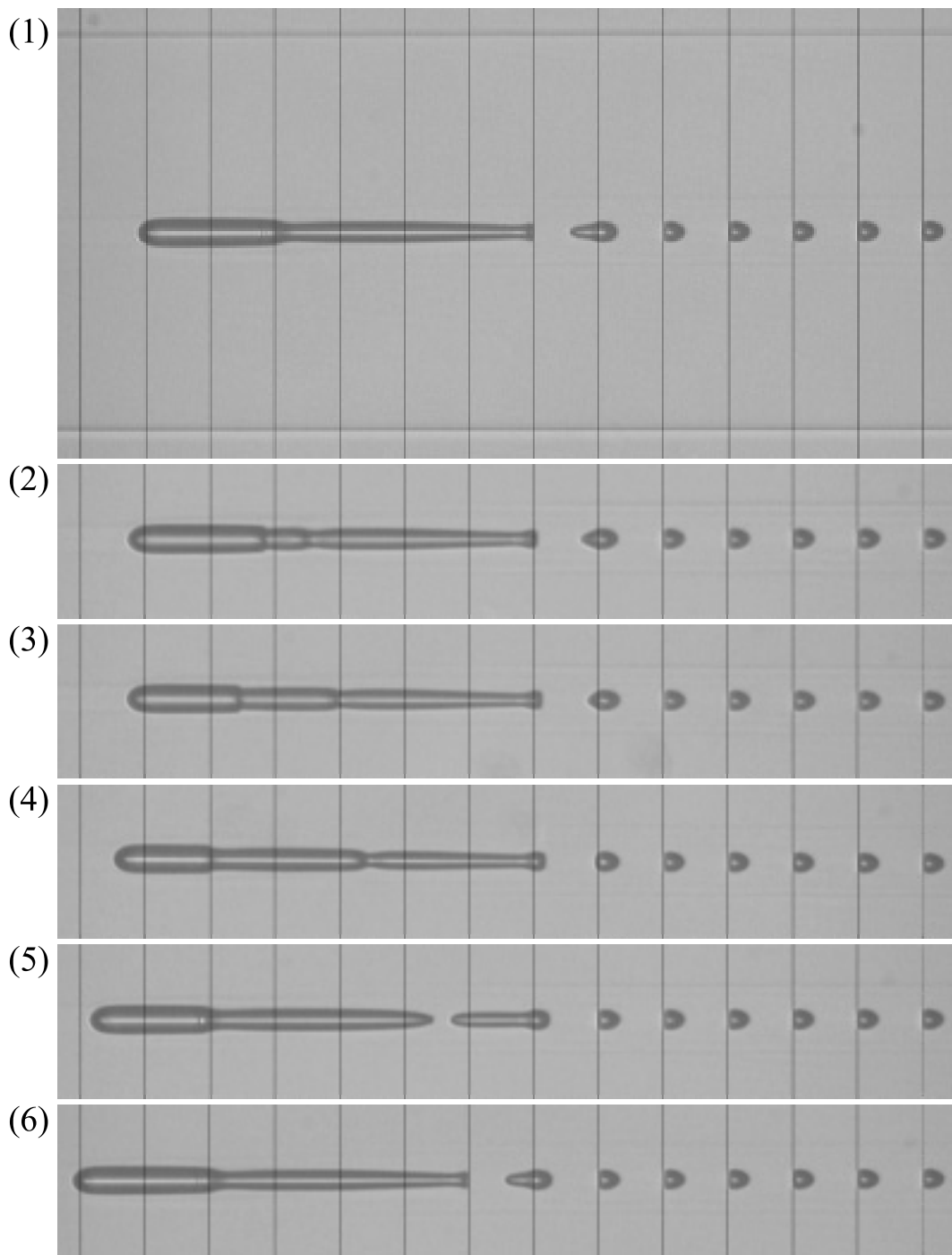


図5 7.0 W 1480 nm の伝搬光により発生したファイバヒューズが残した損傷の光学顕微鏡写真。縦線の間隔は $20\ \mu\text{m}$ 。一番下の写真は一番上のもと同じだが、左に $20\ \mu\text{m}$ ずらしてある。

の写真は一番上の写真と同じものであるが、空孔1個分左にずらしてある。前節で述べたように、ファイバヒューズは等速移動しているのだから、この組写真は時間順に空孔生成周期を一順していることになる。

この組写真を眺めていると、面白いことに気が付く。先頭の細長い空孔の中程にくびれた部分が現れ(2)、それがファイバヒューズの進行方向とは逆の方向に移動し(3,4)、遂にはその細長い空孔の末尾を切り離すに至る(5)。切り離された空孔は更に縮んでいき(6=1,2,3,4)、弾丸形状になって変化が止まる(5)。伝搬光強度を変えても、この構造変化の傾向は観察される[24]。この様子をビデオ映像として再構成したものがあるので、併せてご覧いただきたい(文献[1]オンライン版のFig.7)。

ここで注意しなければならないのは、この組写真は「その場観察」ではないという点である。すなわち、ファイバヒューズの定常状態から伝搬光を切って冷却されるまでの間に構造が変化している可能性は否定できない。しかし、空孔の切り離しが行なわれる部分の温度は、最も高温となる空孔先頭から離れていること、および液体シリカの粘度は温度の下降とともに急速に上昇することを考えれば、この組写真における弾丸形状の空孔が生成される部分の構造は、ファイバヒューズの定常状態における構造の特徴を残していると考えられる。

図6は、この組写真から空孔が切り離されるプロセスを抜き出して単純化したものである。切り離しの際に現れるガラスの壁は、(a)→(b)→(c)の様に変形している。切り離された空孔の立場から見ると、(3)→(4)→(5)→(6)のようになる。系の温度は左から右に下がっていくことを考えれば、切り離された空孔の右側が先に固まることが理解できる。一方、図の左方向の先には、高温高圧のプラズマが存在しているの

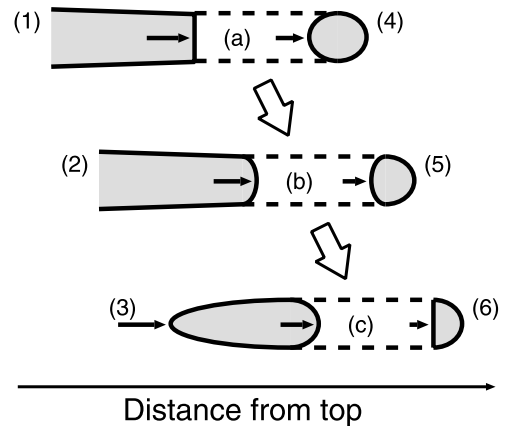


図6 ファイバヒューズの背後に存在する尾状の空孔から切り離される空孔の形状変化。

で、空孔とガラスの界面は左側から圧力を受けている。この圧力に応じて界面が移動するわけだが、その移動距離はガラスの粘度上昇とともに小さくなる(図中の横向き矢印参照)。よって、弾丸形状が作られる原因は、切り離された空孔がプラズマの内圧を受けて変形する際に、空孔の前面と背面で固まるタイミングがずれるためであることが分かる。プラズマの内圧が低い場合、すなわち伝搬光の強度が小さい場合には、弾丸形状が甘くなり丸みを帯びてくることも、このメカニズムから理解できる(図3の写真(1)(2)参照)。

それでは、なぜ空孔が切り離されるのであろうか? 理論的に厳密な説明は筆者の手に余るが、定性的には次のように考えている。プラズマの先頭では常にエネルギーの供給を受けており、新しい界面を「背後に尾状の空孔を従える」という形で作り続けている⁵。しかし、その尾状の空孔の末尾では、系の温度の低下とともに系のエネルギーを小さくする方向、すなわち界面の面積を小さくする方向に移行し始める。この時、尾の末尾で高い粘度に抗して連続的に界面を消滅させていくよりもむしろ、尾の中程の低

⁴ 伝搬光遮断から輝点の消滅までに要する時間は7 μ s以下であった[25]。

⁵ プラズマの先頭の状態がどうなっているのかは良く分からない。すなわち、ガラス融液とガスの界面が存在するのか、あるいは超臨界流体となって界面が存在しないのかは、現段階では判断できない。

い粘度の部分で壁面を形成する方が容易なのではなからうか?この他にも、プラズマ-液体界面に誘起された同符号電荷の反発で説明する試みも出てきており[26]、いずれ明確に説明される時が来るであろう。

5. おわりに

ファイバヒューズのことを深く知るにつけ、この興味深い現象をなにか役に立つことに使えないか、という思いが強くなる。それは、1987年にこの現象が発見されて以来、これに関わった人は皆、同じ思いであると思う。答えは常識から外れた処から現れる様な気がしている。

この仕事のもう一つのポイントは超高速カメラの利用にある。このカメラを使ったビデオ映像はテレビを通じて目にする機会が多いが、自分の研究に使うことになるとは予想もしていなかった。今回紹介した仕事では脇役に過ぎないけれども、空孔生成プロセスを再現する組写真を得るアイデアは、マイクロ秒単位での撮影を行っていたからこそ、思いついたことである。また今回触れることのできなかった、ファイバヒューズの発生・消滅プロセスの研究では、主役として活躍してくれている[27, 28, 29, 30]。このカメラはこれからも、いろいろな分野で我々の常識を覆す働きをしていくと確信している。末筆となってしまったが、超高速ビデオ撮影(図3および4)にご協力頂いた、株式会社フォトロンの花巻和秀氏、坂巻顯氏、桑原譲二氏、相澤啓助氏に深く謝意を表したい。

参考文献

- [1] S. Todoroki: "Origin of periodic void formation during fiber fuse", *Optics Express*, 13, 17, pp. 6381-6389 (2005).
- [2] ジェフ・ヘクト: "出力のポンプアップ", *Laser Focus World Japan*, 10, pp. 45-47 (2005).
- [3] 轟 眞市: "先んずれば人を制す, 写真撮らばファイバヒューズ", *電気ガラス*, 35 (2006). (4月下旬発行予定).
- [4] R. Kashyap and K.J. Blow: "Spectacular demonstration of catastrophic failure in long length of optical fibre via self-propelled self-focusing", Eighth National Quantum Electronics Conference, Univ. of St Andrews, p. PD 7 (1987). (21-25 Sept.).
- [5] 首藤義人, 柳 秀一, 浅川修一郎, 長瀬亮: "単一モード光ファイバにおけるファイバヒューズ発生機構の検討", *電子情報通信学会論文誌*, J 86-C, 3, pp. 252-261 (2003).
- [6] 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).
- [7] Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi and R. Nagase: "Fiber fuse generation in single-mode fiber-optic connectors", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16, 1, pp. 174-176 (2004).
- [8] 柳 秀一, 浅川修一郎, 小林勝, 首藤義人, 長瀬亮: "ファイバ・ヒューズ遮断部品の開発", *電子情報通信学会技術研究報告 OPE 光エレクトロニクス*, 104, 507, pp. 21-26 (2004).
- [9] 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", *電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集* (2004). (B-10-5).
- [10] R. I. Golyatina, A. N. Tkachev and S. I. Yakovlenko: "Calculation of velocity and threshold for a thermal wave of laser radiation absorption in a fiber optic waveguide based on the two-dimensional non-stationary heat conduction equation", *Laser Physics*, 14, 11, pp. 1429-1433 (2004).
- [11] D. D. Davis, S. C. Mettler and D. J. DiGiovanni: "Experimental data on the fiber fuse", 27th Annual Boulder Damage 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).
- [12] 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).
- [13] E. M. Dianov, A. A. Frolov, I. A. Bufetov, S. L. Semenov, Y. K. Chamorovskii, G. A. Ivanov and I. L. Vorob'ev: "The fibre fuse effect in microstructured fibres", *Quantum Electron.*, 34, 1, pp. 59-61 (2004).
- [14] R. Kashyap, A. Sayles and G. F. Cornwell: "Heat flow modeling and visualization of catastrophic selfpropagating damage in singlemode optical fibers at low powers", *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. 586-591 (1997). (Boulder, CO, USA, 7 Oct 1996).

- [15] Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi and R. Nagase: "Evaluation of high-temperature absorption coefficients of optical fibers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16, 4, pp. 1008-1010 (2004).
- [16] E. M. Dianov, V. E. Fortov, I. A. Bufetov, V. P. Efremov, A. E. Rakitin, M. A. Melkumov, M. I. Kulish and A. A. Frolov: "High-speed photography, spectra, and temperature of optical discharge in silica-based fibers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18, 6, pp. 752-754 (2006).
- [17] R. M. Atkins, P. G. Simpkins and A. D. Yablon: "Track of a fiber fuse: a rayleigh instability in optical waveguides", *Opt. Lett.*, 28, 12, pp. 974-976 (2003).
- [18] R. Kashyap: "High average power effects in optical fibers and devices", *Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems, and Networks* (Eds. by H. G. Limberger and M. J. Matthewson), Vol. 4940 of SPIE Proceedings, SPIE, pp. 108-117 (2003). (Brugge, Belgium, 28 Oct. 2002).
- [19] E. M. Dianov, V. M. Mashinskii, V. A. Myzina, Y. S. Sidorin, A. M. Streltsov and A. V. Chickolini: "Change of refractive index profile in the process of laser-induced fiber damage", *Sov. Lightwave Commun.*, 2, pp. 293-299 (1992).
- [20] S. I. Yakovlenko: "Plasma behind the front of a damage wave and the mechanism of laser-induced production of a chain of caverns in an optical fibre", *Quantum Electron.*, 34, 8, pp. 765-770 (2004).
- [21] S. Todoroki: "In-situ observation of fiber-fuse propagation", *Proc. 30th European Conf. Optical Communication Post-deadline papers*, Stockholm, Sweden, Kista Photonics Research Center, pp. 32-33 (2004). (Th 4. 3. 3).
- [22] I. A. Bufetov and E. M. Dianov: "Optical discharge in optical fibers", *Physics-Uspekhi*, 48, 1, pp. 91-94 (2005).
- [23] S. Todoroki: "In-situ observation of fiber-fuse propagation", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44, 6 A, pp. 4022-4024 (2005).
- [24] 轟 真市: "考古学的手法によるファイバビュースの損傷生成機構の考察", *The 16th Meeting on Glasses for Photonics 講演要旨集*, pp. 7-8 (2006). (4).
- [25] S. Todoroki: "Animation of fiber fuse damage, demonstrating periodic void formation", *Opt. Lett.*, 30, 19, pp. 2551-2553 (2005).
- [26] S. I. Yakovlenko: "Mechanism for the void formation in the bright spot of a fiber fuse", *Laser Physics*, 16, 3, pp. 474-476 (2006).
- [27] S. Todoroki: "Transient propagation mode of fiber fuse leaving no voids", *Optics Express*, 13, 23, pp. 9248-9256 (2005).
- [28] S. Todoroki: "In-situ observation of fiber-fuse ignition", *International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2005: Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies* (Eds. by V. I. Konov, V. Y. Panchenko, K. Sugioka and V. P. Veiko), Vol. 6161 of SPIE Proceedings, SPIE, pp. 166-169 (2006). (St. Petersburg, Russia, 14 May 2005, LSK 3, in print).
- [29] 轟 真市, 井上悟: "ファイバビュース点火現象の直接観察", *第46回ガラスおよびフォトニクス材料討論会講演要旨集*, 滋賀県彦根市, pp. 42-43 (2005). (P 06).
- [30] 轟 真市: "ファイバビュースの自然停止に伴う2重周期的空孔列の生成", *日本セラミックス協会2006年年会講演予稿集*, 東京都目黒区, p. 220 (2006). (2 P 134).