

光ファイバの“^{ろしん}路芯”溶融伝播 — ファイバフューズ現象とその対策 —

物質・材料研究機構 轟 眞市*

高強度光源の普及により顕在化してきた問題であるファイバフューズについて解説する。数Wの光を伝搬している光ファイバを折り曲げるなどして局所的に加熱すると、コア領域にプラズマが生成し、光ファイバ内に閉じ込められつつコア領域を破壊しながら光源方向に移動する現象が発生する。発生する原因や事故防止策をまとめる。

はじめに

「^{ろしん}路芯 溶融伝播」とは聞き慣れない用語とお感じになるだろう。この記事で初めて用いる筆者の造語であり、ファイバフューズ現象を簡潔に表現する意図を込めた。この現象は光導波路のコア領域が伝搬光によってメルトダウンしてしまうものであり、しかもそれが光を放ちながら秒速約1mで光導波路に沿って伝播するのである(図1参照)。ファイバフューズを発生させてしまうと、もはやその光導波路は破壊されて使い物にならない。昨今進歩が著しい高強度光源を、光導波路と組み合わせて使うアプリケーションにとっては致命傷となる現象であり、対策を講ずべきハードルと認識されている。材料からの視点でこの現象を概観してみたい。

なぜ発生するのか

そもそも光ファイバは、光を遠くまで送り届けるために、透明な材料で構成されているはずである。なぜ、伝搬光のエネルギーを消費して自分自身を破壊する現象が起きてしまうのか？その答は温度にある。光ファイバの材料として一般的なシリカガラス(α -SiO₂)は、1600°C以上

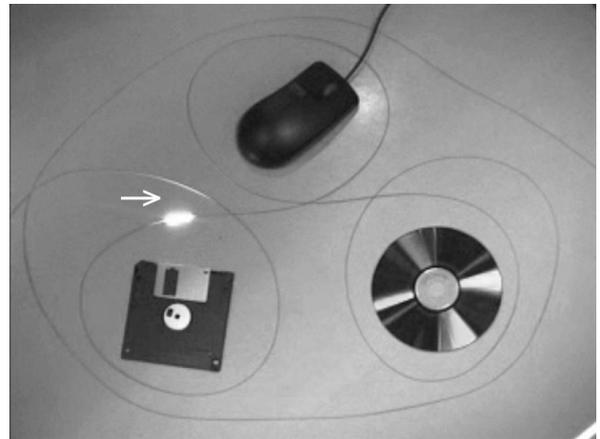


図1: ファイバフューズの写真。シリカガラス製単一モード光ファイバ中を毎秒約1mで矢印の方向に進んでいる。光源(9W, 1480nm)はその前方に接続されている。

の温度にならないと変形しない材料だが、長さ1mの光ファイバにおける透過率の温度依存性を測定すると、1050°C付近で急激に増大することが分かっている(図2参照)。したがって、数Wの光を伝搬している単一モード光ファイバ(コア径約10 μ m)の一部を1000°C程度まで加熱すると、その場所は光吸収体に変化し、通過する光のエネルギーを熱に変換し始める。発生した熱は隣接部分を光吸収体に変えていく。この連鎖は、光が入射してくる方向に最も進み易い。同時に温度も急上昇し(数千K)、最終的にはプラズマ状の発光体が導波構造に沿って移動する定常状態に到達する。

この現象は既に1980年代末には知られていたが、近年の高出力光源の進歩に伴い、その危険性が現実味を帯びるようになってきた。具体的には次の三点を挙げることができる。(1)材料を問わず発生し、発生する波長域も広い。(2)単純なきっかけで発生する。(3)ひとたび発生すれば、光源からの光を消費しながら永続的に進行する。以下、この3点をもうすこし詳しく述べていく。

*とどろき しんいち: 光材料センター 主幹研究員
〒305-0044 茨城県つくば市並木 1-1
URL: http://www.geocities.jp/tokyo_1406/

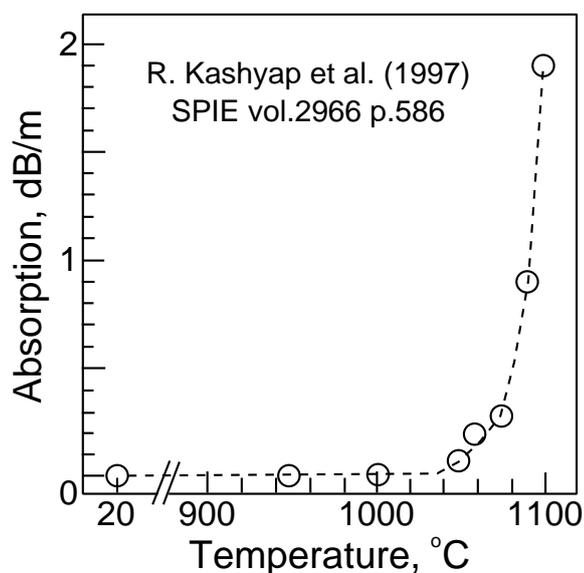


図 2: シリカガラス製単一モード光ファイバ(1m 長)の光吸収の温度依存性。

1. 発生する条件

前述したファイバフューズ発生のプロセスには、特定の材料に固有の要素は含まれていない。すなわち、熱誘起光吸収が発現する材料で光導波路を構成する限り、逃れられない宿命となる。シリカガラス製光ファイバの場合、熱誘起光吸収の起源として考えられるものは少なくとも三つあり [1](点欠陥の生成、熱イオン化に伴う電子伝導、酸素の解離に伴う SiO 生成)、ファイバフューズ発生が報告されている波長域は、0.5 ~ 1.5 μm と幅広い。フッ化物ガラスやカルコゲナイドガラスによる光ファイバでの報告例もある [2]。

2. 発生のきっかけ

局所的な温度上昇に晒さない限り、光ファイバは十分に強い光を伝送できる性能を有している。ファイバフューズ発生に至るきっかけとしては、外からの加熱の他に、伝送している光エネルギーが熱に変換されるような操作がある(図 3 参照)。例えば、光ファイバケーブルを急峻に曲げて洩れ光を被覆に到達させたり、光入出力ポートのコネクタ部分に埃を挟み込んだまま運転させたり、あるいは光源を停止するのを忘れたまま、ケーブルの切断等の作業を行なうことが挙げられる。いずれにせよ、偶発的な事故に

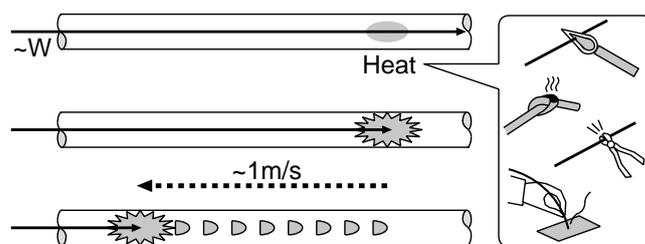


図 3: ファイバフューズ発生プロセス。数 W の光が伝搬されている光導波路の一点を局所的に加熱すると、輝点が現れ、光源に向かって毎秒 1m 位の速度で移動を始める。輝点の通った跡には、弾丸形状の空孔が周期的に並んでいる。

類するものであり、その対策には慎重さが求められる。

3. 発生後の挙動

一旦発生したファイバフューズは、光源からの供給される光を止めるか弱めない限り、光導波路が物理的に途切れる所まで進み続ける。処置が遅ければ、光源にまで達して損傷を与えることもあり得る。ファイバフューズが通過した後のコア領域には、周期的に並んだ空孔列が残されている。高温高压のプラズマの通過により、空孔周囲のガラスは高密度化されている。

どう防止するのか

二つの方針が考えられる。(1)局所的加熱を引き起こす様な強い光を入射させないこと、あるいは、(2)発生してしまったファイバフューズを確実に消滅させることである。材料の立場から寄与できることは、これらの目的を実現するデバイスを提供することであり、光ヒューズとファイバフューズ停止器が提案されている。

1. 光ヒューズ

電気製品に取り付けられたヒューズが過電流注入を防止するのと同様、光ヒューズは光の過入力に反応して自律的に回線を切断する素子である。ファイバフューズが発生しうる光強度(シリカガラス製単一モード光ファイバの場合約 2W 以上)が入射されるのを未然に防ぐために取り付

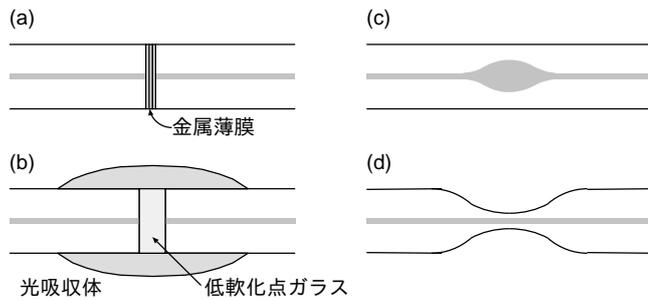


図 4: 光ヒューズとファイバフューズ停止器の構造。
(a) 金属薄膜挿入型 (b) ガラス融着型 (c) コア拡大型
(d) 自爆型

ける。既に実用化されているものは、光ファイバ回線の途中に金属薄膜を挿入した構造を有している [3](図 4(a) 参照)。強い入射光が金属薄膜内にプラズマを誘起し、それが光ファイバ端面を破壊することで動作する。カタログによると 30 ミリ秒程度で動作し、切断閾値の上限は 1.25 W である。筆者はより高い切断閾値を設定できる光ヒューズを提案している [4]。この素子は、金属薄膜の代わりに透明な低軟化点ガラス層を挿入し、その側面に光吸収体を塗布した構造を有している (図 4(b) 参照)。強い光が入射すると、洩れ光がガラス層から光吸収体に達し、発生した熱がガラス層を変形させ断線に至る。熱を介した反応であるが故に反応時間は 1 桁遅い。

2. ファイバフューズ停止器

ファイバフューズが伝搬できなくなる状態を局所的につくり出す素子であり、光ファイバ回線に挿入して用いる。次の三種類の方法が提案されている。(1) コア径を局所的に拡大して伝搬光のエネルギー密度を下げることで消滅させる方法 [5, 6](図 4(c) 参照)、(2) 光導波路の強度を局所的に弱くして通過と同時に破壊させる方法 [7](図 4(d) 参照)、および (3) 光導波路を冷却してファイバフューズからエネルギーを奪う方法 [8] である。前述した筆者提案の光ヒューズは (2) の方法を実現するのもにも有効であり、その場合は光吸収体の塗布は不要となる。

おわりに

ファイバフューズに関連する事項を駆け足でまとめてみた。さらに詳しい情報をお望みの方は、筆者のホームページ (http://www.geocities.jp/tokyo_1406/node5.html) にアクセスして頂きたい。ファイバフューズを超高速度撮影したビデオ映像を幾つかご覧いただければ、この現象の奇妙さと恐ろしさを実感して頂けると思う。

参考文献

- [1] Y. Shuto *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16** [4] 1008 (2004).
- [2] E. M. Dianov *et al.*, *Quantum Electron.*, **32** [6] 476 (2002).
- [3] 特表 2005-520185
- [4] 特許 3870270 号
- [5] 藤田, 森下: 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.
- [6] 柳, 浅川, 小林, 首藤, 長瀬: 電子情報通信学会技術研究報告 OPE, **104** [507] 21 (2004).
- [7] E. M. Dianov *et al.*, *Opt. Lett.*, **29** [16] 1852 (2004).
- [8] 特開 2005-345701