

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7149529号
(P7149529)

(45)発行日 令和4年10月7日(2022.10.7)

(24)登録日 令和4年9月29日(2022.9.29)

(51)国際特許分類

F I

G 0 2 B 6/032(2006.01)

G 0 2 B

6/032

Z

G 0 2 B 6/02 (2006.01)

G 0 2 B

6/02

B

請求項の数 3 (全16頁)

(21)出願番号	特願2019-38951(P2019-38951)	(73)特許権者	000004226
(22)出願日	平成31年3月4日(2019.3.4)		日本電信電話株式会社
(65)公開番号	特開2020-144170(P2020-144170 A)		東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(43)公開日	令和2年9月10日(2020.9.10)	(73)特許権者	504300088
審査請求日	令和3年4月30日(2021.4.30)		国立大学法人北海道国立大学機構
特許法第30条第2項適用	2018年3月20日~23日東京電機大学において開催された一般社団法人電子情報通信学会2018年総合大会(講演論文集発行日:2018年3月6日)で発表		北海道帯広市稲田町西2線11番地
		(74)代理人	100119677
			弁理士 岡田 賢治
		(74)代理人	100115794
			弁理士 今下 勝博
		(72)発明者	辻川 恭三
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号
			日本電信電話株式会社内
		(72)発明者	半澤 信智
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 ファイバヒューズ抑制ファイバの設計方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

屈折率が均一なクラッド領域と、前記クラッド領域の中央に配置された前記クラッド領域よりも高い屈折率を有するコアと、前記クラッド領域内の前記コアの外周に、直径cの円に外接するように等間隔に配置された直径dのN個の空孔と、を有する空孔アシスト型光ファイバ(HAF: Hole Assisted Fiber)を備え、ファイバヒューズを停止させるファイバヒューズ抑制ファイバの設計方法であって、

所望のモードフィールド直径MFDと入力光パワーPに基づいて式(A)より、ファイバヒューズが発生するファイバヒューズ発生領域の直径D_{melted}を計算する計算工程と、

前記HAFの断面における、前記ファイバヒューズ発生領域の面積と全ての前記空孔が占める面積との比 $S (= N (d / D_{melted})^2)$ が式(B)を満足する直径c、直径d及び前記空孔の数Nを検出する検出工程と、
を行うことを特徴とする設計方法。

【式(A)】

Pが2.0W以上の場合:

$$D_{melted} = (62.76P / (11.44P + 16.55))^{0.5} \times MFD$$

Pが2.0W以下の場合:

$$D_{melted} = ((62.76P - 52.72) / 11.44P)^{0.5} \times MFD$$

【式(B)】

c/D_{melted} が 0.81 の場合：

$$S \geq 0.12$$

c/D_{melted} が 0.81 ~ 1.13 の場合：

$$S \geq 0.750 (c/D_{\text{melted}}) - 0.488$$

c/D_{melted} が 1.13 ~ 1.22 の場合：

$$S \geq 2.778 (c/D_{\text{melted}}) - 2.779$$

c/D_{melted} が 1.22 ~ 1.29 の場合：

$$S \geq 22.85 (c/D_{\text{melted}}) - 27.26$$

c/D_{melted} が 1.29 の場合：

$$S \geq 2.21$$

【請求項 2】

前記モードフィールド直径 MFD が $10 \mu\text{m}$ 以上であり、使用を想定する最大入力パワーを P_{max} 、 $P_{\text{th}} = 0.135 (W/\mu\text{m}) \times \text{MFD}$ としたとき、 P_{th} 以上且つ P_{max} 以下の範囲の入力パワー P において、前記式 (A) 及び前記式 (B) の空孔構造条件を満たすことを特徴とする請求項 1 に記載の設計方法。

【請求項 3】

前記モードフィールド直径 MFD は、前記 HAF に接続する単一モード光ファイバのモードフィールド直径との誤差が 10% 以内であることを特徴とする請求項 1 に記載の設計方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、数 W (ワット) オーダの高パワーの光を光ファイバに入力、伝送したときに生じるファイバヒューズ現象を停止もしくは抑制するファイバヒューズ抑制ファイバ、ヒューズストップ及びその設計方法に関する。

【背景技術】

【0002】

現在、インターネットの進展などによって光ファイバ通信の伝送容量の拡大の要求は、日々強まっており、既にコア系の光ネットワークに布設された光ファイバに入力される光の全パワーは $1W$ に近づいてきており、将来的にはさらなる増大が予想される。一方、関連技術に係る光ファイバに、数 W オーダの光が入力している状況で、曲げ、切断、加熱などの何らかのきっかけが与えられると、ファイバのコアのガラス部分の加熱による溶融が発生し、これが高温のプラズマ状態となって、光源側に向かって伝搬していく現象（ファイバヒューズ現象）が生じることが知られている。

【0003】

図 1 は、ファイバヒューズ現象の概念図である。図 1 に示す光ファイバは、互いに異なる比屈折率差を有するクラッドとコアで構成されている。このファイバヒューズ現象の発生自体は確率的に起こるものであり、特定の条件下においても必ず発生するものではない。しかし、ファイバヒューズの発生を防止、もしくは発生したファイバヒューズを停止させないと、発生点から光源までの光ファイバ伝送路を破壊するだけに留まらず、光源（伝送装置）までも破壊してしまう。このため、ファイバヒューズ現象を防止、あるいは発生したヒューズを停止させる方法が強く求められるようになってきている。ファイバヒューズの伝搬を停止させるには、次の 2 つの手段がある。

（手段 1）光源からの入力光のパワーをある閾値（ヒューズ伝搬閾値 P_{th} ）よりも相対的に小さくする

（手段 2）ヒューズが伝搬する前に伝送路自体を切断する

【0004】

手段 1 におけるヒューズの伝搬閾値 P_{th} は、関連技術に係る光ファイバでは、光ファイバの種類によって多少の幅があるが、SMF（ $1.3 \mu\text{m}$ 帯ゼロ分散ファイバ、ITU-T、G.652）における伝搬閾値は $1.5W$ 、DSF（分散シフトファイバ、ITU

10

20

30

40

50

ーT、G.653)では1.2W程度であると報告されている。関連技術に係る光ファイバでは、この伝搬閾値は、モードフィールド直径(MFD: Mode Field Diameter)と強い相関を持ち、両者はほぼ比例の関係にあることが知られている(例えば、非特許文献1、4を参照)。

【0005】

そこで、伝送路における対策として、関連技術では、各種の光ファイバ型のヒューズストッパが提案されている。ヒューズストッパを用いる際は、入力光のパワーをストッパ部分の伝搬閾値以下に設定しておけば、仮にストッパ以外の部分でヒューズが発生したとしても、ストッパ部でヒューズが停止し、残った伝送路と光源部が保護できる。ヒューズストッパとしては、光伝送路の一部に伝搬閾値が特に高いファイバを小型の停止用の光部品(ヒューズストッパ)として挿入するものが提案されている。

10

【0006】

例えば、非特許文献1では、MFDの大きいマルチモードファイバ(GIF: グレッチッドインデックスファイバ)をSMFに融着接続したもので、2~3W程度の入力パワー条件で、伝搬してきたファイバヒューズの停止を実現している。また、非特許文献2では、分散シフトファイバ(DSF: Dispersion Shift Fiber)の一部を加熱し、コア径とMFDを拡大し、TEC(Thermally-diffused Expanded Core)ファイバ化する手法が提案されている。非特許文献3では、SMFの125μmφのクラッド部分をエッチングによって外径10~30μmφ程度まで細くし、ヒューズ伝搬閾値を向上させる方法が提案されている。

20

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0007】

【文献】藤田 他, 「GIファイバによるファイバヒューズの遮断」, 2004年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-10-5, 2004

柳 他, 「ファイバ・ヒューズ遮断部品の開発」, 信学技報, OPE2004-178, 2004

E. M. Dianov et. al., "Destruction of silica fiber cladding by the fuse effect", OPTICS LETTERS, 29, 16, 1852-1854, 2004

30

K. Takenaga et. al., "Evaluation of high-power endurance of bend-insensitive fibers," in Proc. (OFC/NFOEC 2008), 2008, JWA.11

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかしながら、関連技術には、以下に具体的に述べるような課題がある。第1の関連技術では、ファイバヒューズストッパに関して、MFDの大きいGIFをSMFに融着接続したものをを用い、2~3W程度の入力パワー条件でファイバヒューズの停止を実現しているが、挿入損失を低減するためにはGIFを数100μmオーダで最適長に調節する必要があり、作製が容易ではない。具体的には、最適長から500μm程度ずれると5dB程度余剰の損失が生じることになる。またコア径の大きく異なるSMFとGIFを接続するため、GIFの部分で高次のモードが発生する要因にもなり、高速信号の伝送時の伝送エラーを回避しなければならない、また改善量も2~3W程度と比較的低いレベルに留まっているという課題もある。

40

【0009】

また、第2の関連技術に係る、光ファイバの一部分を加熱してTEC(Thermally-diffused Expanded Core)ファイバ化する手法では、ストッパの小型部品化が可能であるが、単一モード条件を保ちながら、MFDを拡大する際の上限値があり(20~30μm程度)、従ってヒューズ伝搬閾値を向上させるにも限界が生

50

じるという課題がある。実際に、第2の関連技術でもTECファイバを用いたヒューズストップパの検討結果が示されているが、入力パワーが2W程度の条件での有効性の確認に留まっている。また、TEC化はコア部に含まれるドーパントを加熱拡散させて行うため、作製時に細かな条件の制御と設定が必要で、MFD特性、つまりはヒューズ伝搬閾値を再現性良く作製することは困難であり、コスト面でも不利である。

【0010】

また、第3の関連技術に係る、ファイバのクラッド部分をエッチングによって外径10〜30 μm 程度まで細くする方法では、MFDを初期状態の一定の値に保ちつつ、挿入損失を低くすることも可能であるが、硬質な石英ガラスをエッチングによって十分に細径化加工するには長時間が必要となりコスト面で不利である。また、細径化した部分では、ファイバの樹脂被覆も除去してしまうので、ガラス部分の細径化の影響に加えて、ガラス表面に傷が生じやすくなるため、機械的な強度の低下が課題となる。また、第3の関連技術においても、入力パワーが最大3Wの条件での有効性の確認に留まっている。

【0011】

以上のように、関連技術に係る方法では、4W付近、さらには4W付近を大きく超えるような大入力パワー時にも有効であるヒューズストップパの実現は極めて困難である。さらには、挿入損失が十分に低く、高次モード発生や機械的強度の低下の懸念などが小さく、且つ低いコストで性能の歩留まりの良く作製が可能という条件をすべて満たすファイバヒューズストップパの実現は極めて困難であった。

【0012】

さらに、従来技術においては、伝送用の光ファイバとしては汎用のSMF（波長1550nmでのMFDの典型値10.0 μm ）だけを想定した実験検証に基づくもので、これよりもMFDの小さいDSF（波長1550nmでのMFDの典型値8.0 μm ）や汎用のSMFよりもMFDの大きな光ファイバ伝送路に対する構造条件は明確にされていない。また、例えば波長1550nmで10Wを超える入力パワー条件での空孔構造条件も明確にされていない。

【0013】

加えて、空孔アシスト型光ファイバ（HAF: Hole Assisted Fiber）を用いたファイバヒューズストップパはSMFなどの伝送路用の光ファイバに融着技術などによって接続して用いるので、伝送路用の光ファイバとの接続性についても考慮する必要がある。しかし、HAF自体を通信用あるいは光給電などの高い光パワーの伝送用の光ファイバとして用いる際は上記の接続性の問題は考慮する必要がなく、MFDの値の制限が緩和されるため、最適な構造条件もファイバヒューズストップパとは異なる。しかし、これまで耐ファイバヒューズ光伝送路として、HAFの最適な空孔構造条件を検討した例は知る限り見当たらない。

【0014】

そこで、前記課題を解決するために、本発明は、ファイバヒューズの発生を確実に防止できる空孔構造条件を持つHAF、もしくは伝搬を確実に停止できる空孔構造条件を持つHAFを備えるファイバヒューズ抑制ファイバ、ヒューズストップパ及びその設計方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0015】

上記目的を達成するため、本発明では、ファイバヒューズ自体の熱分布の広がりを表すパラメータである D_{melted} を空孔構造設計の際の重要なパラメータとして用いることとした。

【0016】

具体的には、本発明に係るファイバヒューズ抑制ファイバは、屈折率が均一なクラッド領域と、前記クラッド領域の中央に配置された前記クラッド領域よりも高い屈折率を有するコアと、前記クラッド領域内の前記コアの外周に、直径 c の円に外接するように等間隔に配置された直径 d の N 個の空孔と、を有する空孔アシスト型光ファイバ（HAF: Ho

10

20

30

40

50

le Assisted Fiber) を備え、ファイバヒューズを停止させるファイバヒューズ抑制ファイバであって、

所望のモードフィールド直径MFDと入力光パワーPに基づいて式(A)より計算された、ファイバヒューズが発生するファイバヒューズ発生領域の直径 D_{melted} に対して、

前記HAFの断面における、前記ファイバヒューズ発生領域の面積と全ての前記空孔が占める面積との比 $S(=N(d/D_{melted})^2)$ が式(B)を満足するように、直径c、直径d及び前記空孔の数Nが設定されていることを特徴とする。

[式(A)]

Pが2.0W以下の場合：

$$D_{melted} = (62.76P / (11.44P + 16.55))^{0.5} \times MFD$$

Pが2.0W以上の場合：

$$D_{melted} = ((62.76P - 52.72) / 11.44P)^{0.5} \times MFD$$

[式(B)]

c/D_{melted} が0.81以下の場合：

$$S \geq 0.12$$

c/D_{melted} が0.81~1.13の場合：

$$S \geq 0.750(c/D_{melted}) - 0.488$$

c/D_{melted} が1.13~1.22の場合：

$$S \geq 2.778(c/D_{melted}) - 2.779$$

c/D_{melted} が1.22~1.29の場合：

$$S \geq 22.85(c/D_{melted}) - 27.26$$

c/D_{melted} が1.29の場合：

$$S \geq 2.21。$$

[0017]

また、本発明に係るファイバヒューズ抑制ファイバの設計方法は、屈折率が均一なクラッド領域と、前記クラッド領域の中央に配置された前記クラッド領域よりも高い屈折率を有するコアと、前記クラッド領域内の前記コアの外周に、直径cの円に外接するように等間隔に配置された直径dのN個の空孔と、を有する空孔アシスト型光ファイバ(HAF: Hole Assisted Fiber)を備え、ファイバヒューズを停止させるファイバヒューズ抑制ファイバの設計方法であって、

所望のモードフィールド直径MFDと入力光パワーPに基づいて式(A)より、ファイバヒューズが発生するファイバヒューズ発生領域の直径 D_{melted} を計算する計算工程と、

前記HAFの断面における、前記ファイバヒューズ発生領域の面積と全ての前記空孔が占める面積との比 $S(=N(d/D_{melted})^2)$ が式(B)を満足する直径c、直径d及び前記空孔の数Nを検出する検出工程と、を行うことを特徴とする。

[0018]

まずファイバヒューズ伝搬後に生じるコア周辺の溶融・気化領域の直径 D_{melted} の入力パワーPおよびMFDに対する近似関数評価式を導出する。次にファイバヒューズを停止可能なHAFの構造を、 D_{melted} の近似値と空孔に内接する円の直径(ファイバ中心から空孔までの距離の2倍)に対する比(パラメータX)と、溶融領域面積($\pi(D_{melted}/2)^2$)に対する空孔の面積比(パラメータY)で表す。そして、パラメータXとパラメータYの平面上においてファイバヒューズが伝搬しない範囲となるように直径c、直径d及び空孔の数Nを設定することで、HAFにおいてファイバヒューズの伝搬を停止することができる。

[0019]

従って、本発明は、ファイバヒューズの発生を確実に防止できる空孔構造条件を持つHAF、もしくは伝搬を確実に停止できる空孔構造条件を持つHAFを備えるファイバヒューズ抑制ファイバ

10

20

30

40

50

ーズ抑制ファイバ及びその設計方法を提供することができる。

【0020】

本発明に係るファイバヒューズ抑制ファイバは、前記モードフィールド直径 MFD が $10\mu m$ 以上、より好ましくは $15\mu m$ 以上であり、使用を想定する最大入力パワーを P_{max} 、 $P_{th}=0.135(W/\mu m)\times MFD$ としたとき、 P_{th} 以上且つ P_{max} 以下の範囲の入力パワー P において、前記式(A)及び前記式(B)の空孔構造条件を満たすことを特徴とする。

【0021】

前記モードフィールド直径 MFD は、前記HAFに接続する単一モード光ファイバのモードフィールド直径と概略等しいことを特徴とする。HAFと単一モード光ファイバとを接続したときの接続損失を低減することができる。

10

【0022】

本発明に係るヒューズストッパは、前記ファイバヒューズ抑圧ファイバを備える。

【発明の効果】

【0023】

本発明は、ファイバヒューズの発生を確実に防止できる空孔構造条件を持つHAF、もしくは伝搬を確実に停止できる空孔構造条件を持つHAFを備えるファイバヒューズ抑制ファイバ、ヒューズストッパ及びその設計方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0024】

20

【図1】ファイバヒューズ現象の概念図を示す図である。

【図2】ファイバヒューズ伝搬後の熔融領域直径 D_{melted} の測定評価系の一例を示す図である。

【図3】 $v(D_{melted})^2$ （伝搬速度 v と D_{melted} の2乗の積）と入力パワー P との関係の一例を示す図である。

【図4】 $v(MFD)^2$ （ v と MFD の二乗の積）の入力パワー P との関係の一例を示す図である。

【図5】 $P=2.0W$ 以下の条件での係数 K と $(D_{melted}/MFD)^2$ との関係の一例を示す図である。

【図6】 D_{melted}/MFD と P の関係の一例を示す図である。

30

【図7】本発明に係るファイバヒューズ抑制ファイバおよびヒューズストッパが備えるHAFの断面図の一例を示す図である。

【図8】本発明に係るファイバヒューズ抑制ファイバおよびヒューズストッパについて、ファイバヒューズ伝搬または停止の評価および伝搬閾値パワーの測定評価に用いる実験系の一例を示す図である。

【図9】ファイバヒューズ伝搬の有無を確認したHAF構造の具体例を示す表である。

【図10】本発明に係るファイバヒューズ抑制ファイバおよびヒューズストッパが備えるHAFについて、ファイバヒューズの伝搬を停止可能な c/D_{melted} と空孔と熔融・気化領域の面積比 S とを示す図である。

【図11】本発明に係るファイバヒューズ抑制ファイバおよびヒューズストッパが備えるHAFについて、ファイバヒューズの伝搬を停止可能な c/D_{melted} と空孔と熔融・気化領域の面積比 S とを示す図である。

40

【発明を実施するための形態】

【0025】

以下、本発明の実施形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。なお、本発明は以下に示す実施形態に限定されるものではない。これらの実施の例は例示に過ぎず、本発明は当業者の知識に基づいて種々の変更、改良を施した形態で実施することができる。なお、本明細書及び図面において符号が同じ構成要素は、相互に同一のものを示すものとする。

【0026】

50

(実施形態 1)

本実施形態は本発明に係る H A F の空孔設計の基準となる、光ファイバにファイバヒューズが発生した際に断面内に生じる溶融・気化領域の直径 D_{melted} を推定評価する近似式とその方法に関するものである。先述したように、 D_{melted} は入力パワー P とファイバの M F D に依存して変化するファイバヒューズ自体の熱分布の広がりを表すパラメータである。

【0027】

図 2 (A) にファイバヒューズの伝搬実験系を示す。商用の単一モード光ファイバ (S M F) 4 1 と試験用の単一モード光ファイバ 4 2 を融着接続し、試験用の単一モード光ファイバ 4 2 の終端でファイバヒューズを発生させてファイバヒューズの伝搬評価実験を行った。評価において、光源 4 4 の波長は光通信の代表的な使用波長である 1 5 5 0 n m 付近とした。ファイバヒューズ伝搬の状況を撮影した動画から伝搬速度 v を求め、 D_{melted} は伝搬後のファイバ断面の顕微鏡写真から見積もった。図 2 (B) に伝搬後のファイバ断面写真の一例を示す。図 2 (B 1) は長手方向に垂直な面での断面である。図 2 (B 2) は長手方向に平行な面での断面である。伝搬後のファイバ断面では、溶融・気化領域が冷却されて再びガラス化したためリング状の痕跡が生じ、このリングの直径を D_{melted} として決定した。

【0028】

試験用の単一モード光ファイバ 4 2 として 3 種の単一モード光ファイバを用いてファイバヒューズの伝搬実験を行った。その内訳は、汎用の市販 S M F、市販の短波長用単一モードファイバ (S S M F)、市販の分散シフトファイバ D S F である。波長 1 5 5 0 n m での M F D の値は S M F が 1 0 . 1 μ m、S S M F が 9 . 2 μ m、D S F が 7 . 7 μ m であった。また実験時の入力パワー P の範囲は 1 . 4 ~ 6 . 6 W である。

【0029】

図 3 に $v (D_{melted})^2$ (伝搬速度 v と D_{melted} の 2 乗の積) と入力パワー P との関係を示す。図 4 に $v (M F D)^2$ (v と M F D の二乗の積) の入力パワー P との関係を示す。図より $v (D_{melted})^2$ と $v (M F D)^2$ の値は、M F D が十分に異なるにも関わらず 3 種の光ファイバで良好に一致した。各図中の直線は、 P が 2 . 0 W 以上の条件 (i) を満たすデータ ($n = 13$) に対して最小二乗法を用いて求めた直線である。特に、条件 (i) では、下記の近似式 (1-1) (1-2) (2) が非常に良い精度で成立する。ここで K は比例係数であるが、式 (1-2) の通り、条件 (i) では K は定数の 6 2 . 7 6 であるため D_{melted} の近似式は 式 (3) で与えられる。

【0030】

係数 $K (= v (D_{melted})^2 / P)$ は光源パワー P によるプラズマ化の効率を表すと考えられる。すなわち、ファイバヒューズ現象では光源が単位時間 t あたりに行う仕事 $P \times t$ (J) が、

(a) コア周辺の D_{melted} 領域内の温度上昇およびプラズマ化と、

(b) D_{melted} 領域外部の温度上昇などに消費される過程と考えられる。

【0031】

条件 (i) では D_{melted} (プラズマの大きさ) が大きいので光源からの光が高い効率的で熱に変換されるので、光源の仕事 $P \times t$ (J) の主な部分は上記 (a) の D_{melted} 領域の内部で消費され、上記 (b) (伝熱・輻射によるクラッドや被覆の温度上昇と光の散逸) の寄与分は比較的小さいと推測される。この時、上記 (a) の寄与分は、時間 t (s) の間にプラズマ化した円柱領域の体積 ($= \pi (D_{melted} / 2)^2 \cdot v t$) に比例するので、(1-1) 式の関係が生じたと考えられる。

【0032】

[数式欄]

$$v (D_{melted})^2 = K \times P \quad \dots (1-1)$$

条件 (i) において

$$K (i) = 6 2 . 7 6 \quad \dots (1-2)$$

10

20

30

40

50

$$v(i)(MFD)^2 = 11.44P(i) + 16.55 \quad \dots (2)$$

$$D_{melted}(i) = (62.76P(i) / (11.44P(i) + 16.55))^{0.5} MFD \quad \dots (3)$$

条件(ii)において

$$K(ii) = 19.70(D_{melted}(ii) / MFD)^2 \quad \dots (1-3)$$

$$P(ii) = K(i)P(i) / K(ii) \quad \dots (4)$$

$$D_{melted}(ii) = ((62.76P(ii) - 52.72) / 11.44P(ii))^{0.5} MFD \quad \dots (5)$$

【0033】

一方、 $P = 2.0W$ 以下の条件(ii)での K と $(D_{melted}/MFD)^2$ との関係を図5に示す。図より、両者の間には、比例の関係が成り立つと考えられる。これは、 P の低下に伴い、プラズマの高温度部の面積(D_{melted}^2 に比例すると考えられる)が減少し、効率 K が低下するためと考えられる。図中の直線は、近似の連続性を考慮して、境界の $P = 2.0W$ の時に $K(i) = K(ii) = 62.76$ であることを仮定して決定した直線であり、(1-3)式で与えられる。

【0034】

図6に D_{melted}/MFD と P との関係を示す。条件(i)では、測定値の各点と式(3)による近似予測値(点線)は良く一致した。しかし、条件(ii)では、特にSMFの $P = 1.4, 1.5W$ で両者の乖離が大きくなる。その主な原因は、式(1-2)では $K(i) = 62.76$ を仮定したが、測定値は式(1-3)の $K(ii)$ に従い 62.76 以下になるためである(図5)。そこで、 $K(ii)$ の低減分を補償するために(4)式を仮定し、条件(ii)では、これを予測値 $P(ii)$ とした。すなわち式(3)に式(1-3)と式(4)を代入して $P(ii)$ と D_{melted}/MFD の関係を表す近似式(5)を決定した。図中に式(5)による近似値を実線で示している。なお、各式に用いた添え字(i)と(ii)は、条件(i)と条件(ii)をそれぞれ表している。

【0035】

実験値(各プロット点)と予測値(条件(i):点線、条件(ii):実線)は良好な一致傾向を示し、特に条件(ii)の範囲でのSMFの D_{melted} の急減も式(5)によって良く再現された。 $P = 1.4 \sim 6.6W$ の全データ($n = 18$)に対して、真値(実測値)と推定値の相対誤差は、 $-8.7 \sim +8.6\%$ ($RMS = 3.4\%$)となり、良好な推定精度を確認した。上記の近似式(3)と(5)を用いることで、任意の入力パワー P と光ファイバのMFDの値に対して D_{melted} の値を高い精度で推定することが可能となる。

【0036】

(実施形態2)

本実施形態は、ヒューズストッパが備えるHAFの断面内の構造の例と光伝送路内での使用例に関するものである。

図7は、HAFの断面図の一例を示す図である。図中に示す光ファイバ(HAF)は、クラッド11、コア12及び空孔13を有し、クラッド11内にコア12と円環形状に配列された複数の空孔13とで構成されている。図7では、それぞれ空孔直径を d 、空孔13の内接円直径 c を示した。

【0037】

前述のように D_{melted} はファイバヒューズによって溶融・気化された断面内の円状領域の直径であり、その外側近傍は、ファイバヒューズ伝搬時に、仮にガラス状態を保っていたとしても非常に高温・高圧になるため容易に変形・破壊される。従って c と D_{melted} の比 c/D_{melted} の値が小さいほどファイバヒューズの中心の最も高温な領域の近傍に空孔が存在することとなる。

【0038】

10

20

30

40

50

その際、ファイバヒューズによって生じる高温気体及びプラズマが空孔領域に流入、急激に膨張し、そのエネルギーを失うため低温になりやすい。つまり、 c/D_{melted} が小さい空孔構造ほどファイバヒューズを容易に停止するため、 c/D_{melted} の値はファイバヒューズストップに用いられるHAF構造の指標となる。

【0039】

もう一つの指標として空孔面積 $(=N\pi(d/2)^2)$ と溶融・気化された領域の面積 $(=\pi(D_{\text{melted}}/2)^2)$ との比 S がある。 S が大きいほどファイバヒューズは停止しやすい。これは高温の気体及びプラズマの体積膨張が起こりやすく、そのエネルギーを失うため低温になりやすいからである。なお空孔総数を N とすると $S=N(d/D_{\text{melted}})^2$ である。

【0040】

図8は、HAFの伝搬閾値を測定評価する系の一例を示す図である。HAF45と商用の単一モード光ファイバ(SMF)46を融着接続し、単一モード光ファイバ46(SMF)の終端でファイバヒューズを発生させ、接続点43を通過して、ファイバヒューズがHAF45を伝搬するか否かを確認評価した。評価において、光源44の波長は光通信の代表的な使用波長である1550nm付近とした。HAFにおいては、入力パワーが小さい時の方が、ファイバヒューズがHAFに侵入する距離が長い、つまり伝搬通過しやすいという結果が報告されているため、標準的な単一モード光ファイバ(SMF)の伝搬閾値に近い $P=2.0W$ で評価を行った。2.0Wの条件でファイバヒューズが停止したHAFについては、さらに15.0Wでの評価も行い、15.0Wの条件においてもファイバヒューズが停止することを確認した。

【0041】

図9における表は、21種類のHAFを、図8の実験系においてファイバヒューズ伝搬の有無を確認した実験の結果である。表中には、空孔直径 d 、空孔の内接円直径 c 、空孔数 N 、HAF45についての波長1550nmにおけるMFD、 $P=2.0W$ において前述の近似式(3)から得られた、それぞれのHAFについて想定される D_{melted} (計算値)、 c/D_{melted} 、溶融・気化された領域の面積に対する空孔の面積比を $S(=N(d/D_{\text{melted}})^2)$ として記載した。また、図8で伝送路ファイバとして想定しているのは、単一モードファイバ(SMF)46であり、その波長1550nmにおけるMFDは約 $10\mu m$ であった。ヒューズの伝搬を確認した8種のHAFについては、ヒューズの伝搬閾値も評価したところ、すべて約1.5Wであった。

【0042】

図10は、HAF45におけるファイバヒューズの伝搬または停止と、空孔の溶融・気化された領域に対する面積比 S および c/D_{melted} との関係を示す図である。図から c/D_{melted} の値が1.29以下かつ S の値が0.12(12%)以上の構造領域に本発明のファイバヒューズストップもしくはファイバヒューズ抑制ファイバとして好適となる構造が含まれる。

【0043】

しかし、上記領域には、実験においてファイバヒューズが伝搬してしまう領域も含まれている。従って、HAF45の構造を座標 $(c/D_{\text{melted}}, S)$ で表記した場合、A1(0.81, 0.12)、A2(1.13, 0.36)、A3(1.22, 0.61)、A4(1.24, 1.07)、A5(1.29, 2.21)とすると、直線 $c/D_{\text{melted}}=1.29$ と、直線 $S=0.12$ と、座標A1とA2を含む直線と、座標A2とA3を含む直線と、座標A3とA4とA5を含む直線とで囲まれた構造領域を選定することで、HAF45はファイバヒューズを停止でき、本発明のファイバヒューズストップもしくはファイバヒューズ抑制ファイバとして好適となる。座標A3とA4とA5はほぼ同一直線上にあるため、この直線を最小二乗法によって決定し、上記の領域を等式(A)と不等式(B)を用いて定義すると、下記ようになる。図10には、上記の「ファイバヒューズ停止」の構造領域の境界を点線にて示している。

【0044】

10

20

30

40

50

〔数式欄〕

条件 (i i) の場合

$$D_{melted} = (62.76P / (11.44P + 16.55))^{0.5} MFD$$

条件 (i) の場合

$$D_{melted} = ((62.76P - 52.72) / 11.44P)^{0.5} MFD$$

・・・ (A)

c / D_{melted} が 0.81 以下の場合

$$S \geq 0.12$$

c / D_{melted} が 0.81 ~ 1.13 の場合

$$S \geq 0.750 (c / D_{melted}) - 0.488$$

c / D_{melted} が 1.13 ~ 1.22 の場合

$$S \geq 2.778 (c / D_{melted}) - 2.779$$

c / D_{melted} が 1.22 ~ 1.29 の場合

$$S \geq 22.85 (c / D_{melted}) - 27.26$$

c / D_{melted} が 1.29 の場合

$$S \geq 2.21$$

・・・ (B)

〔0045〕

なお S の値については、ファイバヒューズを停止するには値が大きい程好ましいが、 c の値に依存する幾何学的な上限値が存在する。また S の値が過剰に大きすぎると製造精度の劣化や機械強度の低減を招きやすくなる。従って、これらの要因を勘案して、上記の「ファイバヒューズ停止」の条件範囲の構造領域で S の値を適宜設定すれば良い。また図 6 に示したように D_{melted} は入力パワー P の減少に伴って減少するため、 P の値が比較的小さい時は c の値を小さくして、空孔の位置をファイバの中心に近づけて配置する必要がある。従って、入力パワーの下限値 P_{min} もしくはファイバヒューズの伝搬閾値 P_{th} を式 (3) もしくは (5) に代入して得られる D_{melted} の値を基準に、 c の値を決定すればよい。しかし、逆に例えば、 P_{min} が 4 W 以上の時は常に D_{melted} は MFD の 2 倍以上、 P が 6 W 以上の時は常に D_{melted} は MFD の 2.1 倍以上になる。従って、想定している入力パワーの下限値 P_{min} が比較的大きく 5 W 付近の場合、 c の値は比較的大きくても良い。一般に c の値が小さいと HAF の設計や製造が困難になる傾向があるので、このような場合、上記の「ファイバヒューズ停止」の条件範囲の中で、 c が MFD の 2 ~ 2.1 倍以上の領域が HAF の設計や製造性の観点から好適となる。

〔0046〕

図 10 に示した構造の HAF において、図 8 の実験系で検証を行ったところ、ファイバヒューズが HAF 内に侵入した侵入長は大半が 0.5 mm 以下であり、最長でも 5 mm に到達することはなかった。従って、前記構造の HAF をヒューズストップとして用いる場合、HAF の長さを 0.5 ~ 5 mm 程度とすることが好適となる。また、前記長さの HAF に適当な長さの単一モード光ファイバを融着接続する構成とすることも可能である。ただし、この場合は融着接続時に、条件によっては接続の近傍で空孔が放電によって潰れてしまうことがあり、融着条件に留意するか、融着後に HAF の空孔部の長さが 0.5 mm 以上確保されているかを確認する必要がある。また、融着接続損失を抑制するためには、HAF の MFD と前記単一モード光ファイバの MFD とが、概略等しいことが好ましい。例えば、HAF の MFD と単一モード光ファイバの MFD との誤差は $\pm 5 \sim 10 \%$ であることが好ましい。

〔0047〕

前記のように本発明において用いられる HAF は 0.5 mm ~ 数 mm のごく短尺で良いため、単一モードファイバとの接続点をコネクタの内部に含めて、これを保護する構成にしても良い。このような光コード化した構成の場合、伝送装置の近傍や伝送路途中に挿入することが容易である。仮に、光ファイバ伝送路中でファイバヒューズが発生した場合も、前記のヒューズストップでファイバヒューズを停止できるので、伝送装置や光ファイバ伝送路を、ファイバヒューズによる破壊から保護することができる。

【0048】

(実施形態3)

本実施形態は、本発明に係るHAFの断面内の構造の例に関するものである。

本発明において、ファイバヒューズストッパに用いられるHAFは幅広い光パワー領域を想定している。従って、入力パワーPを特定の使用範囲で変えた時も、前記実施形態に記載したパラメータ(c/D_{melted} , S)の組み合わせが、「ファイバヒューズ停止」の条件範囲に含まれていることを確認する必要がある。そのために、以下の検証実験を行った。

【0049】

図9の表中No. 2のHAFと図8の実験系を用いてファイバヒューズの停止実験を行った。その際の入力パワー条件は、 $P = 2W, 5W, 10W, 15W, 22W$ とした。実際の停止実験においてファイバヒューズはすべての条件で停止し、ファイバヒューズがHAF内に侵入した侵入長は $0.3mm$ 以下(P が $22W$ の時に最大値 $0.3mm$)であった。これらの条件に関して、No. 2のHAFのMFD= $9.7\mu m$ とそれぞれのPの値に対する、(c/D_{melted} , S)の座標点を図11に示した。図中には図10と同じく「ファイバヒューズ停止」の範囲を示す境界を点線で示した。図より、No. 2のHAFについてPの値を大きく変化させても、(c/D_{melted} , S)の各座標はすべて「ファイバヒューズ停止」の範囲に含まれた。これは、本発明のHAFおよびHAFの空孔構造の規定方法の妥当性を裏付ける結果である。

【0050】

(実施形態4)

本実施形態は、本発明に係るHAFの断面内の構造の例に関するものである。

HAF自体を単独で通信用あるいは光給電などの高い光パワーの伝送用のファイバヒューズ抑制ファイバとして用いる際はSMFなどの伝送用光ファイバとの接続性の問題は考慮する必要がない。この場合に主に問題となるのは、光パワーの制限要因である非線形光学現象(主に誘導ラマン散乱)とファイバヒューズの発生との2点となる。例えば、誘導ラマン散乱によって $1550nm$ 近傍の波長の光を使って伝送できる光パワーは、 $1km$ の伝送距離を想定した際にSMFでは最大 $15W$ 程度に、 $10km$ の伝送距離を想定した際に最大 $1.5W$ 程度に制限される。

【0051】

非線形光学現象を回避するためには実効断面積 A_{eff} (近似的にMFDの2乗に比例する)、つまりMFDを拡大する方法が考えられる。また、これらの使用想定パワー領域 $1.5W \sim 15W$ 以上はSMFのファイバヒューズ伝搬閾値(P_{th})の約 $1.5W$ をはるかに超える場合があるため、前述のファイバヒューズ発生の対策も必要となる。

【0052】

上記の観点から、MFDをSMFの値(約 $10\mu m$)以上、好ましくは $15\mu m$ 以上に拡大したHAFはその際の伝送路ファイバとして有望である。しかしながら、図6に示すように伝搬閾値近傍で D_{melted} が急減するため、空孔の内接円直径 c を比較的小さくする必要がある。これは空孔がコア中心の近い位置に配置されることを意味するためMFD及び実効断面積 A_{eff} の拡大が困難になってしまう。つまり、非線形光学現象を回避するために実効断面積 A_{eff} を拡大することと、ファイバヒューズを停止させるために空孔の内接円直径 c を小さくする(実効断面積 A_{eff} が拡大できない)こととがトレードオフの状態になっている。

【0053】

本実施形態では、このトレードオフを大きく緩和するHAF構造を説明する。非特許文献4に示されている通り、通常の(空孔型ではない)各種の単一モード光ファイバにおいて、ファイバヒューズ伝搬閾値 P_{th} はMFDに比例することが知られており、その関係は概略、以下の式(6)で与えられる。

[数式欄]

$$P_{th} = 0.135 MFD$$

$$\dots (6)$$

【0054】

従って、図6の D_{melted} の変化率が緩やかになる特異点である2.0W付近までは、MFD拡大の効果によってファイバヒューズの発生を回避する構造を用いれば上記のHAFの空孔設計上のトレードオフが緩和できる。すなわち式(6)に $P_{th}=2.0W$ を代入した結果より、使用波長におけるMFDを $15\mu m$ 程度以上に拡大すれば良い。この時、想定する最大入力パワー（例えば、光源の最大出力パワー）を P_{max} とすると、 $P=P_{th}\sim P_{max}$ の条件範囲で式(3)から D_{melted} の値を計算し、 $(c/D_{melted}, S)$ の座標が図11の「ファイバヒューズ停止」の範囲内に含まれるように、 c 、 d 、空孔数 N といった構造パラメータを選択する。

【0055】

選択された構造パラメータであれば、 $P=1.5W\sim P_{max}$ の条件範囲でファイバヒューズは発生せず、かつMFDの拡大によって非線形光学現象の閾値もSMFの約2.3倍（=MFD比1.5の2乗倍）以上に拡大されるため、約1.5W以上でファイバヒューズ発生懸念があるSMFを用いる際と比較して大幅に有利となり、好適となる。つまり、この構造では $P=1.5W\sim P_{th}$ の範囲の条件ではMFDの拡大効果によって、 $P=P_{th}\sim P_{max}$ の範囲の条件では空孔の効果によってファイバヒューズが発生しない。

【0056】

この際、 D_{melted} の予測を行う際に、HAFのMFDを $15\mu m$ 以上、 P を2.0W以上と設定すれば良いので、式(3)から決まる D_{melted} の値は $26.8\mu m$ 以上となる。なお上記HAFは使用波長において単一モードでも数モードでも良い。数モード構造の場合は基本伝搬モードである LP_{01} モードを伝送に用いれば良い。

【0057】

[付記]

以下は、本実施形態のファイバヒューズ抑制ファイバ及びヒューズストップに使用されるHAFを説明したものである。

(1)：

当該HAFは、屈折率が均一なクラッドと、前記クラッド領域の中央に配置された前記クラッドよりも高い屈折率を有するコアと、前記クラッド領域内の前記コアの外周に、直径が c の円周上に外接するように等間隔に配置された直径 d の N 個の空孔とを有する光ファイバであって、

前記クラッドおよびコアおよび使用波長で規定されるモードフィールド直径をMFD、入力光パワーを P 、ファイバヒューズ発生時に光ファイバが溶融・気化する領域の直径を D_{melted} 、前記 D_{melted} で規定される円の面積と前記空孔が占める面積との比を $S(=N(d/D_{melted})^2)$ とすると、前記 c 、MFD、 D_{melted} 、 P 、 S が上述の式(A)および式(B)を同時に満たすように設定されることを特徴とする。

【0058】

(2)：

使用波長における基本伝搬モード(LP_{01} モード)のMFDが $10\mu m$ 以上、好ましくは概略 $15\mu m$ 以上であり、使用を想定する最大入力パワーを P_{max} とすると、 $P_{th}=0.135MFD$ で規定される P_{th} 以上で P_{max} 以下の範囲の入力パワーにおいて、上記(1)に記載の空孔構造条件を満たすことを特徴とする。

【0059】

(効果)

本発明は、ファイバヒューズの伝搬を確実に停止するHAF、およびこれを用いたファイバヒューズストップ、光コネクタ、光伝送システム、光ファイバ、及びファイバヒューズ停止方法を提供することができる。また挿入損失が十分に低く、高次モード発生や機械的強度の低下の懸念などが小さく、低いコストで性能の歩留まりの良く作製が可能で、任意の入力パワー P と、ファイバのMFDの条件に対して、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ストップ、および光コネクタ、およびファイバヒューズの発生を抑制する光ファイバ伝送路を提供することができる。

【符号の説明】

【 0 0 6 0 】

1 1 : クラッド

1 2 : コア

1 3 : 空孔

4 1 : 単一モード光ファイバ

4 2 : 単一モード光ファイバ（試験用）

4 3 : 接続点

4 4 : 光源

4 5 : H A F

10

20

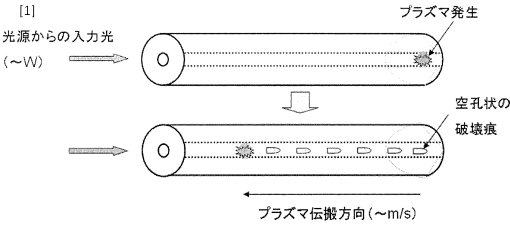
30

40

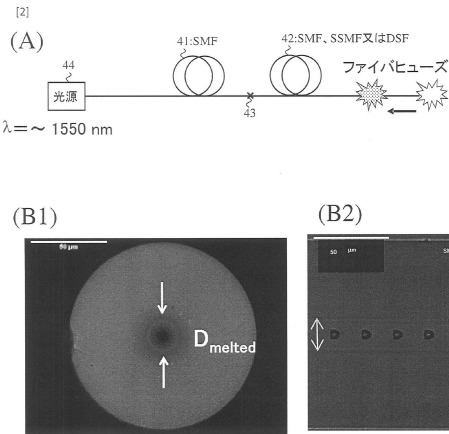
50

【図面】

【図 1】

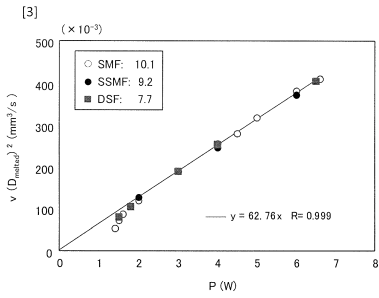


【図 2】

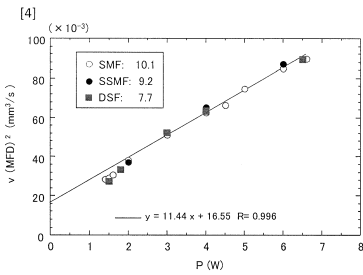


10

【図 3】

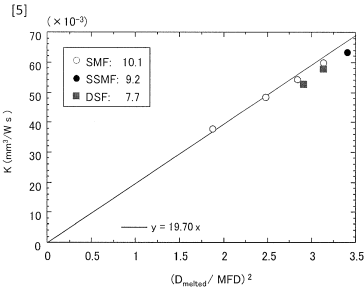


【図 4】

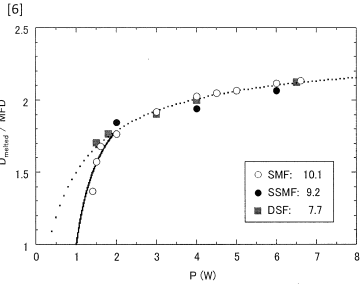


20

【図 5】



【図 6】

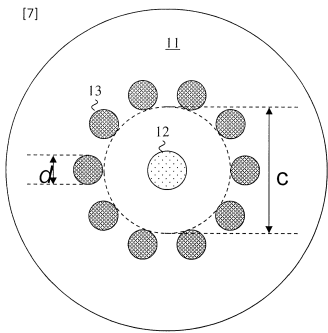


30

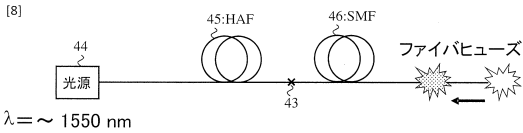
40

50

【図 7】



【図 8】



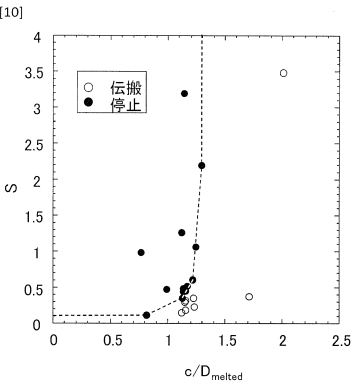
10

【図 9】

[9]

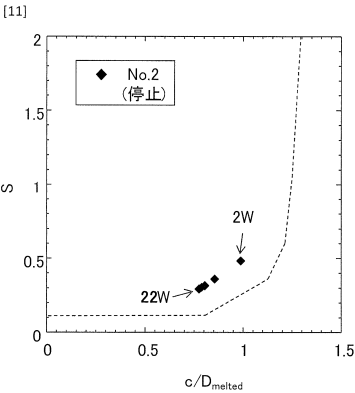
No.	d	c	N	MFD	D_{method} (計算値)	c/D_{melted}	S	伝搬 停止
1	4.5	30.8	6	10.1	18.0	1.71	0.37	伝搬
2	4.9	17.1	6	9.7	17.3	0.99	0.48	停止
3	5.0	9.4	6	6.9	12.3	0.76	0.99	停止
4	2.2	20.0	10	10.0	17.9	1.12	0.15	伝搬
5	3.4	22.0	10	10.1	18.0	1.22	0.36	伝搬
6	3.4	20.3	10	10.1	18.0	1.13	0.36	停止
7	8.3	20.2	6	10.1	18.0	1.12	1.27	停止
8	18.0	38.7	4	10.8	19.3	2.01	3.49	伝搬
9	16.6	21.2	4	10.4	18.6	1.14	3.20	停止
10	5.1	20.2	6	10.0	17.9	1.13	0.49	停止
11	5.1	20.2	6	9.7	17.3	1.17	0.52	停止
12	4.1	20.4	6	9.9	17.7	1.15	0.32	伝搬
13	8.3	22.8	10	9.9	17.7	1.29	2.21	停止
14	5.9	22.4	10	10.1	18.0	1.24	1.07	停止
15	2.7	22.0	10	10.0	17.9	1.23	0.23	伝搬
16	4.4	21.7	10	10.0	17.9	1.22	0.61	停止
17	3.2	20.8	6	10.1	18.0	1.15	0.19	伝搬
18	4.0	20.5	6	10.0	17.9	1.15	0.30	伝搬
19	4.8	20.0	6	9.9	17.7	1.13	0.44	停止
20	4.8	20.0	6	9.7	17.3	1.16	0.46	停止
21	2.0	14.9	10	10.3	18.4	0.81	0.12	停止

【図 10】



20

【図 11】



30

40

50

フロントページの続き

日本電信電話株式会社内

(72)発明者 野添 紗希

東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内

(72)発明者 松井 隆

東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内

(72)発明者 黒河 賢二

北海道北見市公園町165番地 国立大学法人北見工業大学内

審査官 奥村 政人

(56)参考文献 特開2017-111173 (JP, A)

米国特許出願公開第2002/0114554 (US, A1)

国際公開第2010/023881 (WO, A1)

KUROKAWA et al., Fiber Fuse Propagation and Its Suppression in Hole-Assisted Fibers, IEICE Transactions on Communications, Vol.E94-B, No.2, 日本, 2011年02月, p.384-p.391

TAKENAGA et al., Fiber Fuse Phenomenon in Hole-Assisted Fibers, Fujikura Technical Review, No.40, 日本, 株式会社フジクラ, 2011年, p.12-p.15

竹永勝宏 他, 空孔アシストファイバにおけるファイバヒューズ現象, フジクラ技報, 第118号, 日本, 株式会社フジクラ, 2010年, p.1-p.5

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

G02B 6/02- 6/036

G02B 6/44

JSTPlus (JDreamIII)

JST7580 (JDreamIII)

JSTChina (JDreamIII)