

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2016年10月20日(20.10.2016)



(10) 国際公開番号
WO 2016/167080 A1

- (51) 国際特許分類:
G02B 6/02 (2006.01) G02B 6/032 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/058864
- (22) 国際出願日: 2016年3月18日(18.03.2016)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2015-082511 2015年4月14日(14.04.2015) JP
特願 2015-185252 2015年9月18日(18.09.2015) JP
- (71) 出願人: 日本電信電話株式会社(NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 松井 隆(MATSUI, Takashi); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町三丁目9番11号N T T知的財産センタ内 Tokyo (JP). 辻川 恭三(TSUJIKAWA, Kyozou); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町三丁目9番11号N T T知的財産センタ内

Tokyo (JP). 山本 文彦(YAMAMOTO, Fumihiko); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町三丁目9番11号N T T知的財産センタ内 Tokyo (JP). 半澤 信智(HANZAWA, Nobutomo); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町三丁目9番11号N T T知的財産センタ内 Tokyo (JP).

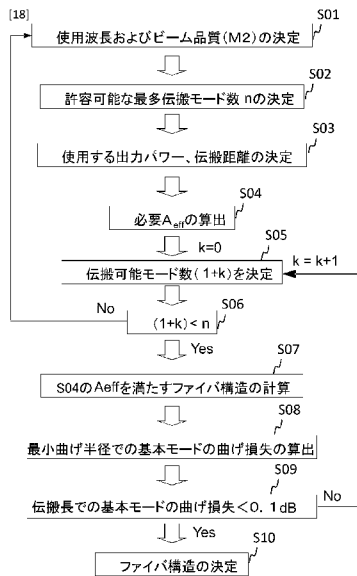
(74) 代理人: 岡田 賢治, 外(OKADA, Kenji et al.); 〒1050003 東京都港区西新橋二丁目12番5号瀬戸ビル3階アイル知財事務所 Tokyo (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[続葉有]

(54) Title: OPTICAL FIBER DESIGN METHOD

(54) 発明の名称: 光ファイバ設計方法



(57) Abstract: The purpose of the present invention is to provide: a beam propagation method that makes it possible to meet requirements regarding a desired output power, propagation distance, and beam quality; and an optical fiber design method for designing the structure of an optical fiber. In the present invention, the structure of an optical fiber is determined by calculating an effective core cross-sectional area A_{eff} on the basis of desired specifications and adjusting, as appropriate, the structure and the number of propagated modes of an optical fiber satisfying said core cross-sectional area A_{eff} . It is thus possible to achieve long-range propagation of high-output laser light while maintaining beam quality by controlling the excitation ratio of a high-order mode when coupling laser light to an optical fiber designed in this manner.

(57) 要約: 所望の出力パワー、伝搬距離、及びビーム品質の要求条件を満たすことができるビーム伝搬方法及び光ファイバの構造を設計する光ファイバ設計方法を提供することを目的とする。本発明は、所望の仕様値に基づき実効コア断面積 A_{eff} を算出し、これを満たす光ファイバの構造と伝搬させるモード数と適宜調整することで、光ファイバの構造を確定させる。そのように設計された光ファイバにレーザ光を結合する際に高次モードの励振比率を制御することで高出力レーザの光をビーム品質を維持して長距離伝搬可能とする。

- S01 Determine use wavelength and beam quality (M2)
- S02 Determine maximum propagation mode number n that can be permitted
- S03 Determine output power to be used, propagation distance
- S04 Calculate necessary A_{eff}
- S05 Determine propagable mode number (1+k)
- S07 Calculate fiber structure that satisfies A_{eff} of S04
- S08 Calculate bending loss of basic mode at smallest bending radius
- S09 Bending loss of basic mode at propagation length < 0.1 dB
- S10 Determine fiber structure

WO 2016/167080 A1



(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：光ファイバ設計方法

技術分野

[0001] 本発明は、高出力かつ高品質に光を伝搬する光ファイバの設計方法に関するものである。

背景技術

[0002] 現在、ファイバレーザーを用いたレーザー加工の分野で用いられている光ファイバにはシングルモードとマルチモードの2種類がある。レーザー加工で用いるシングルモード光ファイバでは、一般にビーム品質の尺度である M^2 の値が2以下であることが目安とされている。従って、シングルモード光ファイバを用いてファイバレーザーの出射光を伝搬させる方が、マルチモード光ファイバと比較してビーム品質が良いため加工上のメリットは大きい。しかし、出力パワーと伝搬可能距離は非線形光学現象、特に誘導ラマン散乱（SRS: Stimulated Raman Scattering）によって制限され、例えば1 kW以上の光波を伝搬させる場合には伝搬可能な距離が数mに制限されてしまう。そのためファイバレーザーの出力パワーをマルチモード光ファイバを用いて数10mから数100m伝搬させてレーザー加工に用いる場合がある。しかし、マルチモードのファイバレーザーでは必然的にビーム品質、その尺度である M^2 の値がシングルモードのファイバレーザーよりも劣化する。

[0003] 加えて、非特許文献1に示すようにシングルモードのファイバレーザーでも10 kW程度の出力を得られるものが実現されているが、そのデリバリー用ファイバ（フィーディングファイバ）の長さは数10mに制限されている。これは、前記のSRSをシングルモード光ファイバで抑制するには、後述するように実効コア断面積（ A_{eff} ）の拡大が必要になるが、同時に曲げ損失の増加とトレードオフになり、更に大きな A_{eff} を実現するためには、デリバリー用光ファイバの外径をmmオーダーに拡大する必要が生じる。このよう

に外径が大きくなると、光ファイバの可とう性が失われ、光ファイバを曲げることが困難になり、破断や破損が生じやすく、長距離のデリバリーに適さないという問題がある。

[0004] 上記をまとめると、先行技術ではkW級の高パワー光をシングルモードの光ファイバおよびファイバレーザーで数10mから数100m伝搬させることが非常に困難である。

[0005] その解決のために光ファイバのパラメータのひとつである実効コア断面積 A_{eff} (一般にモードフィールド径の2乗に比例する) の拡大が有効であり、例えば、非特許文献2から5に示す各種の屈折率分布のシングルモード光ファイバの設計が検討されている。

[0006] しかしながら、先行技術文献では提案されている光ファイバは A_{eff} の値は規定されているものの、出力パワーに対して使用できる伝搬距離などについては明確化されておらず、kW級の高パワー光を数10~数100m伝搬させることができるか否か、明らかではない。さらにはそのファイバ設計のフローや実用性を考慮した光ファイバ外径の範囲なども明確にされていない。

先行技術文献

非特許文献

[0007] 非特許文献1：市毛 他. , “低曲げ損失かつ大きな実効コア断面積を有するオールソリッドフォトニックバンドギャップファイバ”, 信ソ大, B-13-23, 2012.

非特許文献2：W. S. Wong et al. , “Breaking the limit of maximum effective area for robust single-mode propagation in optical fibers”, Opt. Lett. , vol . 30, no. 21, pp. 2855-2857, 2005.

非特許文献3：M. Napeirala et al. , “Extremely large-mode-area photonic crystal fibre with low bending loss”, Opt

. Express, vol. 18, no. 15, pp. 15408–15418, 2010.

非特許文献4: M. Kashiwagi et al., “Effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area and low bending loss for compact high-power all-fiber lasers”, Opt. Express, vol. 20, no. 14, pp. 15061–15070, 2012.

非特許文献5: M. C. Swan et al., “33 μm Core effectively single-mode chirally-coupled-core fiber laser at 1064-nm”, OFC2008, OWU2, 2008.

非特許文献6: H. Yoda et al., “Beam quality factor of higher order modes in a step-index fiber”, J. Lightwave Technol., vol. 24, no. 3, pp. 1350–1355, 2006.

非特許文献7: G. P. Agrawal, “Nonlinear Fiber Optics”, ACADEMIC PRESS.

非特許文献8: F. A. Oguama et al., “Simultaneous measurement of the Raman gain coefficient and the nonlinear refractive index of optical fibers: theory and experiment”, J. Opt. Soc. Am. B, vol. 22, no. 2, pp. 426–436, 2005.

非特許文献9: Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba, “Full-vectorial finite elemen

t beam propagation method with perfectly matched layers for anisotropic optical waveguides”, IEEE J. Lightwave Technol., vol. 19, no. 3, pp. 405–413, 2001.

非特許文献10: Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba, “Empirical relations for simple design of photonic crystal fibers”, Optical Society of America, Optics Express, 10 January 2005, Vol. 13, No. 1, pp. 267–274.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] 前記の通り、従来の検討例においては要求される出力パワー、伝搬距離、及びビーム品質の要求条件に対してそれらを満たすことができる光ファイバの構造が明確にされていなかった。

[0009] そこで、本発明は、所望の出力パワー、伝搬距離、及びビーム品質の要求条件を満たすことができる光ファイバを設計する光ファイバ設計方法及びその光ファイバ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

[0010] 前記目的を達成するために、光ファイバの所望仕様から A_{eff} を算出してファイバ構造を仮決めし、基本モードや高次モードの曲げ損失値との関係を考慮してファイバ構造を修正していくこととした。

[0011] 具体的には、本発明に係る光ファイバ設計方法は、使用するフォトニッククリスタルファイバ（PCF）のファイバ損失及びラマン利得係数、伝搬する光の使用波長、前記PCF伝搬後のビーム品質 M^2 、レーザ出力値、伝搬距離、最小曲げ半径を決定する仕様値決定ステップと、

数 1 を用いて伝搬可能な最多伝搬モード数 n を算出する最多伝搬モード数算出ステップと、

数 2 を用いてファイバ損失及びラマン利得係数から実効コア断面積 A_{eff} を算出する実効コア断面積算出ステップと、

前記 A_{eff} を満たす PCF の空孔の直径 d と間隔 Λ を計算するファイバ構造算出ステップと、

前記ファイバ構造算出ステップで計算した構造の PCF で最小曲げ半径での曲げ損失を計算し、前記伝搬距離から伝搬長の曲げ損失を計算する曲げ損失計算ステップと、

前記伝搬長の曲げ損失が所定値未満であることを確認し、前記ファイバ構造算出ステップで計算した PCF の構造を確定する確認ステップと、

前記確認ステップで前記伝搬長の曲げ損失が所定値以上である場合、モード数を 1 つ増やして前記ファイバ構造算出ステップ、前記曲げ損失計算ステップ、及び前記確認ステップを、モード数が最多伝搬モード数 n に達するまで繰り返すモード増加ステップと、

を行う。

数 1 と数 2 については後述する。

[0012] 本発明に係る光ファイバ設計方法は、要求条件から光ファイバの必要 A_{eff} を算出し、これを満たすフォトニック結晶ファイバ (PCF: Photonic Crystal Fiber) の構造を仮設定し、曲げ損失が規定値未満になるように PCF の構造を微調整する。

[0013] また、次の手法でファイバ構造を決定することもできる。

すなわち、本発明に係る光ファイバ設計方法は、

使用するフォトニッククリスタルファイバ (PCF) のファイバ損失及びラマン利得係数、伝搬する光の使用波長、前記 PCF 伝搬後のビーム品質 M^2 、レーザ出力値、伝搬距離、最小曲げ半径を決定する仕様値決定ステップと、

数 1 を用いて伝搬可能な最多伝搬モード数 n を算出する最多伝搬モード数

算出ステップと、

数 2 を用いてファイバ損失及びラマン利得係数から実効コア断面積 A_{eff} を算出する実効コア断面積算出ステップと、

前記 A_{eff} 以上となる PCF の空孔の直径 d と間隔 Λ を計算し、横軸 d/Λ 、縦軸 Λ のグラフに前記 A_{eff} 以上となる点をプロットするファイバ構造算出ステップと、

PCF の空孔の直径 d と間隔 Λ から該 PCF でカットオフさせる最小の高次モードの最小曲げ半径での曲げ損失を計算し、横軸 d/Λ 、縦軸 Λ のグラフに該曲げ損失が 1 dB/m 以上となる点をプロットする曲げ損失計算ステップと、

前記ファイバ構造算出ステップでグラフにプロットした点の領域と前記曲げ損失計算ステップでグラフにプロットした点の領域とが重複する重複範囲を検出し、前記重複範囲にある直径 d と間隔 Λ の空孔を持つ PCF 構造に決定する構造決定ステップと、

を行う。

数 1 と数 2 については後述する。

[0014] PCF の設計において、横軸 d/Λ 、縦軸 Λ のグラフ上で所望値以上の A_{eff} の領域と所望の高次モードのカットオフ領域との重複領域にある直径 d と間隔 Λ の空孔を持つ PCF 構造とすることで、所望の高次モード以上のモードを十分にカットオフでき、 A_{eff} が大きい領域を選定することが可能になる。

[0015] 従って、本発明は、所望の出力パワー、伝搬距離、及びビーム品質の要求条件を満たすことができる光ファイバ設計方法を提供することができる。

[0016] 上記光ファイバ設計方法で設計した PCF の 1 例である。

当該 PCF は、光の伝搬方向に直径 d の空孔が間隔 Λ で配列する 1 cell 構造の PCF であって、

座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A1 (0.42, 16.88)

B (0.42, 10.94)
C1 (0.60, 15.63)
C2 (0.69, 31.88)
D (0.74, 43.12)
E (0.75, 44.38)
C3 (0.76, 47.81)
F (0.81, 60.63)
G (0.85, 60.63)
H (0.85, 77.50)
I (0.90, 91.88)

を頂点とする多角形で囲まれる領域にある直径 d と間隔 Λ の空孔を持つことを特徴とする。

第1高次モード以上を十分にカットオフしつつ、 A_{eff} をできるだけ大きくすることができる。

[0017] 上記光ファイバ設計方法で設計したPCFの1例である。

当該PCFは、光の伝搬方向に直径 d の空孔が間隔 Λ で配列する1cell構造のPCFであって、

座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A1 (0.42, 16.88)
B (0.42, 10.94)
C1 (0.75, 15.00)
D1 (0.75, 20.00)
C2 (0.78, 35.00)
D2 (0.80, 35.93)
E (0.80, 45.63)
F (0.83, 51.56)
C3 (0.90, 54.38)
I (0.90, 91.88)

を頂点とする多角形で囲まれる領域にある直径 d と間隔 Λ の空孔を持つことを特徴とする。

第3高次モード以上を十分にカットオフしつつ、 A_{eff} をできるだけ大きくすることができる。

[0018] 上記光ファイバ設計方法で設計したPCFの他の例である。

当該PCFは、光の伝搬方向に直径 d の空孔が間隔 Λ で配列する1cell構造のPCFであって、

座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A1 (0.42, 16.88)

B (0.42, 10.94)

C (0.75, 14.24)

D (0.75, 12.10)

E (0.79, 20.00)

F (0.85, 30.00)

G (0.85, 41.58)

H (0.89, 50.00)

I (0.89, 58.95)

J (0.90, 60.0)

K (0.90, 91.88)

を頂点とする多角形で囲まれる領域にある直径 d と間隔 Λ の空孔を持つことを特徴とする。

第4高次モード以上を十分にカットオフしつつ、 A_{eff} をできるだけ大きくすることができる。

[0019] 上記光ファイバ設計方法で設計したPCFの他の例である。

当該PCFは、光の伝搬方向に直径 d の空孔が間隔 Λ で配列する7cell構造のPCFであって、

座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A1 (0.20, 10.98)

B (0. 20, 4. 95)
C1 (0. 25, 5. 27)
D (0. 29, 9. 87)
E (0. 40, 12. 25)
F (0. 40, 13. 52)
G (0. 49, 14. 15)
H (0. 49, 15. 74)
I (0. 50, 18. 12)
J (0. 58, 18. 12)
K (0. 58, 19. 86)
C3 (0. 60, 20. 34)
L (0. 60, 23. 03)
M (0. 68, 23. 99)
N (0. 68, 31. 60)
O (0. 79, 48. 73)
P (0. 80, 50. 00)

を頂点とする多角形で囲まれる領域にある直径 d と間隔 Λ の空孔を持つことを特徴とする。

第1高次モード以上を十分にカットオフしつつ、 A_{eff} をできるだけ大きくすることができる。

[0020] 上記光ファイバ設計方法で設計したPCFの他の例である。

当該PCFは、光の伝搬方向に直径 d の空孔が間隔 Λ で配列する7cell構造のPCFであって、

座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A1 (0. 20, 10. 98)
B (0. 20, 5. 11)
C1 (0. 40, 5. 90)
D (0. 40, 10. 03)

E (0.50, 11.93)

F (0.50, 14.47)

C3 (0.60, 20.18)

G (0.69, 22.08)

H (0.68, 23.67,)

I (0.70, 24.30)

J (0.70, 32.87)

K (0.80, 50.00)

を頂点とする多角形で囲まれる領域にある直径 d と間隔 Λ の空孔を持つことを特徴とする。

第3高次モード以上を十分にカットオフしつつ、 A_{eff} をできるだけ大きくすることができる。

[0021] 上記光ファイバ設計方法で設計したPCFの他の例である。

当該PCFは、光の伝搬方向に直径 d の空孔が間隔 Λ で配列する7cell構造のPCFであって、

座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A1 (0.20, 10.98)

B (0.20, 5.11)

C (0.50, 6.23)

D (0.50, 10.00)

E (0.60, 15.18)

F (0.60, 17.76)

G (0.65, 20.12)

H (0.70, 20.35)

I (0.79, 25.06)

J (0.79, 29.53)

K (0.78, 29.76)

L (0.78, 38.29)

M (0.80, 40.12)

N (0.80, 50.00)

を頂点とする多角形で囲まれる領域にある直径 d と間隔 Λ の空孔を持つことを特徴とする。

第4高次モード以上を十分にカットオフしつつ、 A_{eff} をできるだけ大きくすることができる。

[0022] 上述したPCFを用いるビーム伝搬方法を説明する。

本ビーム伝搬方法は、レーザからの1kW以上の光を10m以上伝搬させて出力端から出力させるビーム伝搬方法であって、

前記レーザから前記出力端までを、前記光の波長において伝搬モード数が2である2モードファイバで接続し、

前記2モードファイバの第1高次モードの励振比率を50%以下として光を伝搬させることを特徴とする。

[0023] 2モードファイバは、シングルモードファイバに比べて A_{eff} が大きい。このため、SRSを抑制できるため、高出力の光の伝送距離を伸ばすことができる。さらに、2モードファイバの第1高次モードの励振比率をレーザと光ファイバとの光軸で調整することができるため、高出力の光を所望のビーム品質で伝送することができる。

[0024] 具体的には、本発明に係るビーム伝搬方法は、レーザからの1kW以上の光を10m以上伝搬させて出力端から出力させるビーム伝搬方法であって、

前記レーザから前記出力端までを、前記光の波長において伝搬モード数が4以下である4モードファイバで接続し、

前記4モードファイバの第3高次モードの励振率を30%以下として光を伝搬させることを特徴とする。

[0025] 4モードファイバは、シングルモードファイバに比べて A_{eff} が大きい。このため、SRSを抑制できるため、高出力の光の伝送距離を伸ばすことができる。さらに、4モードファイバの第1高次モードと第2高次モードの励振比率をレーザと光ファイバとの光軸で低減し、第3高次モードの励振比率を

光ファイバのモードフィールド径と光ファイバへ結合する光のスポットサイズとで調整することができるため、高出力の光を所望のビーム品質で伝送することができる。

[0026] 従って、本発明に係る光ファイバ設計方法で設計したPCFにて、所望の出力パワー、伝搬距離、及びビーム品質の要求条件を満たすことができるビーム伝搬方法を実現することができる。

発明の効果

[0027] 本発明は、所望の出力パワー、伝搬距離、及びビーム品質の要求条件を満たすことができる光ファイバを設計する光ファイバ設計方法及びその光ファイバを提供することができる。

図面の簡単な説明

[0028] [図1]光ファイバの導波モードの例を示す図である。

[図2]LP01からLP11への軸ずれに対する励振効率を説明する図である。

[図3]光ファイバのMFD差と基本モードから第3高次モードが励振される効率との例を示す図である。

[図4]1c e l l構造のPCFの断面の例を示す図である。

[図5]1c e l l構造のPCFで波長1070nmの光を基本モードで伝搬させるとき、曲げ損失が0.1dB/m以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} の関係を説明する図である。

[図6]1c e l l構造のPCFで波長1070nmの光の第1高次(LP11)モードの曲げ損失が1dB/m以上になる領域(カットオフされる領域)を説明する図である。

[図7]1c e l l構造のPCFで波長1070nmの光の第2高次(LP21)モードの曲げ損失が1dB/m以上になる領域(カットオフされる領域)を説明する図である。

[図8]1c e l l構造のPCFで波長1070nmの光の第3高次(LP02)モードの曲げ損失が1dB/m以上になる領域(カットオフされる領域)

を説明する図である。

[図9] 1 c e l l 構造の P C F で波長 1 0 7 0 n m の光の第 4 高次 (L P 3 1) モードの曲げ損失が 1 d B / m 以上になる領域 (カットオフされる領域) を説明する図である。

[図10] 1 c e l l 構造の P C F の基本モード曲げ損失の 1 0 5 0 n m と 1 0 7 0 n m の構造依存性を説明する図である。

[図11] 7 c e l l 構造の P C F の断面の例を示す図である。

[図12] 7 c e l l 構造の P C F で波長 1 0 7 0 n m の光を基本モードで伝搬させるとき、曲げ損失が 0. 1 d B / m 以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} の関係を説明する図である。

[図13] 7 c e l l 構造の P C F で波長 1 0 7 0 n m の光の第 1 高次 (L P 1 1) モードの曲げ損失が 1 d B / m 以上になる領域 (カットオフされる領域) を説明する図である。

[図14] 7 c e l l 構造の P C F で波長 1 0 7 0 n m の光の第 2 高次 (L P 2 1) モードの曲げ損失が 1 d B / m 以上になる領域 (カットオフされる領域) を説明する図である。

[図15] 7 c e l l 構造の P C F で波長 1 0 7 0 n m の光の第 3 高次 (L P 0 2) モードの曲げ損失が 1 d B / m 以上になる領域 (カットオフされる領域) を説明する図である。

[図16] 7 c e l l 構造の P C F で波長 1 0 7 0 n m の光の第 4 高次 (L P 3 1) モードの曲げ損失が 1 d B / m 以上になる領域 (カットオフされる領域) を説明する図である。

[図17] 7 c e l l 構造の P C F の基本モード曲げ損失の 1 0 5 0 n m と 1 0 7 0 n m の構造依存性を説明する図である。

[図18] 本発明に係る光ファイバ設計方法を説明するフロー図である。

[図19] 1 c e l l 構造の P C F で波長 1 0 7 0 n m の光を伝搬させるとき、 (a) $M^2 \leq 2. 0$ 、 (b) $M^2 \leq 3. 3$ 、 (c) 伝搬モード数が 4 以下、を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} (1 6 0 μm^2 以上) の関係を説明する図である。

斜線で示す領域は、100W出力且つ300m伝送が可能になる領域である。

[図20] 1 c e | | 構造のPCFで波長1070nmの光を伝搬させるとき、
(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下、を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($800 \mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。
斜線で示す領域は、500W出力且つ300m伝送が可能になる領域である。

[図21] 1 c e | | 構造のPCFで波長1070nmの光を伝搬させるとき、
(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下、を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($1600 \mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。
斜線で示す領域は、1000W出力且つ300m伝送が可能になる領域である。

[図22] 1 c e | | 構造のPCFで波長1070nmの光を伝搬させるとき、
(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下、を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($3200 \mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。
斜線で示す領域は、600kWm伝送が可能になる領域である。条件(a)と(b)を満たす領域は存在しない。

[図23] 7 c e | | 構造のPCFで波長1070nmの光を伝搬させるとき、
(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下、を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($160 \mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。
斜線で示す領域は、100W出力且つ300m伝送が可能になる領域である。

[図24] 7 c e | | 構造のPCFで波長1070nmの光を伝搬させるとき、
(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下、を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($800 \mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。
斜線で示す領域は、500W出力且つ300m伝送が可能になる領域である。

[図25] 7 c e | | 構造のPCFで波長1070nmの光を伝搬させるとき、

(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下、を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($1600 \mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。斜線で示す領域は、 $1000W$ 出力且つ $300m$ 伝送が可能になる領域である。

[図26] 7 cell 構造の PCF で波長 $1070nm$ の光を伝搬させるとき、(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下、を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($3200 \mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。斜線で示す領域は、 $2000W$ 出力且つ $300m$ 伝送が可能になる領域である。

[図27] 7 cell 構造の PCF で波長 $1070nm$ の光を伝搬させるとき、(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下、を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($4800 \mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。斜線で示す領域は、 $3000W$ 出力且つ $300m$ 伝送が可能になる領域である。

[図28] 1 cell 構造の PCF の断面の他の例を示す図である。

[図29] 1 cell 構造の PCF で波長 $1070nm$ の光を伝搬させるとき、曲げ損失が $0.1 dB/m$ 以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} の関係を説明する図である。

[図30] 1 cell 構造の PCF で波長 $1070nm$ の光の第1高次 (LP11) モードの曲げ損失が $1 dB/m$ 以上になる領域 (カットオフされる領域) を説明する図である。

[図31] 1 cell 構造の PCF で波長 $1070nm$ の光の第2高次 (LP21) モードの曲げ損失が $1 dB/m$ 以上になる領域 (カットオフされる領域) を説明する図である。

[図32] 1 cell 構造の PCF で波長 $1070nm$ の光の第3高次 (LP02) モードの曲げ損失が $1 dB/m$ 以上になる領域 (カットオフされる領域) を説明する図である。

[図33] 1 cell 構造の PCF で波長 $1070nm$ の光を伝搬させるとき、

$M^2 \leq 2$ 、0を満たす d/Λ と Λ の関係を説明する図である。

発明を実施するための形態

[0029] 添付の図面を参照して本発明の実施形態を説明する。以下に説明する実施形態は本発明の実施例であり、本発明は、以下の実施形態に制限されるものではない。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。

[0030] (実施形態1)

本発明の特徴は、 A_{eff} を拡大することによる出力パワーの向上および伝送距離の長延化を図ることである。本発明の従来技術との大きな違いは、光ファイバが複数モードが伝搬可能な構造である点である。本発明は、入力部で高次モードが励振される効率を十分に低減し、 M^2 を十分に小さい値にすることが可能な領域を明らかにして、 A_{eff} を従来では実現できなかった値にすることを可能とした。

[0031] そこで、まずビーム品質の指標である M^2 値について以下に示す。本発明の実施形態においては、図1に示す各導波モードをもとに説明する。

[0032] 光ファイバの各導波モードの M^2 値は、非特許文献6において基本モードに対しては1.1、第1高次モードに対しては3.3、第2高次モードに対しては3.3、第3高次モードに対しては3.1になることが示されている。また、基本モードと第1高次モードが混在している場合には、第1高次モードの励振比率と基本モードとの位相関係によって M^2 値が変化することが示されており第1高次モードの励振比率がおよそ50%を下回れば、 M^2 値は2.0以下になることがわかる。

[0033] 本実施形態の第1のビーム伝搬方法は、レーザからの1kW以上の光を10m以上伝搬させて出力端から出力させるビーム伝搬方法であって、
前記レーザから前記出力端までを、前記光の波長において伝搬モード数が2である2モードファイバで接続し、
前記2モードファイバの第1高次モードの励振比率を50%以下として光を伝搬させることを特徴とする。

- [0034] 第1高次モードは、一般に光ファイバに光を入力する際に光ファイバの中心からの軸ずれ量に応じて励振比率が変化する。そして、第1高次モードの励振比率を50%以下に低減することは、既存の光入出力に関するアライメント（光軸調心）技術で十分に実現可能である。
- [0035] 従って、第2高次モードをカットオフにし、基本モードと第1高次モードのみが存在する2モードファイバを用いれば、励振比率を適切に制御することで、従来のマルチモードファイバでは実現不可能だった M^2 値が2.0以下の高品質なビーム伝送が可能になり、かつ従来のシングルモードファイバでは実現不可能だった A_{eff} を大きく超えるファイバ設計が可能になる。加えて、基本モードと第1高次モードのみが存在する2モードファイバの M^2 値の最悪値は3.3であり、マルチモード光ファイバと比較して比較的高品質なビーム伝搬を可能とするファイバ設計が可能である。
- [0036] なお、2モードファイバの M^2 値の最悪値の根拠は非特許文献6の図4である。この図にLP01（基本モード）とLP11モード（第1高次モード）が混在する場合のLP11モードの励振比率に対しての M^2 が示されており、 α （LP11モードの励振比率）が1.0の時に M^2 が3.3となっている。そして、意図的にLP11モードを励振しない限り、LP11モードが100%励振されることはないため、2モードファイバの M^2 値の最悪値は3.3である。
- [0037] 本実施形態の第2のビーム伝搬方法は、レーザからの1kW以上の光を10m以上伝搬させて出力端から出力させるビーム伝搬方法であって、
前記レーザから前記出力端までを、前記光の波長において伝搬モード数が4である4モードファイバで接続し、
前記4モードファイバの第3高次モードの励振率を30%以下として光を伝搬させることを特徴とする。
- [0038] 非特許文献6には、基本モードと第3高次モードが混在した場合の M^2 値も示されており、第3高次モードの励振比率がおよそ30%を下回れば、 M^2 値は2以下になることがわかる。基本モードと第3高次モードはファイバ中心

に電界のピークを持つモードであり、モードフィールド径 (MFD 1) のファイバへ入力する光のスポットサイズ (MFD 2) に依存してその結合効率が変化する。図 3 は、縦軸を第 3 高次モードが励振される効率、横軸をファイバへ入力される MFD 差 ($(MFD 2 - MFD 1) / MFD 1$) とし、MFD 差に対する第 3 高次モードが励振される効率 (第 3 高次モードの発生率) との関係を示した図である。

[0039] 図 3 より、MFD 差を 20% 以内に抑えるか、ファイバの MFD 1 よりも大きなスポットサイズのビームを入力すれば、第 3 高次モードの発生をおよそ 30% 以下に低減することが可能で、 M^2 値を 2 以下にすることができる。具体的には、光ファイバ同士の距離 (入力光と 4 モード光ファイバの基本モードとのビーム径の差に相当) に応じて第 3 高次モードが発生するので、ファイバレーザと 4 モード光ファイバとの距離を調整する。なお、第 1 高次モードと第 2 高次モードはファイバレーザと光ファイバの軸ずれにより発生する高次モードであり、第 1 高次モードの軸ずれと励振量の結果から十分に抑圧可能である。

[0040] 以上から、第 4 高次モードをカットオフにした 4 モードファイバを用い、励振比率を上記の手段で適切に制御することによって、 M^2 値が 2.0 以下の高品質なビーム伝搬を可能とするファイバ設計が可能である。さらに、4 モードファイバの M^2 値の最悪値は 3.3 であることから、 M^2 値が、悪くとも 3.3 以下を実現する比較的高品質なビーム伝搬を可能とするファイバ設計が可能である。

[0041] なお、2 モードファイバの M^2 値の最悪値の根拠は非特許文献 6 の図 6 である。この図に LP01 (基本モード) と LP02 モード (第 3 高次モード) が混在する場合の LP02 モードの励振比率に対しての M^2 が示されており、 α (LP02 モードの励振比率) が 0.9 の時に M^2 が 3.3 となっている。従って、4 モードファイバの M^2 値の最悪値は 3.3 である。

[0042] シングルモードのみの伝搬では、 A_{eff} の拡大に限界があるが、本実施形態で説明したビーム伝搬方法のように、2 モードファイバや 4 モードファイバ

を用いて数モードの伝搬を許容し設計範囲を広げることで従来にはない A_{eff} を実現できる。従って、本実施形態のビーム伝搬方法を用いることで所望の出力パワー、伝搬距離、及びビーム品質の要求条件を満たす光の伝搬が可能となる。

[0043] (実施形態2)

本実施形態は、図4に示す空孔2を有する1cellコア構造のPCFにおいて、実効コア断面積 A_{eff} の拡大と既定の曲げ損失 α_b を実現するための構造パラメータ（空孔2の直径 d と空孔2の間隔 Λ ）の設計方法に関する。本実施例では、基本モードの最小曲げ半径、及び高次モードの実効カットオフを規定する曲げ半径を140mmで説明をしているが、本方法はこれに制限されるものではない。

[0044] 本設計方法は、使用するフォトニッククリスタルファイバ（PCF）のファイバ損失及びラマン利得係数、伝搬する光の使用波長、前記PCF伝搬後のビーム品質 M_2 、レーザ出力値、伝搬距離、最小曲げ半径を決定する仕様値決定ステップと、

数1を用いて伝搬可能な最多伝搬モード数 n を算出する最多伝搬モード数算出ステップと、

数2を用いてファイバ損失及びラマン利得係数から実効コア断面積 A_{eff} を算出する実効コア断面積算出ステップと、

前記 A_{eff} 以上となるPCFの空孔の直径 d と間隔 Λ を計算し、横軸 d/Λ 、縦軸 Λ のグラフに前記 A_{eff} 以上となる点をプロットするファイバ構造算出ステップと、

PCFの空孔の直径 d と間隔 Λ から該PCFでカットオフさせる最小の高次モードの最小曲げ半径での曲げ損失を計算し、横軸 d/Λ 、縦軸 Λ のグラフに該曲げ損失が1dB/m以上となる点をプロットする曲げ損失計算ステップと、

前記ファイバ構造算出ステップでグラフにプロットした点の領域と前記曲げ損失計算ステップでグラフにプロットした点の領域とが重複する重複範囲

を検出し、前記重複範囲にある直径 d と間隔 Λ の空孔を持つ PCF 構造に決定する構造決定ステップと、
を行う。

数 1 と数 2 については後述する。

[0045] 図 4 に示すように、本実施例に係る光ファイバは、コア部とコア部を包囲するクラッド部とを有し、コア部及びクラッド部が均一な光屈折率を有する媒質からなると共に、クラッド部に長手方向に沿って均一な空孔 2 が複数形成された 1 cell 構造のフォトニック結晶ファイバ (PCF: Photonic Crystal Fiber) である。なお、本発明における 1 cell 構造とは、三角格子状に配列された空孔で形成されたフォトニック結晶の中心部分の空孔だけを石英にした、1 つの欠陥を有するフォトニック結晶の構造を指す。

[0046] 図 5 は、横軸を d/Λ 、縦軸を Λ とし、波長 1070 nm の光において、曲げ半径 140 mm の基本モードの曲げ損失が 1.0 dB/m 以下になる領域の PCF の A_{eff} の範囲を示した図である。基本モードの曲げ半径および曲げ損失値は、本発明の定義や規定値に制限されるものではなく、必要な特性に応じて設計に用いるパラメータを決定することが可能である。 A_{eff} は下記数式を用いて求めている。

[数 3]

$$A_{eff} = \frac{\left[\iint |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint |E(x, y)|^4 dx dy} \quad (3)$$

ここで、 E は光の電界、 x 、 y はそれぞれファイバ断面 (x 、 y 平面と仮定) 内の座標である。

[0047] 図 6 は、横軸を d/Λ 、縦軸を Λ とし、波長 1070 nm の光において、1 cell 構造 PCF の曲げ半径 140 mm での第 1 高次モードの曲げ損失を示したものである。図中のプロット範囲は第 1 高次モードの曲げ損失が 1 dB/m 以上の範囲 (カットオフとなる範囲) を示している。図 5 が示す範囲と図 6 が示す範囲との重複する d/Λ 及び Λ に設定することで、第 1 高次

モード以上が十分にカットオフになり、 A_{eff} が大きい領域を選定することが可能になる。例えば、座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A (0.42, 16)

B (0.42, 10)

C (0.53, 10)

D (0.80, 56)

の4点を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d 及び Λ に設定する。

さらに具体的には、図6で d/Λ が0.724とし、 Λ が45 μm 程度にすると A_{eff} が1400 μm^2 、第1高次モードの曲げ損失が40 dB/m以上になり実効的に単一モードになる構造であることがわかる。

[0048] 図7は、横軸を d/Λ 、縦軸を Λ とし、波長1070 nmの光において、1cell構造PCFの曲げ半径140 mmでの第2高次モードの曲げ損失(1 dB/m以上)を示したものである。図5が示す範囲と図7が示す範囲との重複する d/Λ 及び Λ に設定することで、第2高次モード以上が十分にカットオフになり、 A_{eff} が大きい領域を選定することが可能になる。例えば、座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A (0.42, 16)

B (0.42, 10)

C (0.76, 10)

D (0.80, 56)

の4点を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d 及び Λ に設定する。

[0049] また、図8は、横軸を d/Λ 、縦軸を Λ とし、波長1070 nmの光において、1cell構造PCFの曲げ半径140 mmでの第3高次モードの曲げ損失(1 dB/m以上)を示したものである。図5が示す範囲と図8が示す範囲との重複する d/Λ 及び Λ に設定することで、第3高次モード以上が十分にカットオフになり、 A_{eff} が大きい領域を選定することが可能になる。例えば、座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A (0.42, 16)

B (0.42, 10)

C (0.76, 10)

D (0.80, 56)

の4点を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d 及び Λ に設定する。

[0050] また、図9は、横軸を d/Λ 、縦軸を Λ とし、波長1070nmの光において、1cell構造PCFの曲げ半径140mmでの第4高次モードの曲げ損失(1dB/m以上)を示したものである。図5が示す範囲と図9が示す範囲との重複する d/Λ 及び Λ に設定することで、第4高次モード以上が十分にカットオフになり、 A_{eff} が大きい領域を選定することが可能になる。例えば、座標(d/Λ , Λ)としたとき、

A (0.42, 16)

B (0.42, 10)

C (0.76, 10)

D (0.80, 56)

の4点を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d 及び Λ に設定する。

[0051] 上述のように図5が示す範囲と図7、図8あるいは図9が示す範囲とが重複する d/Λ 及び Λ に設定することで、第2高次モード以上、第3高次モード以上あるいは第4高次モード以上が十分にカットオフになり、 A_{eff} が大きい領域を選定することが可能になる。

[0052] 図10に1cell構造のPCFの曲げ損失の波長依存性を示す。図中の実線(白丸)が波長1050nm、破線(黒丸)が波長1070nmの値を基本モード曲げ損失の空孔間隔 Λ 依存性を示しており、図中の括弧内の値は各 Λ における d/Λ の値を示している。PCFは伝送波長によらず A_{eff} がほぼ同じ値で、波長が短くなるほど曲げ損失が増加するという特徴が一般的に知られている。図10より本設計で示した構造は、波長1050nmにおいても基本モードの曲げ損失が0.1dB/m以下がいずれの構造においても実現されており、波長1050nm以上では本設計が有効であることを示している。

[0053] (実施形態3)

本実施形態は、図11に示すような複数の空孔2を有する7cellコア構造のPCFにおいて、 A_{eff} の拡大と既定の曲げ損失 α_b を実現するための構造パラメータ（空孔2の直径 d と空孔2の間隔 Λ ）の設計方法に関する。本設計方法も実施形態2で説明した設計方法を利用する。

[0054] 図11に示すように、本実施例に係る光ファイバは、コア部とコア部を包囲するクラッド部とを有し、コア部及びクラッド部が均一な光屈折率を有する媒質からなると共に、クラッド部に長手方向に沿って均一な空孔2が複数形成された7cell構造のPCFである。なお、本発明における7cell構造とは、三角格子状に配列された空孔で形成されたフォトニック結晶の中心部分の1つの空孔とその周囲6個の空孔を石英にした、7つの欠陥を有するフォトニック結晶の構造を指す。

[0055] 図12は、横軸を d/Λ 、縦軸を Λ とし、曲げ半径140mmにおける基本モードの曲げ損失が1.0dB/m以下になる領域の A_{eff} を示した図である。本実施例のPCFは、7cell構造のため、実施例1の1cell構造の3層構造と比較して、 A_{eff} が1000 μm^2 以上になる領域でファイバ外径を縮小できる点で優位である。3層の1cell構造では A_{eff} が1000 μm^2 を実現するためには、クラッド径が500 μm 必要になるのに対して、4層の7cell構造では外径200 μm 程度で実現できる。基本モードの曲げ損失値、カットオフの定義は、本発明の定義や規定値に制限されるものではなく、必要な特性に応じて設計に用いるパラメータを決定することが可能である。

[0056] 図13は、横軸を d/Λ 、縦軸を Λ とし、波長1070nmの光において、7cell構造PCFの曲げ半径140mmでの第1高次(LP11)モードの曲げ損失を示したものである。図中のプロット範囲は第1高次モードの曲げ損失が1dB/m以上の範囲（カットオフとなる範囲）を示している。図12が示す範囲と図13が示す範囲との重複する d/Λ 及び Λ に設定することで、第1高次モード以上が十分にカットオフになり、 A_{eff} が大きい領

域を選定することが可能になる。例えば、例えば、座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A (0.20, 7.80)

B (0.34, 10.82)

C (0.78, 48.42)

の3点を頂点とする三角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

さらに具体的には、 d/Λ が0.68とし、 Λ が40 μm 程度にすると A_{eff} が5700 μm^2 、第1高次モードの曲げ損失が20 dB/m以上になり実効的に単一モードになる構造であることがわかる。

[0057] 図14は、横軸を d/Λ 、縦軸を Λ とし、波長1070 nmの光において、7cell構造PCFの曲げ半径140 mmでの第2高次モードの曲げ損失 (1 dB/m以上) を示したものである。図12が示す範囲と図14が示す範囲との重複する d/Λ 及び Λ に設定することで、第2高次モード以上が十分にカットオフになり、 A_{eff} が大きい領域を選定することが可能になる。例えば、座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A (0.20, 7.80)

B (0.20, 4.00)

C (0.80, 4.00)

D (0.80, 50.0)

の4点を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0058] また、図15は、横軸を d/Λ 、縦軸を Λ とし、波長1070 nmの光において、1cell構造PCFの曲げ半径140 mmでの第3高次モードの曲げ損失 (1 dB/m以上) を示したものである。図12が示す範囲と図15が示す範囲との重複する d/Λ 及び Λ に設定することで、第3高次モード以上が十分にカットオフになり、 A_{eff} が大きい領域を選定することが可能になる。例えば、座標 $(d/\Lambda, \Lambda)$ としたとき、

A (0.20, 7.80)

B (0.20, 4.00)

C (0.80, 4.00)

D (0.80, 50.0)

の4点を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0059] また、図16は、横軸を d/Λ 、縦軸を Λ とし、波長1070nmの光において、1cell構造PCFの曲げ半径140mmでの第4高次モードの曲げ損失(1dB/m以上)を示したものである。図12が示す範囲と図16が示す範囲との重複する d/Λ 及び Λ に設定することで、第4高次モード以上が十分にカットオフになり、 A_{eff} が大きい領域を選定することが可能になる。例えば、座標(d/Λ , Λ)としたとき、

A (0.20, 7.80)

B (0.20, 4.00)

C (0.80, 4.00)

D (0.80, 50.0)

の4点を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0060] 上述のように図12が示す範囲と図14、図15あるいは図16が示す範囲とが重複する d/Λ 及び Λ に設定することで、第2高次モード以上、第3高次モード以上あるいは第4高次モード以上が十分にカットオフになり、 A_{eff} が大きい領域を選定することが可能になる。

[0061] 図17に7cell構造のPCFの曲げ損失の波長依存性を示す。図中の実線(白丸)が波長1050nm、破線(黒丸)が波長1070nmの値を基本モード曲げ損失の空孔間隔 Λ 依存性を示しており、図中の括弧内の値は各 Λ における d/Λ の値を示している。PCFは伝送波長によらず A_{eff} がほぼ同じ値で、波長が短くなるほど曲げ損失が増加するという特徴が一般的に知られている。図17より本設計で示した構造は、波長1050nmにおいても基本モードの曲げ損失が0.1dB/m以下がいずれの構造においても実現されており、波長1050nm以上では本設計が有効であることを示している。

[0062] (実施形態4)

本実施形態では、実施形態 1～3 で説明した 2 モードファイバや 4 モードファイバを、レーザー加工システム等の光伝送媒体としての仕様に基づいて設計する他の設計方法を説明する。本実施形態の光ファイバ設計方法は、

使用するフォトリソグラフィックファイバ（PCF）のファイバ損失及びラマン利得係数、伝搬する光の使用波長、前記 PCF 伝搬後のビーム品質 M^2 、レーザ出力値、伝搬距離、最小曲げ半径を決定する仕様値決定ステップと、

数 1 を用いて伝搬可能な最多伝搬モード数 n を算出する最多伝搬モード数算出ステップと、

数 2 を用いてファイバ損失及びラマン利得係数から実効コア断面積 A_{eff} を算出する実効コア断面積算出ステップと、

前記 A_{eff} を満たす PCF の空孔の直径と間隔を計算するファイバ構造算出ステップと、

前記ファイバ構造算出ステップで計算した構造の PCF で最小曲げ半径での曲げ損失を計算し、前記伝搬距離から伝搬長の曲げ損失を計算する曲げ損失計算ステップと、

前記伝搬長の曲げ損失が例えば 0.1 dB 未満であることを確認し、前記ファイバ構造算出ステップで計算した PCF の構造を確定する確認ステップと、

前記確認ステップで前記伝搬長の曲げ損失が例えば 0.1 dB 以上である場合、モード数を 1 つ増やして前記ファイバ構造算出ステップ、前記曲げ損失計算ステップ、及び前記確認ステップを、モード数が最多伝搬モード数 n に達するまで繰り返すモード増加ステップと、
を行う。

[0063] 図 18 は、本実施形態の光ファイバ設計方法の手順を示したフロー図である。

[0064] はじめに、ステップ S01（仕様値決定ステップ）において、使用波長および目標とするビーム品質（ M^2 値）を決定する。次に、ステップ S02（最

多伝搬モード数算出ステップ)において、ステップS01の M^2 値を満たすことが可能な最多伝搬モード数を数式(1)(非特許文献6の式(17))から算出し、最多伝搬モード数 n を決定する。

その後、ステップS03(仕様値決定ステップ)にて使用する出力パワー、伝搬距離を決定し、ステップS04(実効コア断面積算出ステップ)において、数式(2)(非特許文献7に示されているSR S閾値定義式(8.1.13))を用いて必要な実効コア断面積(A_{eff})を算出する。

[0065] 次に、ステップS05において、伝搬可能モード数($1+k$)を決定する。この時、ビーム品質をできる限り向上させるために、伝搬モード数 $1+k$ は1($k=0$)のシングルモードから設計を開始する。ステップS06は $k=0$ の時には必ず満たすことが可能なので、ステップS07(ファイバ構造算出ステップ)に進み、ステップS04で算出した A_{eff} を満たすファイバ構造を計算する。ステップS08(曲げ損失計算ステップ)において、ステップS07で設計したファイバ構造において使用する最小曲げ半径での基本モードの曲げ損失を算出し、ステップS09の規定値を超える場合、ステップS05に戻り伝搬可能モード数を1つ増やしてステップS09までの手順を繰り返す(モード増加ステップ)。この時に、ステップS06でモード数 $1+k$ が最多伝搬モード数 n を超えた場合、設定したビーム品質を使用する出力パワー、伝搬距離で満たすファイバ構造の解はないため、ステップS01に戻りビーム品質(M^2 値)等の仕様値を見直して、ステップS02以下の手順を繰り返してファイバ構造を決定する。

[0066] [数1]

$$M^2 = C_n \sqrt{\frac{(V_{cutoff}^{(n+1),m})^2 + 2(n^2 - 1)}{3}} \quad (1)$$

ただし、

$V_{cutoff}^{(n+1),m}$: 直上位のモード $LP_{n+1,m}$ のVナンバーのカットオフ値

C_n : $LP_{1,m}$ のとき $C_n = 1 + \frac{1}{2} \cos(\xi)$ 、 $LP_{n,m}$ ($n \neq 1$) のとき $C_n = 1$

n : 許容可能な最多伝搬モード数

[数2]

$$P_{th} = \frac{16A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (2)$$

ただし、

P_{th} : SRS 閾値

L_{eff} : 有効相互作用長 $L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha_p L)}{\alpha_p}$

α : 伝送損失であり、 $\alpha_p = \frac{\alpha}{4.343}$ である。

g_R : ラマン利得係数

[0067] 以下では、上記設計フローを用いたPCFの設計例を示す。

まず、ステップS01として仕様値を決定する。ここでは、

ファイバ損失 : 1 dB/km (下記波長におけるファイバの伝送損失)

ラマン利得係数 g_R : 8.79×10^{-12} (cm/W)

伝搬する光の使用波長 λ : 1070 nm

ビーム品質 M^2 : 1.5 以下

レーザ出力値 : 100 W

伝搬距離 : 300 m

最小曲げ半径 : 140 m

とする。なお、ラマン利得係数 g_R は数式 (4) (非特許文献 8 に示される式 (36)) を用いて算出した。

[数4]

$$g_R = \frac{0.94 \times 10^{-11}}{\lambda} (1 + 80\Delta) \quad (4)$$

ただし、 Δ はコアとクラッドの比屈折率差であり、 $\Delta = \frac{n_{core}^2 - n_{clad}^2}{2n_{core}^2}$ である。

[0068] ステップS02で数式 (1) より、許容可能な最多伝搬モード数 n は 2 になる (なお、LP11 のカットオフ $V = 2.405$ 、LP21 のカットオフ $V = 3.832$ である。)。ただし、伝搬モード数が 2 の場合には第 1 高次

モードの励振比率を50%以下にする必要がある。続いてステップS04で数式(2)より必要な A_{eff} は約 $160\mu\text{m}^2$ と算出される(なお、数式(2)で使用するSR S閾値はステップS03で決定した出力パワーである。) 。ファイバ損失と g_R により数式(2)より算出されるSR S閾値は変化するため、必要な A_{eff} も変化する。そのため、ファイバ損失と g_R は本内容に制限されるものではなく、使用するファイバの材料等によって適宜変更して使用するものである。

- [0069] 次に、ステップS05に進み、まずシングルモード(伝搬可能モード数を1)でのファイバ構造設計を実施する。PCFの構造設計は、非特許文献9に示される有限要素法による構造解析や非特許文献10に示される近似解析などを行うことが可能であり、本実施例においては有限要素法による構造解析を用いた。解析方法に関しても本実施例に制限されることはなく、ファイバの構造解析ができる手法を適宜用いれば良い。
- [0070] 本実施例では、有限要素法を用いて解析を行った。1cell構造のPCFにおいて $d/\Lambda=0.42$ とし、 $\Lambda=12\mu\text{m}$ とすると $A_{eff}=184\mu\text{m}^2$ になりステップS04で算出した A_{eff} 値を満足する。続いて、ステップS08のステップに進む。最小曲げ半径を 140mm とすると前記構造で、基本モードの曲げ損失は $R140\text{mm}$ で $1\times 10^{-4}\text{dB}/\text{m}$ と計算される。伝搬距離は 300m なので、全体の曲げ損失は 0.03dB である。ステップS09では、伝搬長での曲げ損失値が 0.1dB 以下であるか確認する。前述のように 300m 伝搬後の曲げ損失は 0.03dB であるのでステップS09の要件を満たしており、この構造でファイバ構造を決定する(ステップS10)。
- [0071] 加えて、第1高次モードの閉じ込め損失は、 $6\text{dB}/\text{m}$ 以上になるため、本構造はシングルモードで動作し多少の軸ずれが生じ、第1高次モードが励振された場合でも 300m 伝搬後に第1高次モードは曲げ損失により十分に小さい励振比率になる。
- [0072] なお、 $k=0$ (基本モード)でステップS09の要件を満たさない場合、

ステップS05に戻り、kを増加（モード数を増加）してステップS06からステップS09を行う。モード数が増えると、ステップS07で算出されるファイバ構造が変わり、基本モードの曲げ損失も変わる。ステップS05からステップS09を繰り返し、要件を満たす曲げ損失の構造を見つけ出す。

[0073] 上記の説明は、図18の設計フローを用いて算出した構造の例であり、目標とするビーム品質、出力パワー、伝搬距離により本設計フローを用いて適宜ファイバパラメータを決定すれば良い。

[0074] ここで数式(2)に示されるように、最大出力パワー（SRS閾値）とLeff相互作用長は反比例の関係ある。本発明の光ファイバは1km以下と比較的短い伝送距離を想定しており、Leffと伝搬距離Lが同等の値となる。そのため本明細書では、出力パワー性能を出力パワと伝搬距離の積（kW・m）として記載している。なお伝送距離は1km以下に限定されず、LeffとLが同等とみなせる範囲であれば同様に適用できる。

[0075] （実施形態5～8）

実施形態5から8を図19から図22を用いて説明する。当該図は、所望性のPCFのパラメータを横軸に d/Λ 、縦軸に Λ としたときの領域を示している。ここで、(a) $M^2 \leq 2.0$ の条件における座標を

A1 (0.42, 16.88)

A2 (0.48, 25.31)

A3 (0.57, 40.00)

B (0.42, 10.94)

C1 (0.60, 15.63)

C2 (0.69, 31.88)

C3 (0.76, 47.81)

D (0.74, 43.12)

E (0.75, 44.38)

F (0.81, 60.63)

G (0. 85, 60. 63)

H (0. 85, 77. 50)

I (0. 90, 91. 88) とし、

(b) $M^2 \leq 3$. 3の条件における座標を

A1 (0. 42, 16. 88)

A2 (0. 47, 25. 31)

A3 (0. 56, 40. 00)

B (0. 42, 10. 94)

C1 (0. 75, 15. 00)

C2 (0. 78, 35. 00)

C3 (0. 90, 54. 38)

D1 (0. 75, 20. 00)

D2 (0. 80, 35. 93)

E (0. 80, 45. 63)

F (0. 83, 51. 56)

I (0. 90, 91. 88)

(c) 伝搬モード数が4以下の条件における座標を

A1 (0. 42, 16. 88)

A2 (0. 48, 25. 31)

A3 (0. 57, 40. 00)

A4 (0. 75, 68. 36)

B (0. 42, 10. 94)

C (0. 75, 14. 24)

D (0. 75, 12. 10)

E (0. 79, 20. 00)

F (0. 85, 30. 00)

F1 (0. 85, 36. 37)

G (0. 85, 41. 58)

H (0.89, 50.00)

H1 (0.89, 54.37)

I (0.89, 58.95)

J (0.90, 60.0)

J1 (0.90, 77.07)

K (0.90, 91.88)

として説明する。

[0076] (実施形態5)

[1cell構造 30kW・m伝送]

本実施形態は、30kW・m伝送を可能とする図4の1cell構造のPCFパラメータ(Λ と d)の範囲を説明する。図19は、波長1070nmの光を伝搬させるとき、(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($160 \mu m^2$ 以上)の関係を示す図である。プロットされた領域(斜線で示した領域)は、1cell構造のPCFにおいて30kW・m伝送できる構造になる。

[0077] 具体的には、(a) $M^2 \leq 2.0$ の場合、A1、B、C1、C2、D、E、C3、F、G、H、Iを頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。また、(b) $M^2 \leq 3.3$ の場合、A1、B、C1、D1、C2、D2、E、F、C3、Iを頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。一方、(c) 伝搬モード数が4以下の条件の場合、A1、B、C、D、E、F、G、H、I、J、Kを頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0078] (実施形態6)

[1cell構造 150kW・m伝送]

本実施形態は、150kW・m伝送を可能とする図4の1cell構造のPCFパラメータ(Λ と d)の範囲を説明する。図20は、波長1070nmの光を伝搬させるとき、(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($800 \mu m^2$ 以上)の関係を示す図である。

係を説明する図である。プロットされた領域（斜線で示した領域）は、1 c e l l 構造の P C F において 150 kW · m できる構造になる。

- [0079] 具体的には、(a) $M^2 \leq 2.0$ の場合、A 2、C 2、D、E、C 3、F、G、H、I を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。また、(b) $M^2 \leq 3.3$ の場合、A 2、C 2、D 2、E、F、C 3、I を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。一方、(c) 伝搬モード数が 4 以下の条件の場合、A 2、F 1、G、H、I、J、K を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0080] (実施形態 7)

[1 c e l l 構造 300 kW · m 伝送]

本実施形態は、300 kW · m 伝送を可能とする図 4 の 1 c e l l 構造の P C F パラメータ (Λ と d) の範囲を説明する。図 21 は、波長 1070 nm の光を伝搬させるとき、(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が 4 以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($1600 \mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。プロットされた領域（斜線で示した領域）は、1 c e l l 構造の P C F において 300 kW · m 伝送できる構造になる。

- [0081] 具体的には、(a) $M^2 \leq 2.0$ の場合、A 3、C 3、F、G、H、I を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。また、(b) $M^2 \leq 3.3$ の場合、A 3、C 3、I を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。一方、(c) 伝搬モード数が 4 以下の条件の場合、A 3、H 1、I、J、K を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0082] (実施形態 8)

[1 c e l l 構造 600 kW · m 伝送]

本実施形態は、600 kW · m 伝送を可能とする図 4 の 1 c e l l 構造の P C F パラメータ (Λ と d) の範囲を説明する。図 22 は、波長 1070 nm の光を伝搬させるとき、(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が 4 以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($3200 \mu m^2$ 以上) の

関係を説明する図である。プロットされた領域（斜線で示した領域）は、 $1 \leq c \leq 1$ 構造のPCFにおいて600kW・m伝送できる構造になる。

[0083] 具体的には、伝搬モード数が4以下の条件の場合、A4、J1、Kを頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0084] (実施形態9～13)

実施形態9から13を図23から図27を用いて説明する。当該図は、所望性のPCFのパラメータを横軸に d/Λ 、縦軸に Λ としたときの領域を示している。ここで、(a) $M^2 \leq 2.0$ における座標を

A1 (0.20, 10.98)

A2 (0.21, 11.77)

A3 (0.27, 16.06)

A4 (0.40, 24.46)

A5 (0.53, 32.87)

B (0.20, 4.95)

C1 (0.25, 5.27)

C2 (0.40, 12.88)

C3 (0.60, 20.34)

C4 (0.68, 29.56)

C5 (0.72, 36.35)

D (0.29, 9.87)

E (0.40, 12.25)

F (0.40, 13.52)

G (0.49, 14.15)

H (0.49, 15.74)

I (0.50, 18.12)

J (0.58, 18.12)

K (0.58, 19.86)

L (0.60, 23.03)

M (0. 68, 23. 99)

N (0. 68, 31. 60)

O (0. 79, 48. 73)

P (0. 80, 50. 00) とし、

(b) $M^2 \leq 3$. 3における座標を

A1 (0. 20, 10. 98)

A2 (0. 21, 11. 77)

A3 (0. 27, 16. 06)

A4 (0. 40, 24. 78)

A5 (0. 53, 32. 87)

B (0. 20, 5. 11)

C1 (0. 40, 5. 90)

C2 (0. 50, 13. 68)

C3 (0. 60, 20. 18)

C4 (0. 70, 30. 01)

C5 (0. 73, 37. 00)

D (0. 40, 10. 03)

E (0. 50, 11. 93)

F (0. 50, 14. 47)

C3 (0. 60, 20. 18)

G (0. 69, 22. 08)

H (0. 68, 23. 67,)

I (0. 70, 24. 30)

J (0. 70, 32. 87)

K (0. 80, 50. 00)

(c) 伝搬モード数が4以下の条件における座標を

A1 (0. 20, 10. 98)

A2 (0. 21, 11. 77)

A3 (0.27, 16.06)
 A4 (0.40, 24.78)
 A5 (0.53, 32.87)
 B (0.20, 5.11)
 C (0.50, 6.23)
 D (0.50, 10.00)
 E (0.60, 15.18)
 F (0.60, 17.76)
 G (0.65, 20.12)
 H (0.70, 20.35)
 I (0.79, 25.06)
 J (0.79, 29.53)
 K (0.78, 29.76)
 K1 (0.78, 30.66)
 L (0.78, 38.29)
 M (0.80, 40.12)
 N (0.80, 50.00)

として説明する。

[0085] (実施形態9)

[7cell構造 30kW・m伝送]

本実施形態は、30kW・m伝送を可能とする図10の7cell構造のPCFパラメータ(Λ と d)の範囲を説明する。図23は、波長1070nmの光を伝搬させるとき、(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($160 \mu\text{m}^2$ 以上)の関係を示す図である。プロットされた領域(斜線で示した領域)は、7cell構造のPCFにおいて30kW・m伝送できる構造になる。

[0086] 具体的には、(a) $M^2 \leq 2.0$ の場合、A1、B、C1、D、E、F、G、H、I、J、K、C3、L、M、N、O、Pを頂点とする多角形で囲まれる

領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。また、(b) $M^2 \leq 3.3$ の場合、A1、B、C1、D、E、F、C3、G、H、I、J、K を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。一方、(c) 伝搬モード数が4以下の条件の場合、A1、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K、L、M、N を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0087] (実施形態10)

[7cell構造 150kW・m伝送]

本実施形態は、150kW・m伝送を可能とする図11の7cell構造のPCFパラメータ (Λ と d) の範囲を説明する。図24は、波長1070nmの光を伝搬させるとき、(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($800\mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。プロットされた領域 (斜線で示した領域) は、7cell構造のPCFにおいて150kW・m伝送できる構造になる。

[0088] 具体的には、(a) $M^2 \leq 2.0$ の場合、A2、C2、F、G、H、I、J、K、C3、L、M、N、O、P を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。また、(b) $M^2 \leq 3.3$ の場合、A2、C2、F、C3、G、H、I、J、K を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。一方、(c) 伝搬モード数が4以下の条件の場合、A2、E、F、G、H、I、J、K、L、M、N を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0089] (実施形態11)

[7cell構造 300kW・m伝送]

本実施形態は、300kW・m伝送を可能とする図11の7cell構造のPCFパラメータ (Λ と d) の範囲を説明する。図25は、波長1070nmの光を伝搬させるとき、(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($1600\mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。プロットされた領域 (斜線で示した領域) は、7cell構造のPCFにおいて300kW・m伝送できる構造になる。

[0090] 具体的には、(a) $M^2 \leq 2.0$ の場合、A3、C3、L、M、N、O、P を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。また、(b) $M^2 \leq 3.3$ の場合、A3、C3、G、H、I、J、K を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。一方、(c) 伝搬モード数が4以下の条件の場合、A3、G、H、I、J、K、L、M、N を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0091] (実施形態12)

[7cell構造 600kW・m伝送]

本実施形態は、600kW・m伝送を可能とする図11の7cell構造のPCFパラメータ (Λ と d) の範囲を説明する。図26は、波長1070nmの光を伝搬させるとき、(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($3200\mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。プロットされた領域 (斜線で示した領域) は、7cell構造のPCFにおいて600kW・m伝送できる構造になる。

[0092] 具体的には、(a) $M^2 \leq 2.0$ の場合、A4、C4、N、O、P を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。また、(b) $M^2 \leq 3.3$ の場合、A4、C4、J、K を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。一方、(c) 伝搬モード数が4以下の条件の場合、A4、K1、L、M、N を頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0093] (実施形態13)

[7cell構造 900kW・m伝送]

本実施形態は、900kW・m伝送を可能とする図11の7cell構造のPCFパラメータ (Λ と d) の範囲を説明する。図27は、波長1070nmの光を伝搬させるとき、(a) $M^2 \leq 2.0$ 、(b) $M^2 \leq 3.3$ 、(c) 伝搬モード数が4以下を満たす d/Λ と Λ と A_{eff} ($4800\mu m^2$ 以上) の関係を説明する図である。プロットされた領域 (斜線で示した領域) は、7cell構造のPCFにおいて900kW・m伝送できる構造になる。

[0094] 具体的には、(a) $M^2 \leq 2.0$ の場合、A5、C5、O、Pを頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。また、(b) $M^2 \leq 3.3$ の場合、A5、C5、Kを頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。一方、(c) 伝搬モード数が4以下の条件の場合、A5、K、M、Nを頂点とする多角形で囲まれる領域内の d/Λ 及び Λ に設定する。

[0095] (実施形態14)

図28に、本実施形態のPCFの構造例を示す。本実施形態のPCFは、図4のPCFより少ない空孔数で構成する光ファイバ構造を示す。図28のPCF構造は図4と同様にコア領域を空孔欠陥1つ分とし、空孔数を12としている。PCFは、個々の空孔の位置及び大きさの精度が光学特性に影響し、空孔数が増えるほど製造の困難さや構造の歩留りの劣化が顕著となる。図28に示した構造では空孔数が12以下の単純な構造で光波の導波を実現するため、量産性が高く光学特性の製造時の制御性がよくなり、好ましい。なお図28のPCFの構造でも、所定設計範囲において M^2 が2.0以下の高品質かつkW級のハイパワー光を伝送することが可能となる。

[0096] 図29～図32に、空孔数を12孔としたPCFの設計例を示す。図29は基本モードに対する曲げ損失が0.1 dB/m以下となる構造範囲を示している。図30、図31及び図32はそれぞれLP11モード、LP21モード、LP02モードに対する曲げ損失値を示し、枠内に囲まれる領域(曲げ損失1 dB/m以上)において対象となるモードの損失が十分大きくなり、漏洩させることができる。

[0097] ここでLP02モードを遮断し、レーザー発振部とPCFの軸ずれ量を一定以下とすることで、高品質かつハイパワーな出力光を得られる。したがって、図33に示す、図29および図32の重なる範囲において、その目的を達成しうる。すなわち、 Λ が $50 \mu\text{m}$ 以上 $65 \mu\text{m}$ 以下かつ d/Λ が0.79以上0.88以下、または Λ が $50 \mu\text{m}$ 以下かつ d/Λ が0.7以上かつ0.79以下の構造が好適となる。このとき、空孔数が12と少ないため製

造における歩留りや製造精度が極めてよく、かつ M^2 が2.0以下かつ kW 級の出力光が得られ、好ましい。

[0098] なお、本実施形態では、予め定められたモード数が3であり、基本モードであるLP01、LP11及びLP21を伝搬し、LP02を伝搬しない構成としたが、本発明はこれに限定されない。例えば、予め定められたモード数が2であり、LP01モード及びLP11モードを伝搬し、LP21モード以上のモードを伝搬しない構成としてもよい。これによって、本実施形態と同様の効果を得ることができる。

[0099] たとえば図30および図32ではLP11モードおよびLP21モードが漏洩する構造が示されており、図29と図30の重なる領域を用いてモード数を2に、図29と図32の重なる領域を用いることでモード数を3にすることができる。すなわち、 Λ が $30\mu m$ 以上 $55\mu m$ 以下かつ d/Λ が 0.70 以上かつ 0.79 以下、または Λ が $55\mu m$ 以上 $65\mu m$ 以下かつ d/Λ が 0.79 以上 0.83 以下、または Λ が $57\mu m$ 以上 $65\mu m$ 以下かつ d/Λ が 0.83 以上かつ 0.88 以下、または Λ が $59\mu m$ 以上 $68\mu m$ 以下かつ d/Λ が 0.88 以上かつ 0.89 以下の構造にすることで、モード数を2にすることができる。また、 Λ が $52\mu m$ 以上 $65\mu m$ 以下かつ d/Λ が 0.79 以上 0.88 以下、または Λ が $52\mu m$ 以下かつ d/Λ が 0.7 以上かつ 0.77 以下の構造にすることで、モード数を3にすることができる。

[0100] (発明の効果)

本発明は、要求される出力パワーと伝搬距離に関してはSR S閾値の定義式を用いて、要求されるビーム品質に関しては(曲げ損失および伝搬可能なモード数から、伝搬モードが均一に励振された場合の M^2 値を閾値として用いて、それを満たすファイバ構造を設計することができる。さらにその設計フローを用いて高品質なハイパワー伝送用光ファイバの具体的な構造を明確にすることができる。具体的な設計例としてPCFの構造例を示した。

[0101] そして、以上に述べたように本発明に係る光ファイバ、光ファイバの設計

方法によれば、従来の設計では実現できなかった所望のビーム品質において、出力パワーを伝搬長に対して担保することが可能な光ファイバを提供することが可能になる。

[0102] (作用)

本発明で用いる設計フローを用いて設計したファイバ構造は、必要とされる出力パワー、伝搬距離、ビーム品質を満たすことができる。これまでは、 M^2 値が8以上のマルチモードファイバでしか実現されていなかったファイバレーザーの出力パワーの領域についても、 M^2 値が8未満の光ファイバをファイバレーザーに用いることで、ビーム品質の良い光を所望の伝搬距離で使用することを実現できる。

産業上の利用可能性

[0103] 本発明は、ファイバレーザーを用いたレーザー加工の分野に適用できる。

符号の説明

[0104] 1 : P C F

2 : 空孔

請求の範囲

[請求項1]

使用するフォトニッククリスタルファイバ（PCF）のファイバ損失及びラマン利得係数、伝搬する光の使用波長、前記PCF伝搬後のビーム品質M₂、レーザ出力値、伝搬距離、最小曲げ半径を決定する仕様値決定ステップと、

数1を用いて伝搬可能な最多伝搬モード数nを算出する最多伝搬モード数算出ステップと、

数2を用いてファイバ損失及びラマン利得係数から実効コア断面積A_{eff}を算出する実効コア断面積算出ステップと、

前記A_{eff}を満たすPCFの空孔の直径と間隔を計算するファイバ構造算出ステップと、

前記ファイバ構造算出ステップで計算した構造のPCFで最小曲げ半径での曲げ損失を計算し、前記伝搬距離から伝搬長の曲げ損失を計算する曲げ損失計算ステップと、

前記伝搬長の曲げ損失が所定値未満であることを確認し、前記ファイバ構造算出ステップで計算したPCFの構造を確定する確認ステップと、

前記確認ステップで前記伝搬長の曲げ損失が所定値以上である場合、モード数を1つ増やして前記ファイバ構造算出ステップ、前記曲げ損失計算ステップ、及び前記確認ステップを、モード数が最多伝搬モード数nに達するまで繰り返すモード増加ステップと、
を行う光ファイバ設計方法。

[数1]

$$M^2 = Cn \sqrt{\frac{(V_{\text{cutoff}}^{(n+1)m})^2 + 2(n^2 - 1)}{3}} \quad (1)$$

[数2]

$$P_{\text{th}} = \frac{16A_{\text{eff}}}{g_R L_{\text{eff}}} \quad (2)$$

[請求項2]

使用するフォトニッククリスタルファイバ（PCF）のファイバ損

失及びラマン利得係数、伝搬する光の使用波長、前記PCF伝搬後のビーム品質M²、レーザ出力値、伝搬距離、最小曲げ半径を決定する仕様値決定ステップと、

数1を用いて伝搬可能な最多伝搬モード数nを算出する最多伝搬モード数算出ステップと、

数2を用いてファイバ損失及びラマン利得係数から実効コア断面積A_{eff}を算出する実効コア断面積算出ステップと、

前記A_{eff}以上となるPCFの空孔の直径dと間隔Λを計算し、横軸d/Λ、縦軸Λのグラフに前記A_{eff}以上となる点をプロットするファイバ構造算出ステップと、

PCFの空孔の直径dと間隔Λから該PCFでカットオフさせる最小の高次モードの最小曲げ半径での曲げ損失を計算し、横軸d/Λ、縦軸Λのグラフに該曲げ損失が1dB/m以上となる点をプロットする曲げ損失計算ステップと、

前記ファイバ構造算出ステップでグラフにプロットした点の領域と前記曲げ損失計算ステップでグラフにプロットした点の領域とが重複する重複範囲を検出し、前記重複範囲にある直径dと間隔Λの空孔を持つPCF構造に決定する構造決定ステップと、

を行う光ファイバ設計方法。

[数1]

$$M^2 = Cn \sqrt{\frac{(V_{\text{cutoff}}^{(n+1) \cdot m})^2 + 2(n^2 - 1)}{3}} \quad (1)$$

[数2]

$$P_{th} = \frac{16A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (2)$$

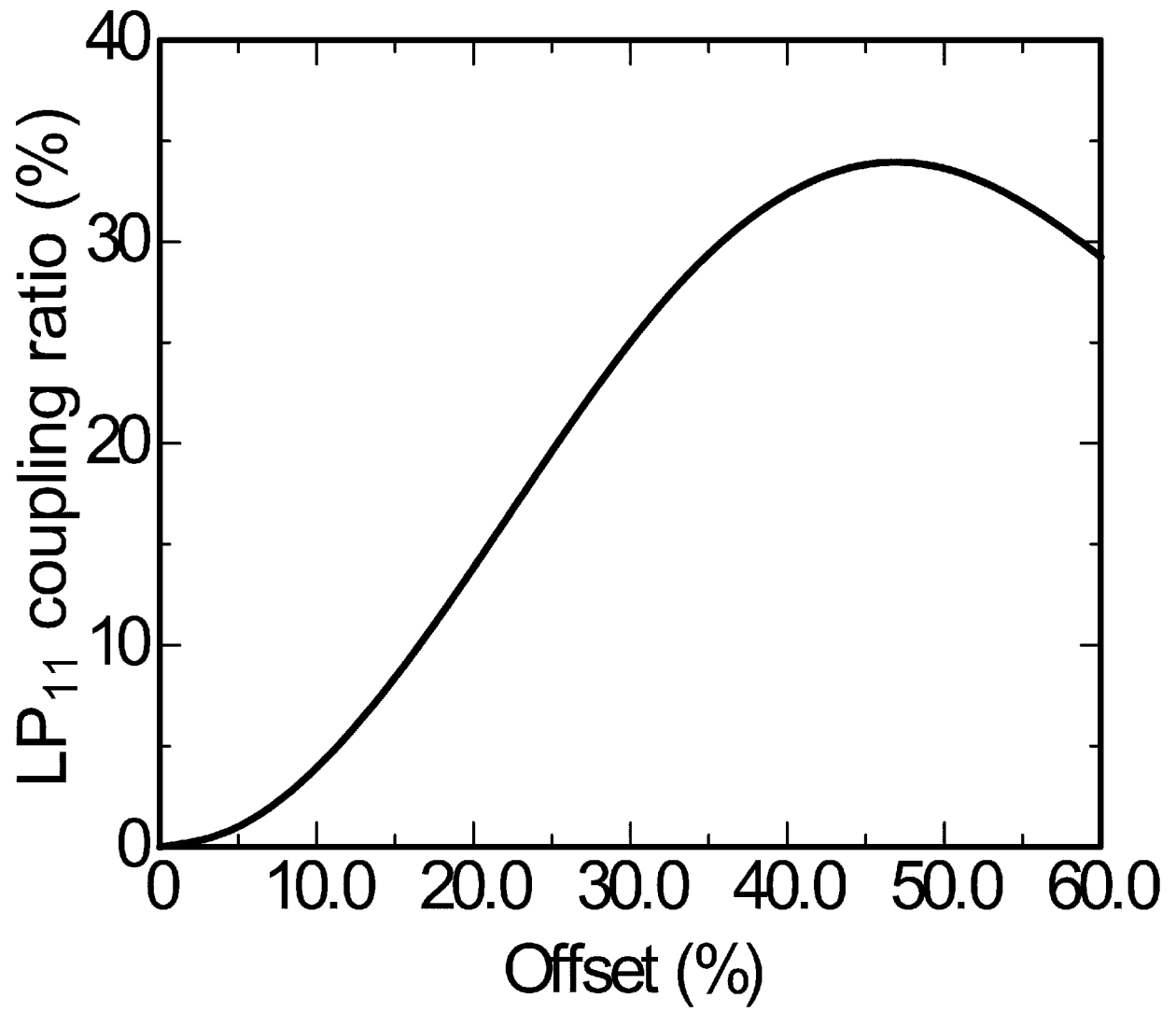
[図1]

[1]

モード名	フィールドパターン
LP ₀₁	
LP ₁₁	
LP ₂₁	
LP ₀₂	
LP ₃₁	

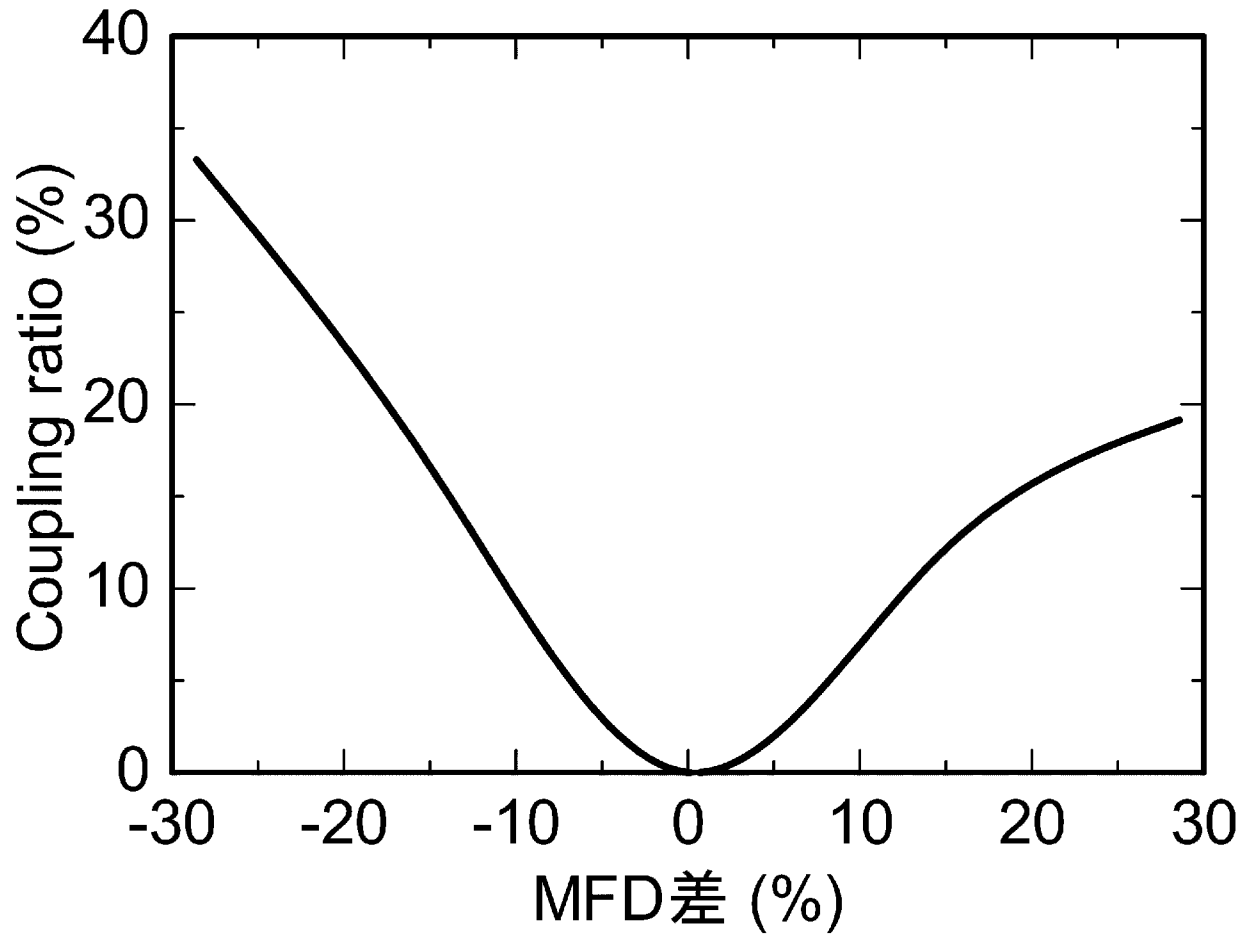
[図2]

[2]



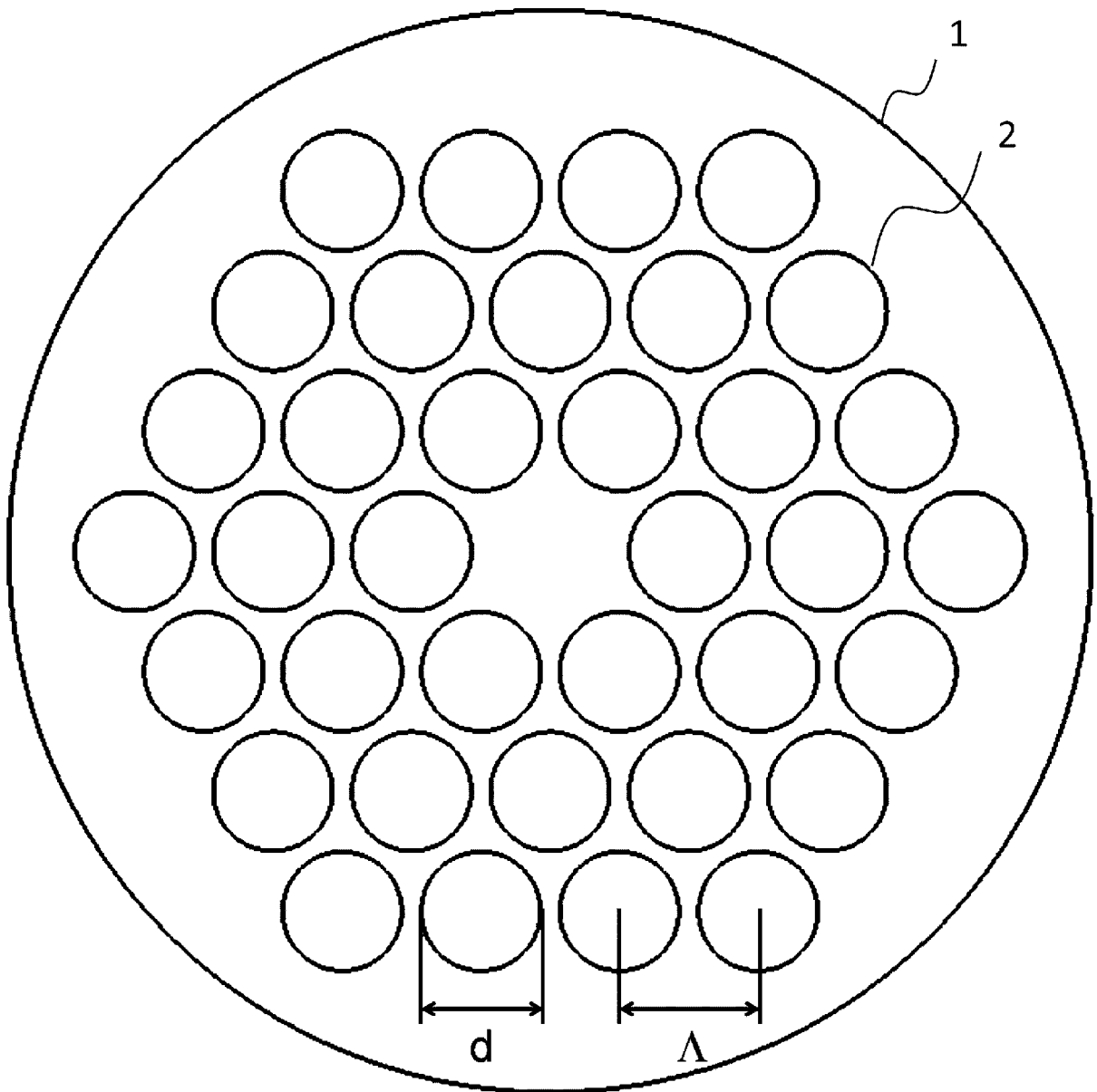
[図3]

[3]



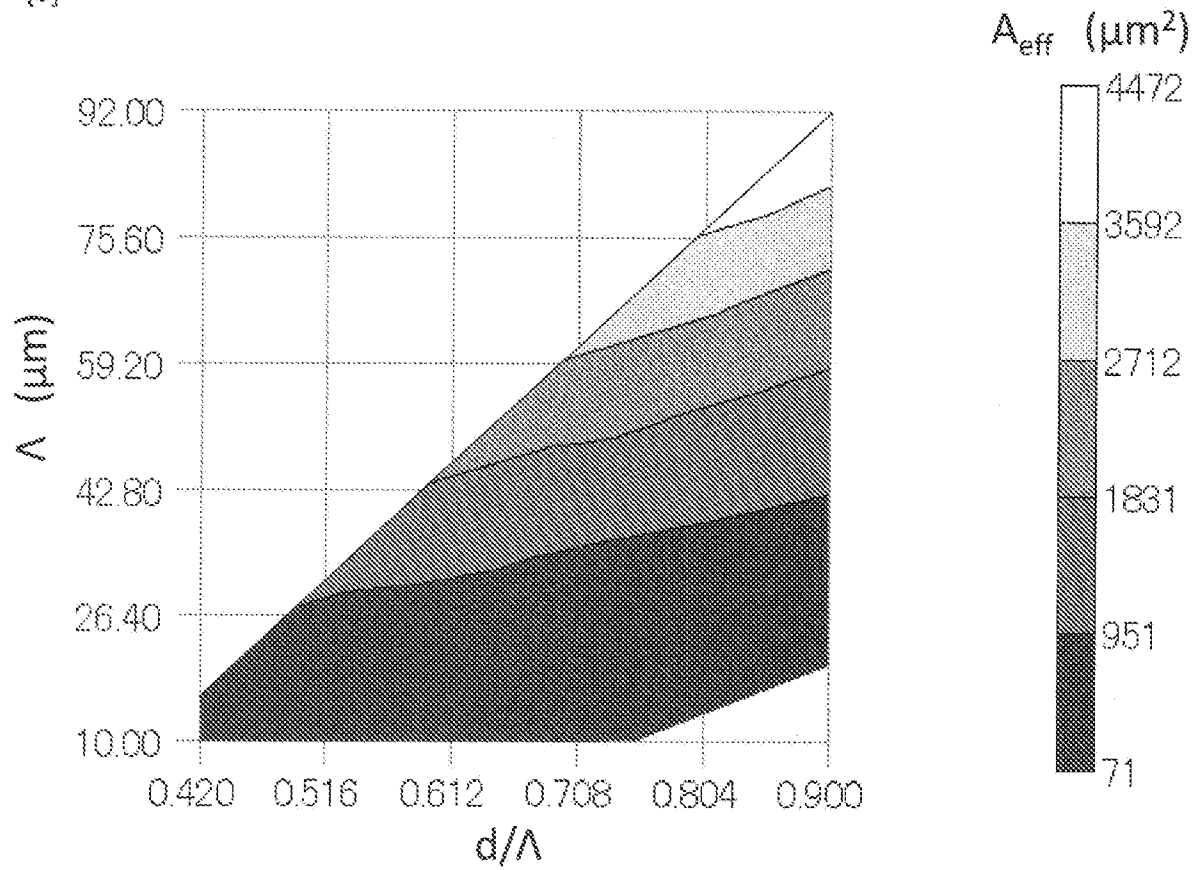
[図4]

[4]



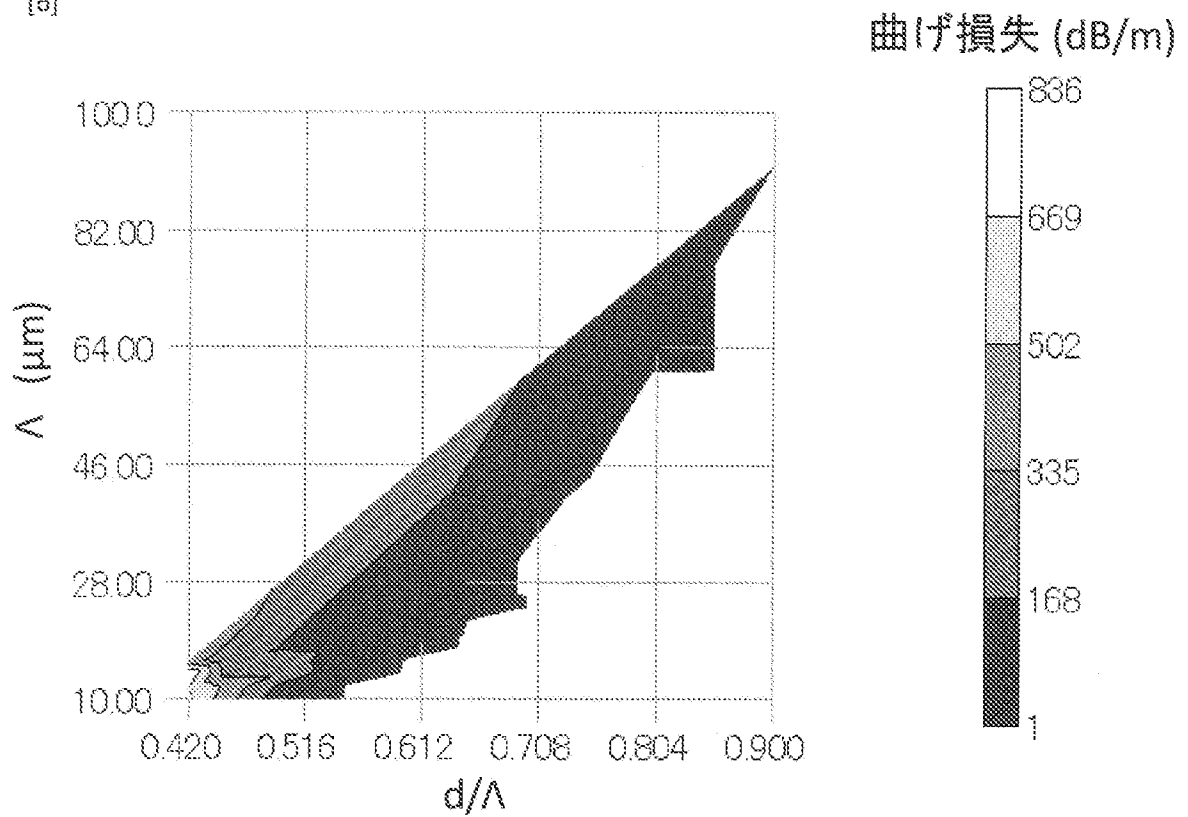
[図5]

[5]



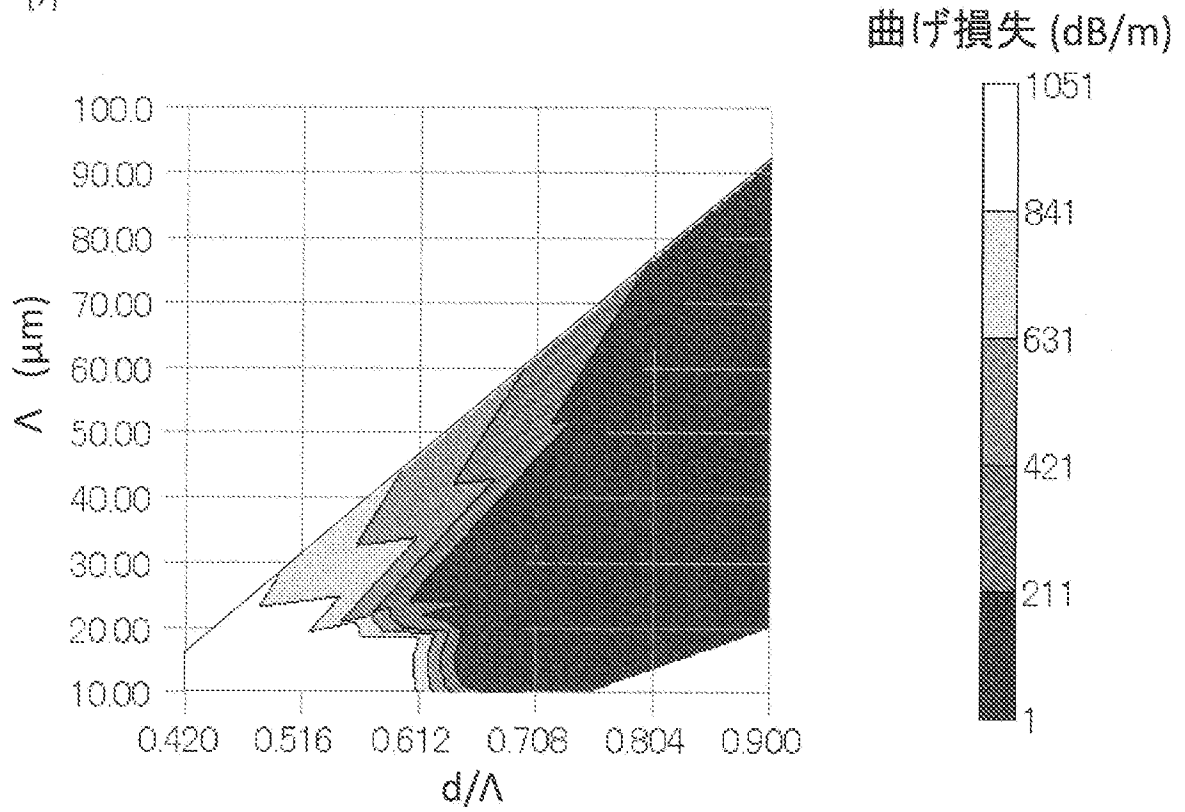
[図6]

[6]



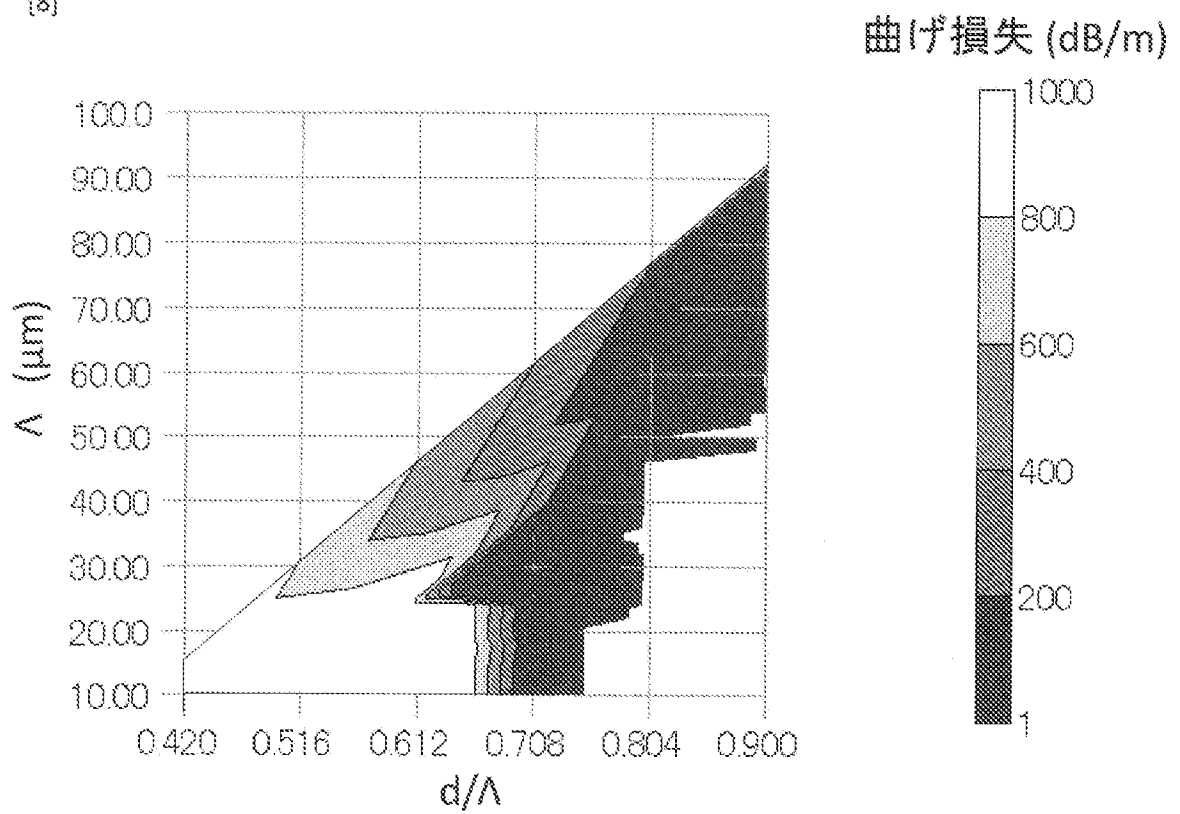
[図7]

[7]



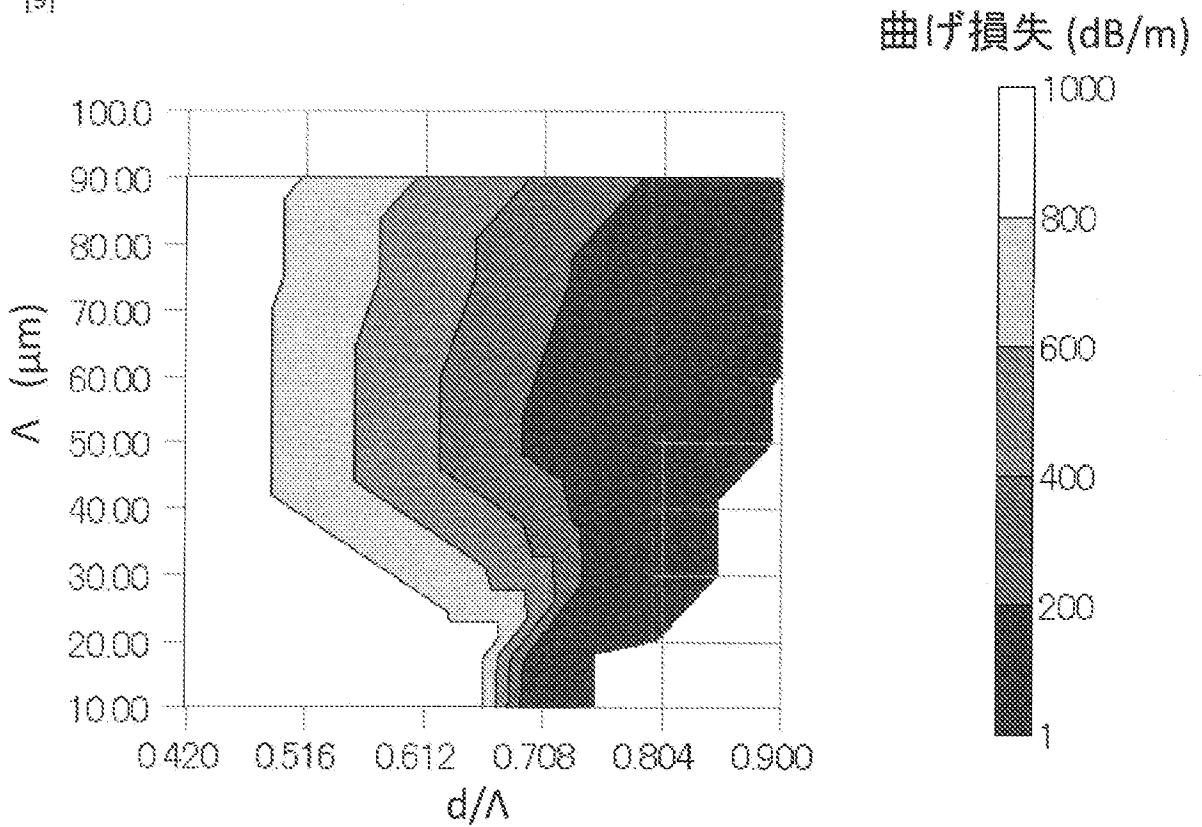
[図8]

[8]



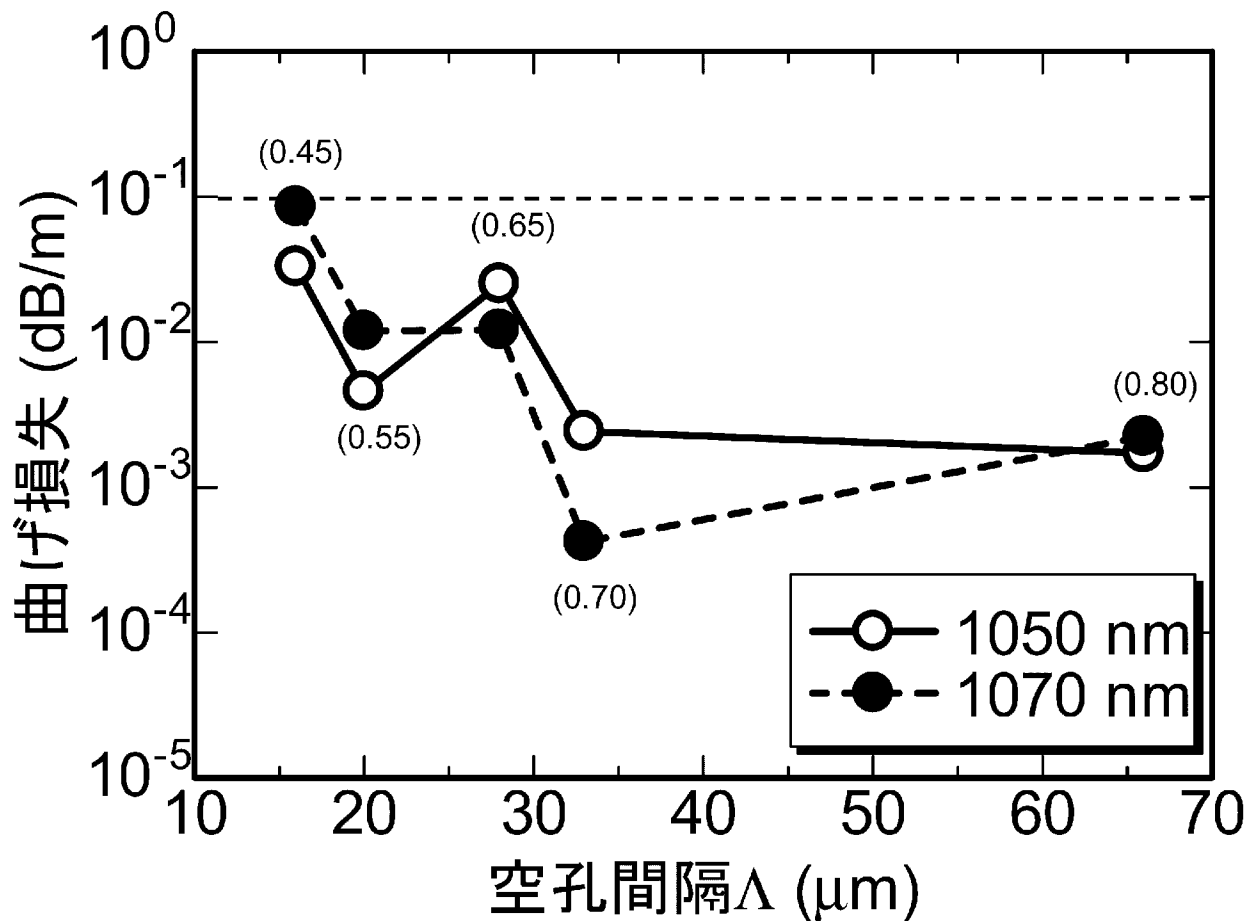
[図9]

[9]



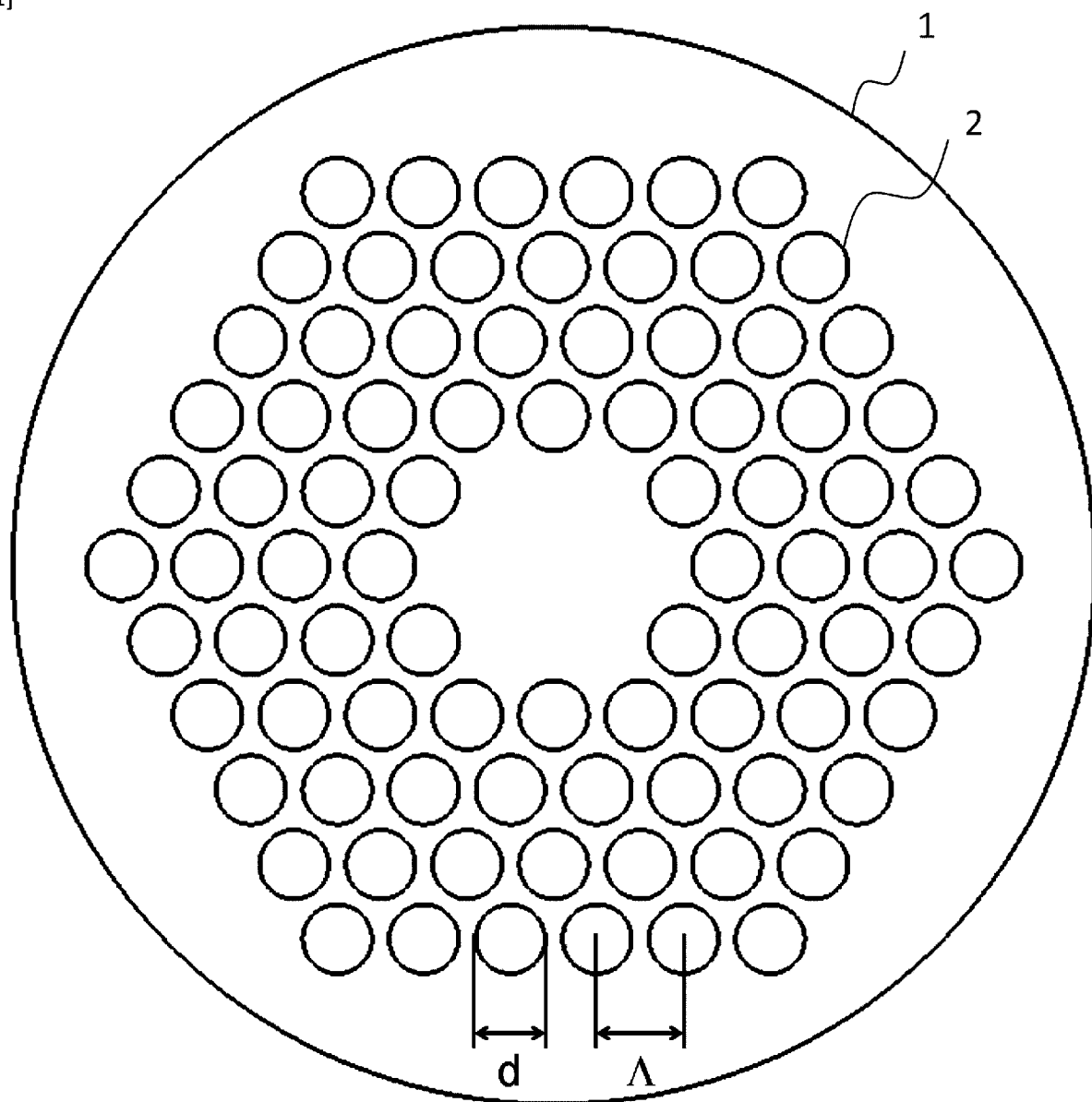
[図10]

[10]



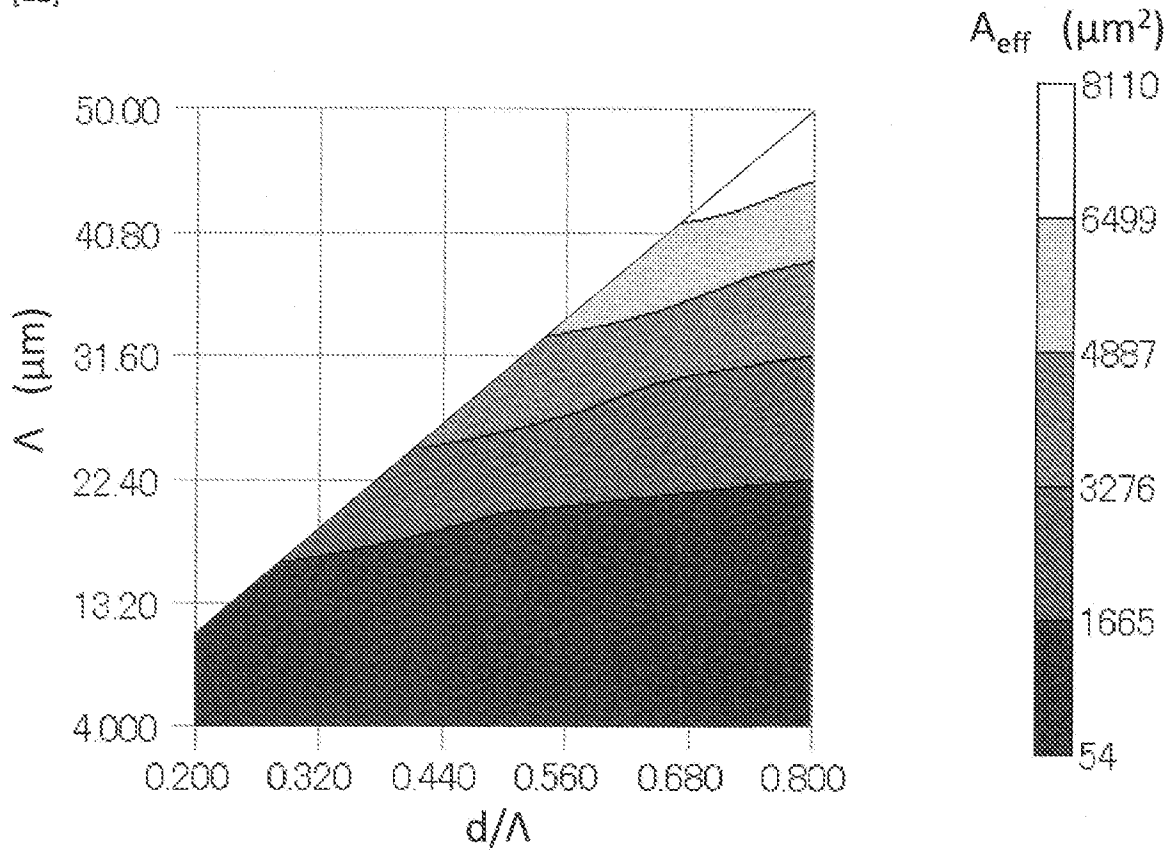
[図11]

[11]



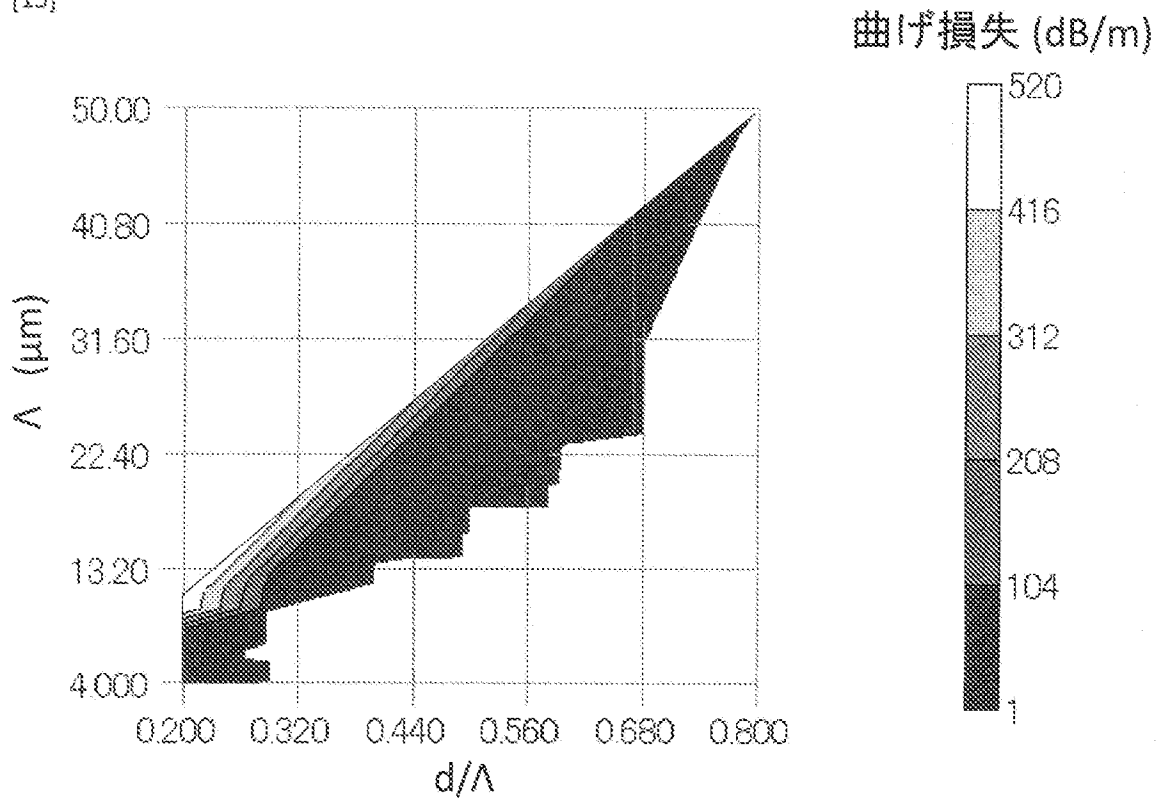
[図12]

[12]



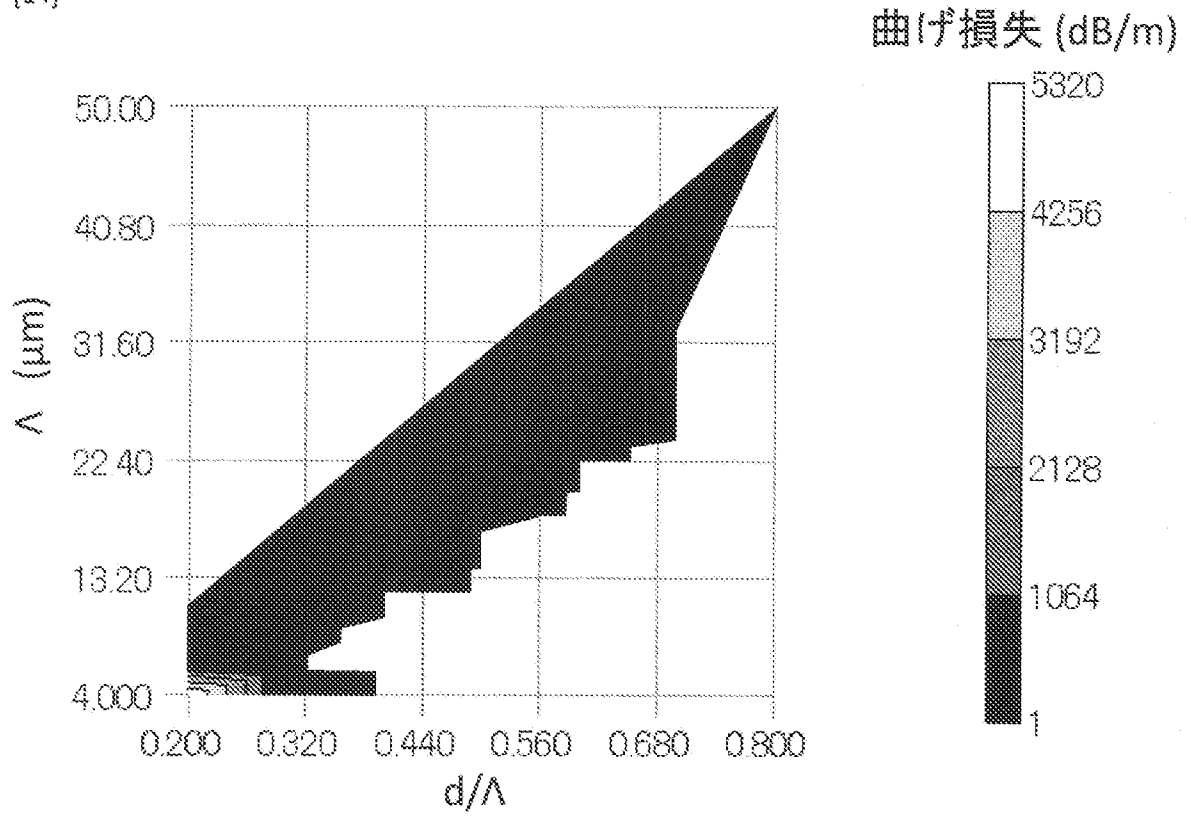
[図13]

[13]



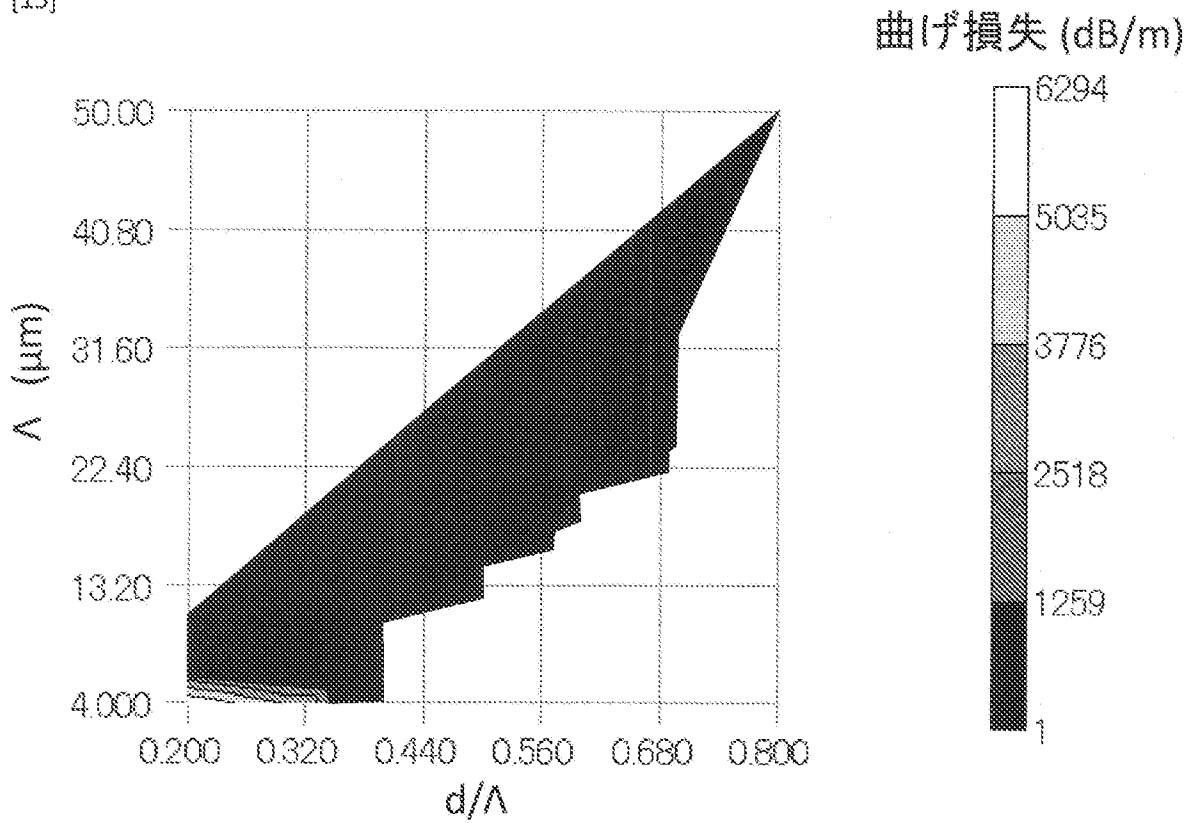
[図14]

[14]



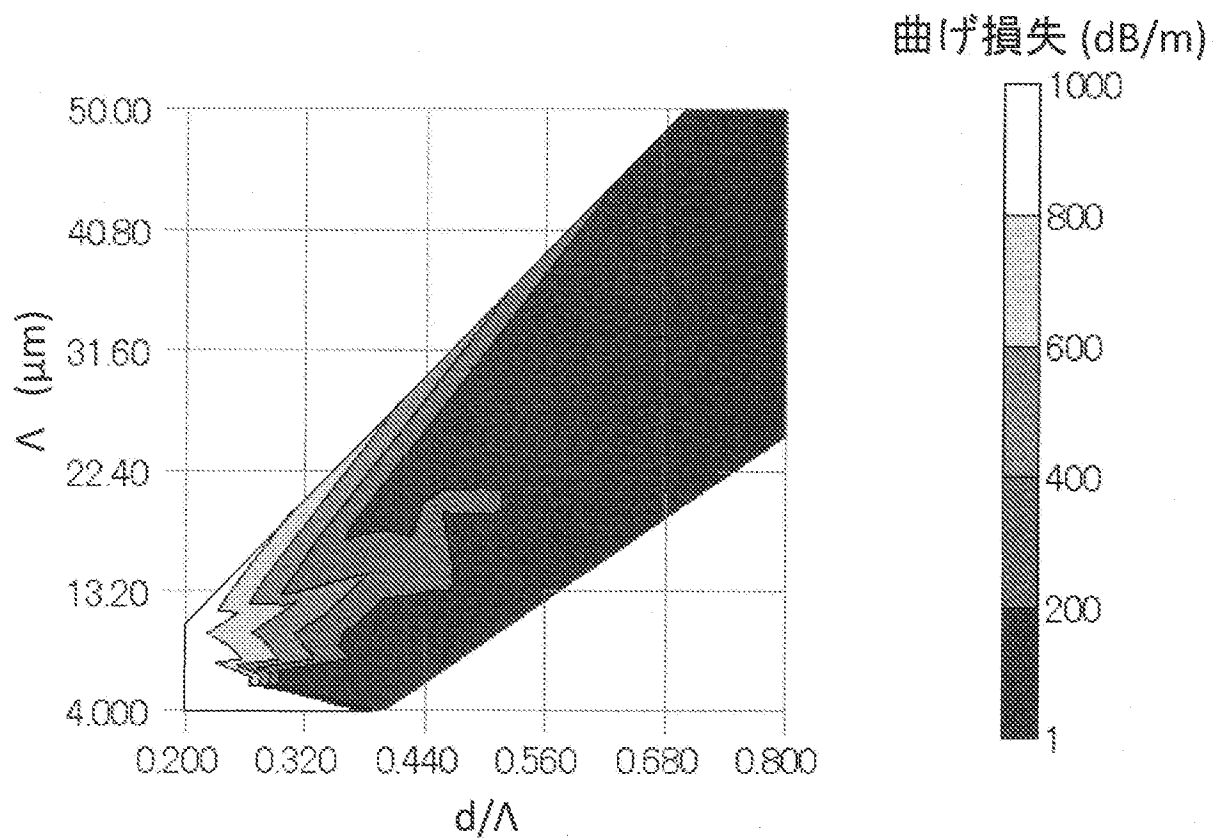
[図15]

[15]



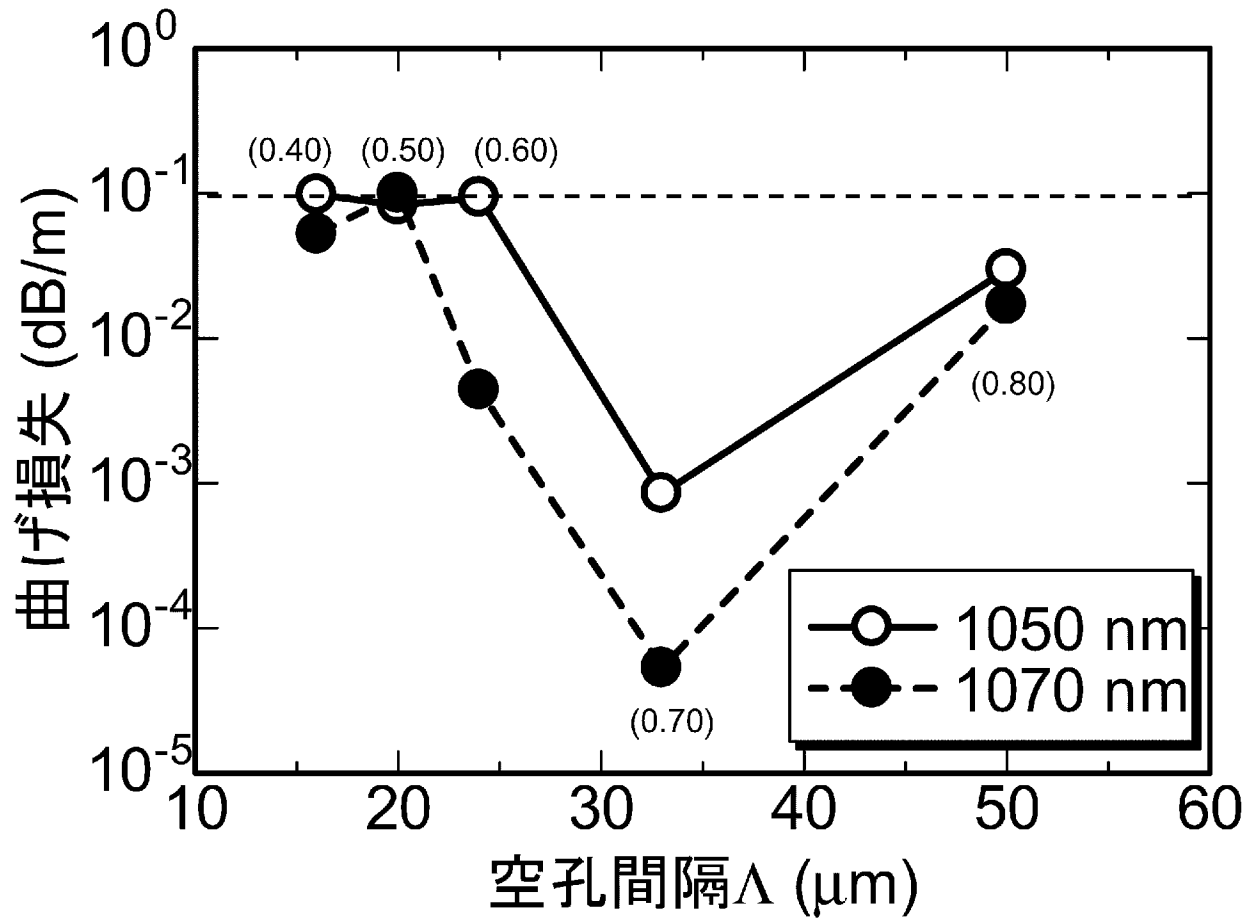
[図16]

[16]

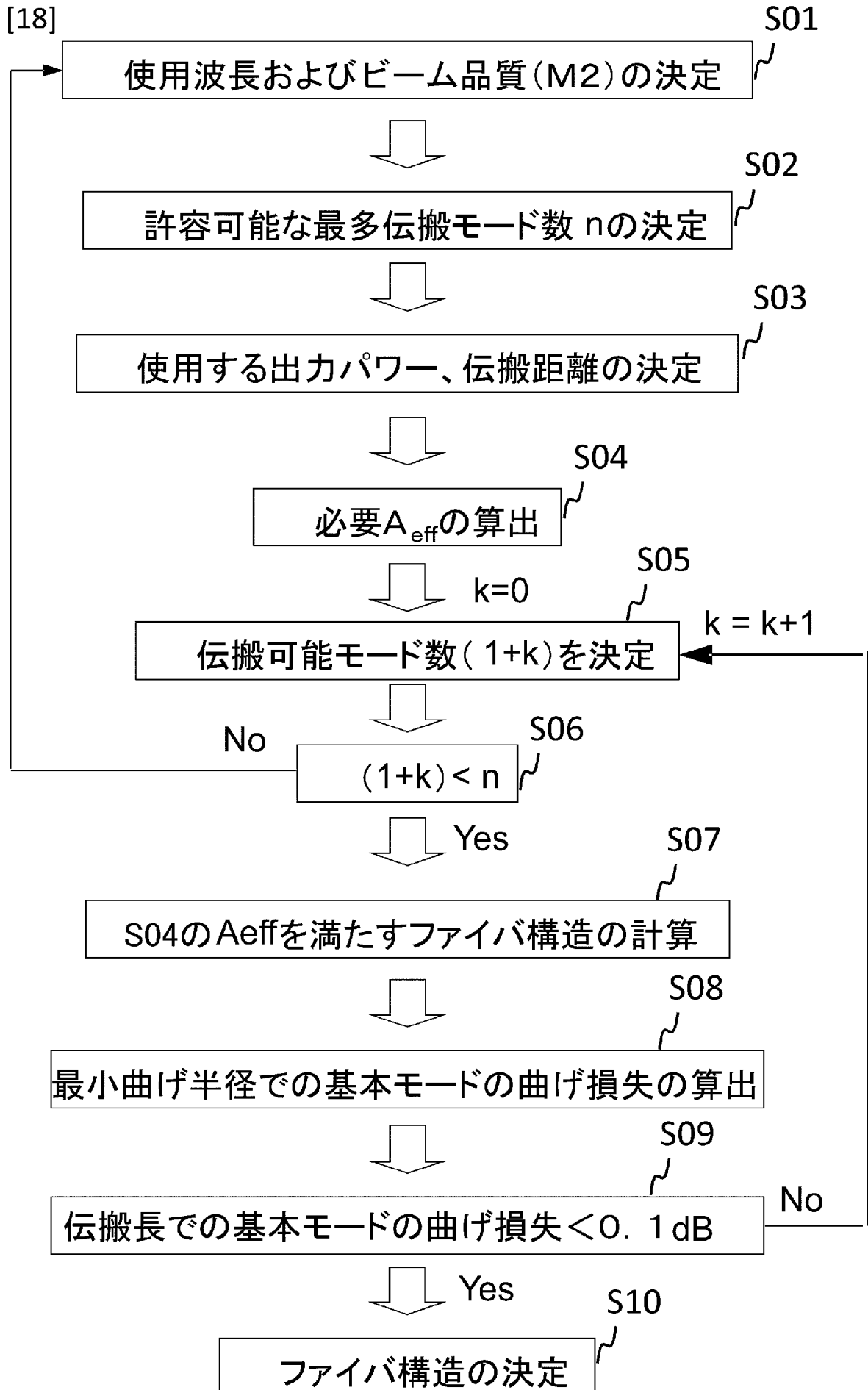


[図17]

[17]



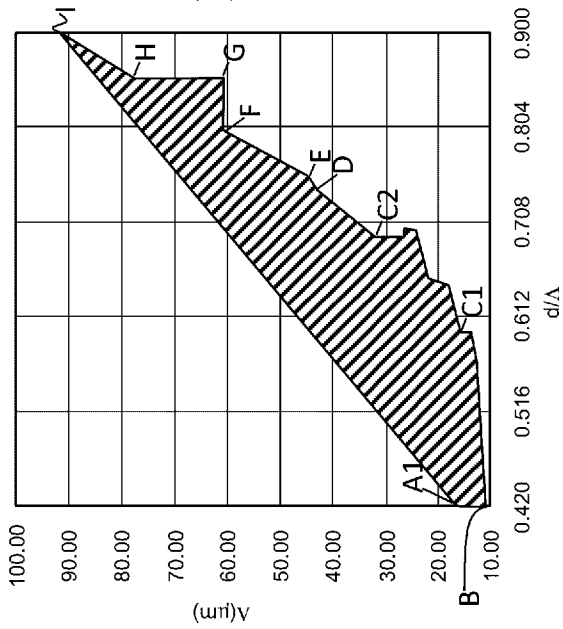
[図18]



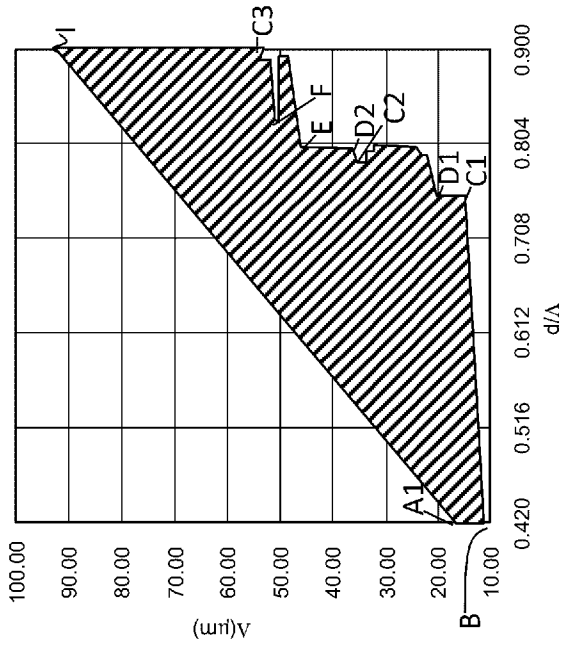
[図19]

[19] (1cell 30kW/m可能)

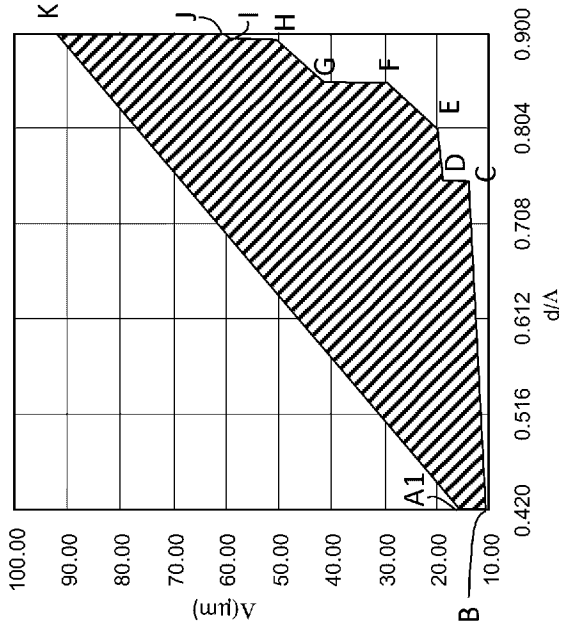
(a) $M2 \leq 2.0$



(b) $M2 \leq 3.3$



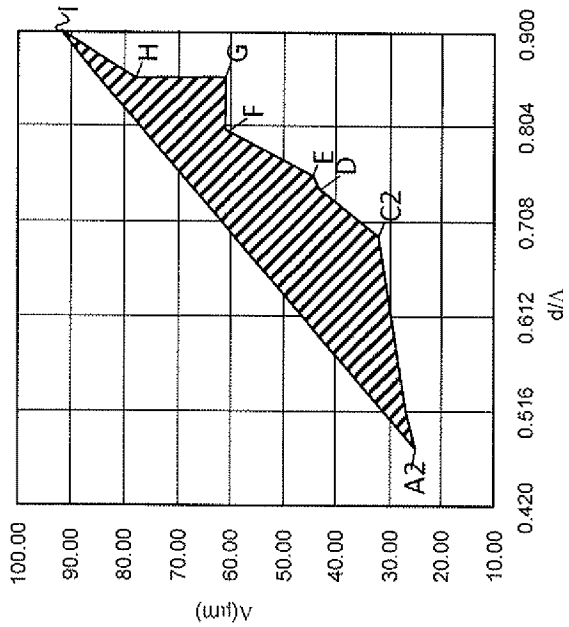
(c) 伝搬モード数が4以下



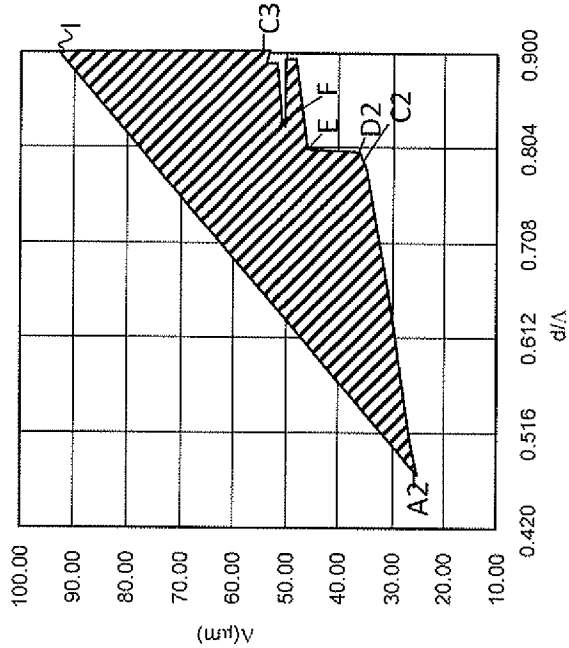
[図20]

[20] (1cell 150kWm可能)

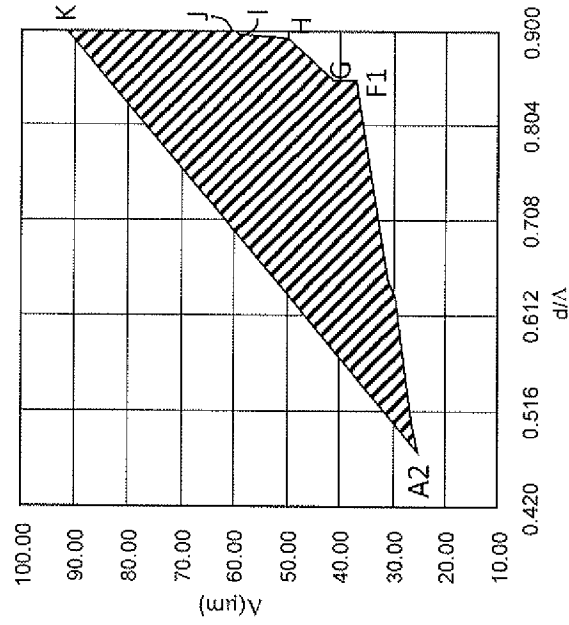
(a) $M2 \leq 2.0$



(b) $M2 \leq 3.3$



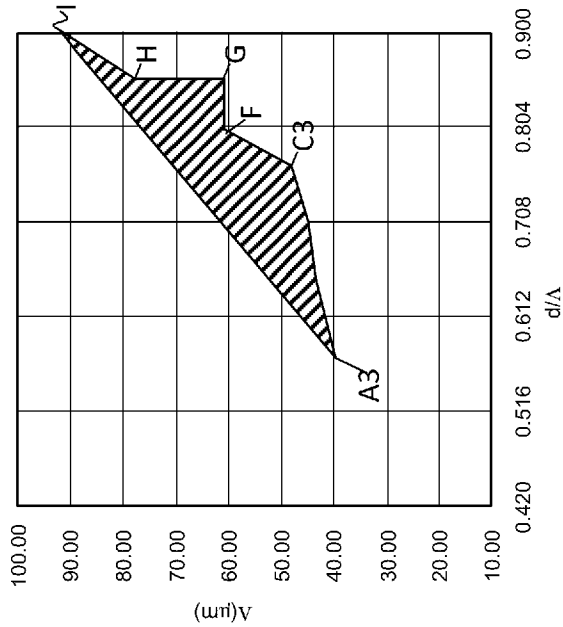
(c) 伝搬モード数が4以下



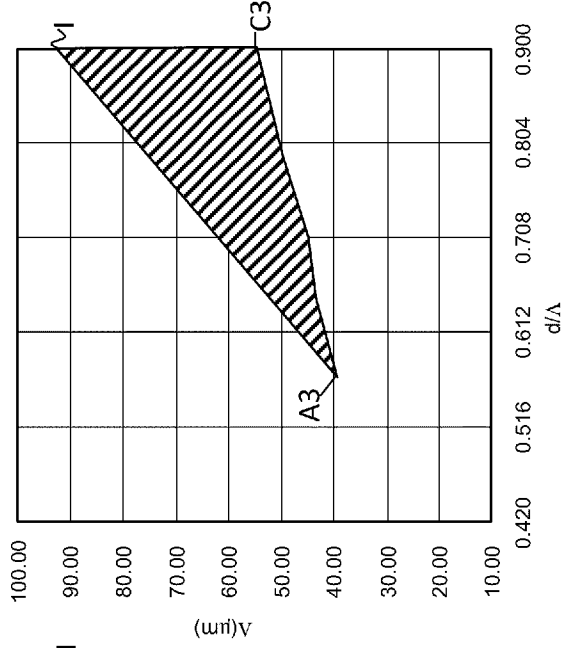
[図21]

[21] (1cell 300kWm可能)

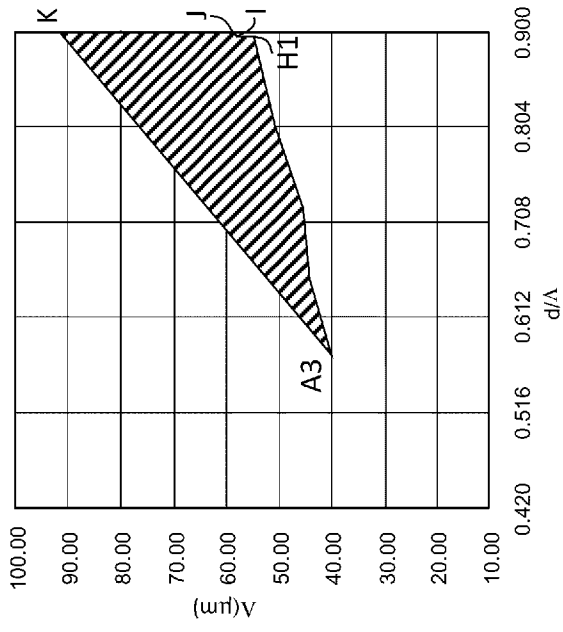
(a) $M2 \leq 2.0$



(b) $M2 \leq 3.3$



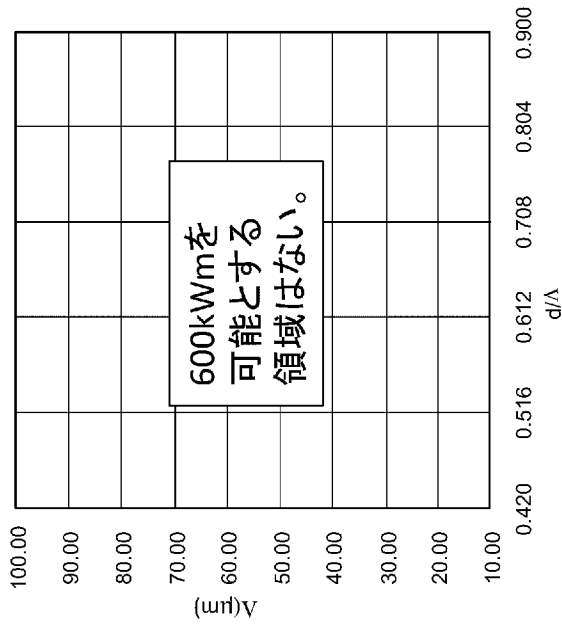
(c) 伝搬モード数が4以下



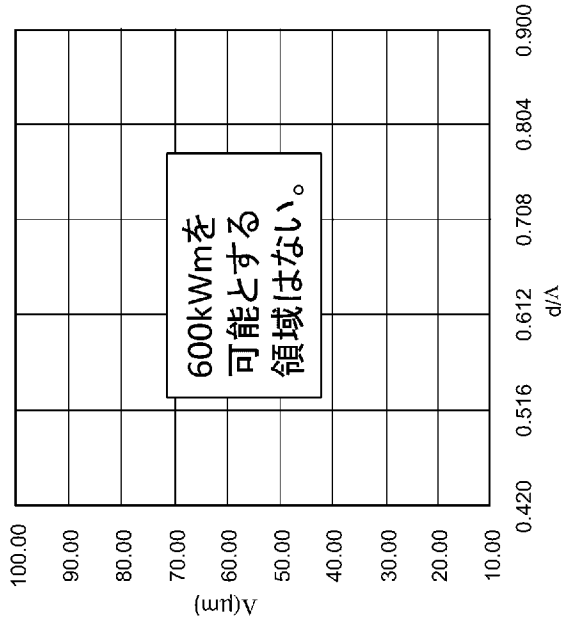
[図22]

[22] (1cell 600kWm可能)

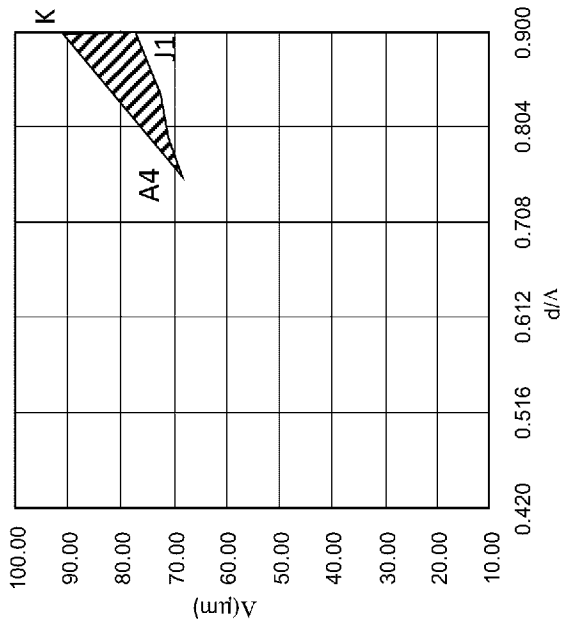
(a) $M2 \leq 2.0$



(b) $M2 \leq 3.3$

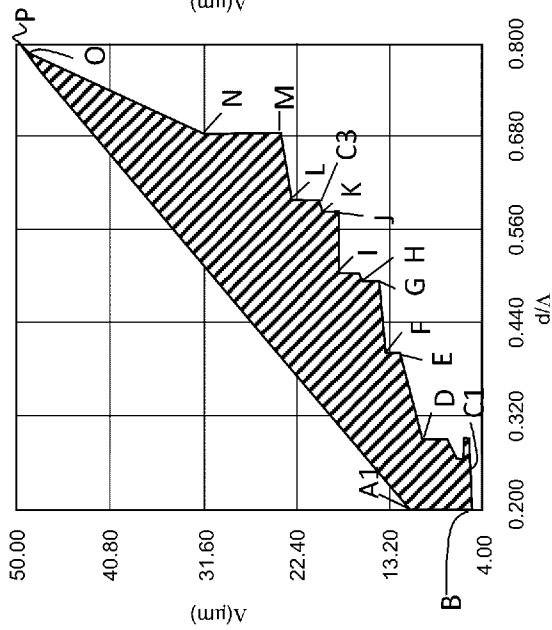


(c) 伝搬モード数が4以下

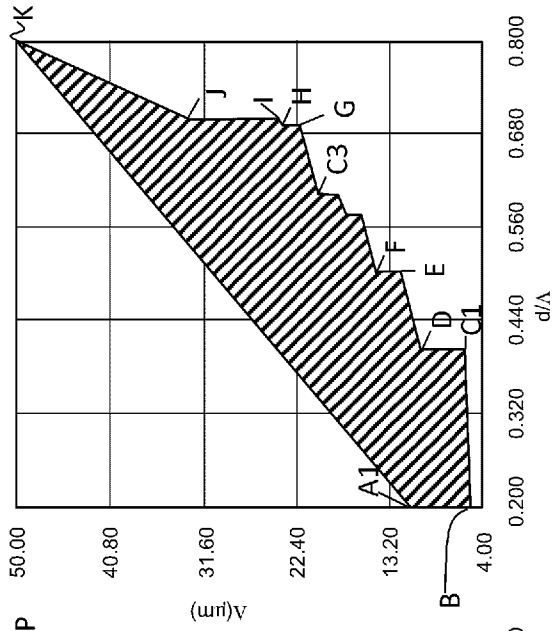


[図23]

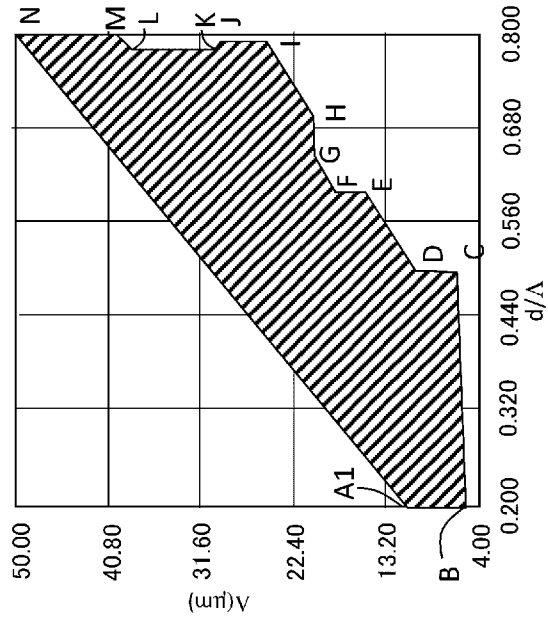
[23] (7cell 30kWm可能)
(a) $M2 \leq 2.0$



(b) $M2 \leq 3.3$



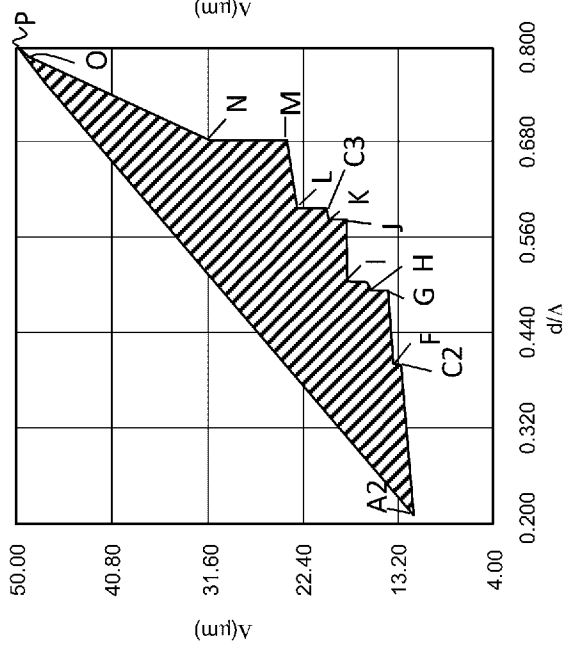
(c) 伝搬モード数が4以下



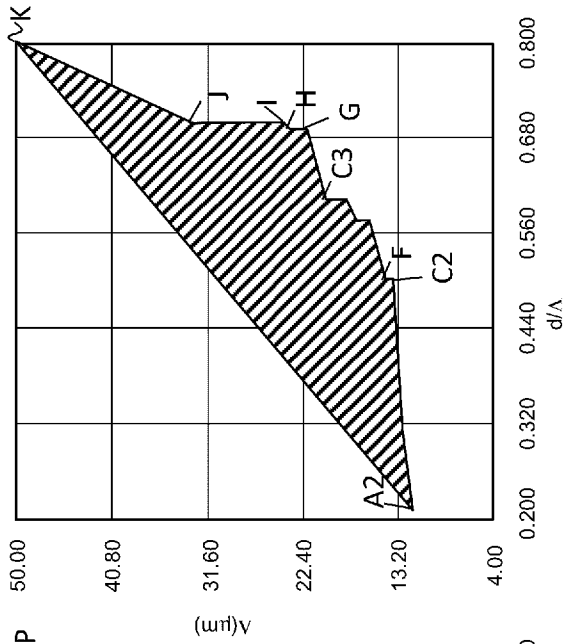
[図24]

[24] (7cell 150kWm可能)

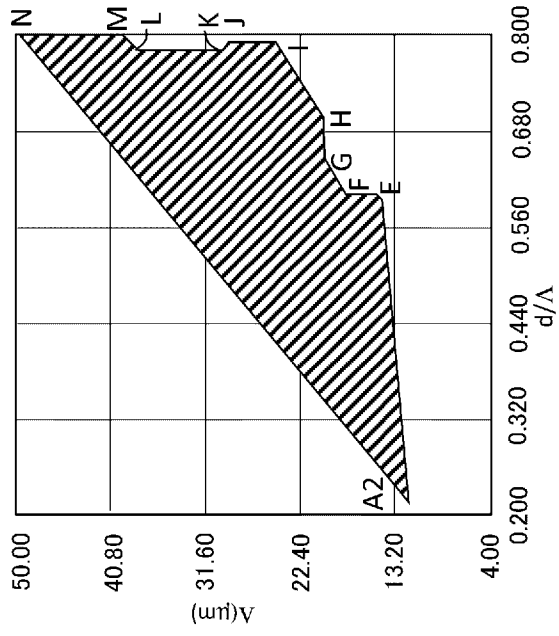
(a) $M2 \leq 2.0$



(b) $M2 \leq 3.3$

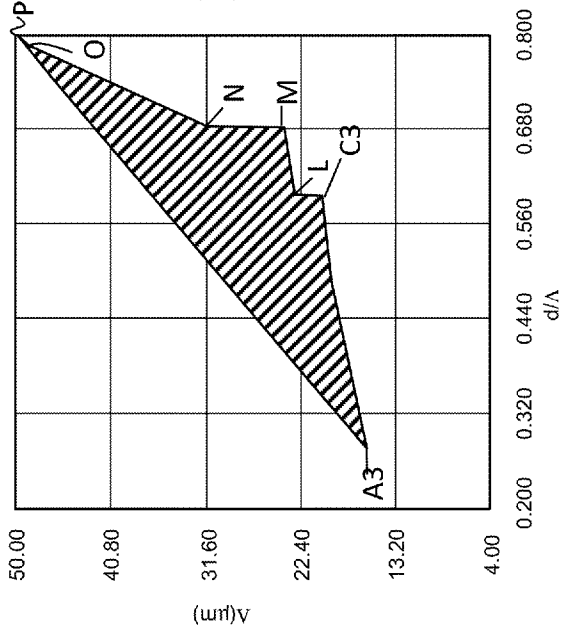


(c) 伝搬モード数が4以下

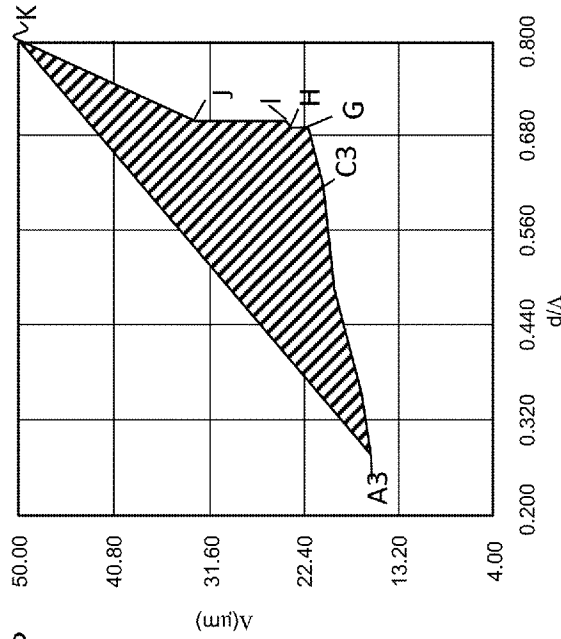


[25] (7cell 300kWm可能)

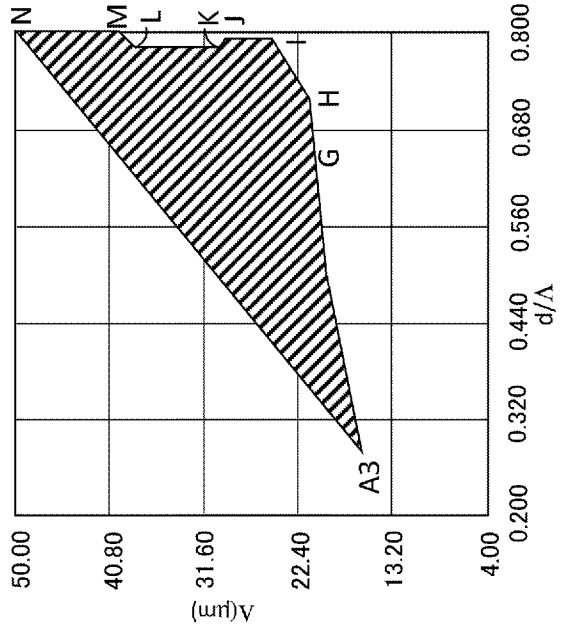
(a) $M2 \leq 2.0$



(b) $M2 \leq 3.3$



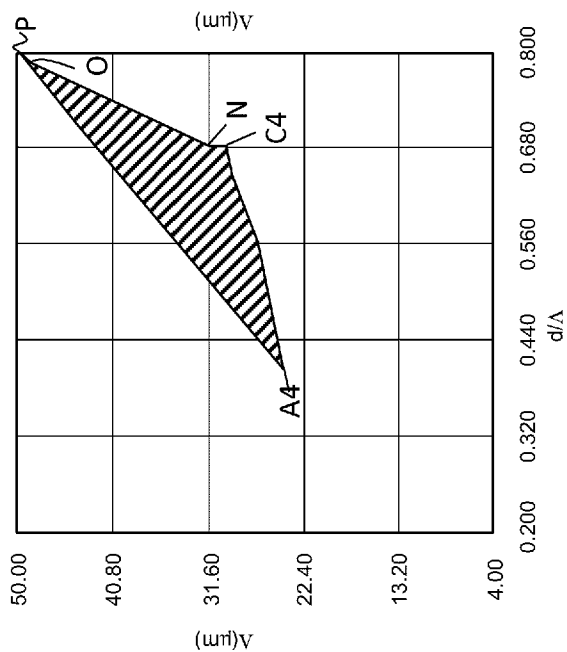
(c) 伝搬モード数が4以下



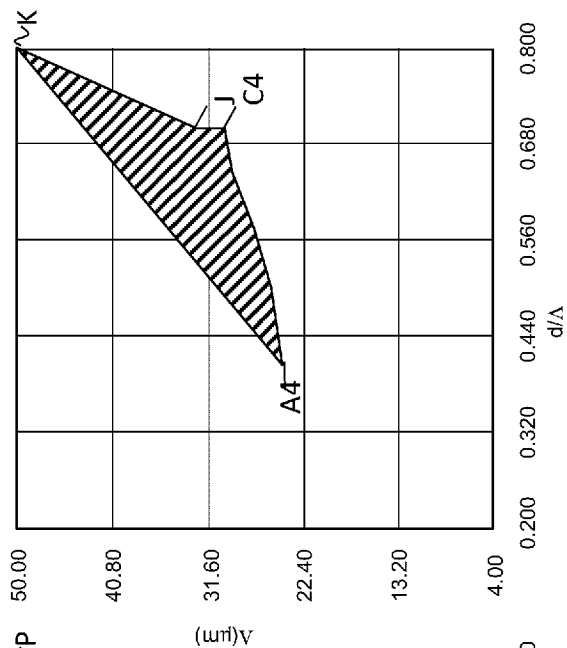
[図25]

[26] (7cell 600kWm可能)

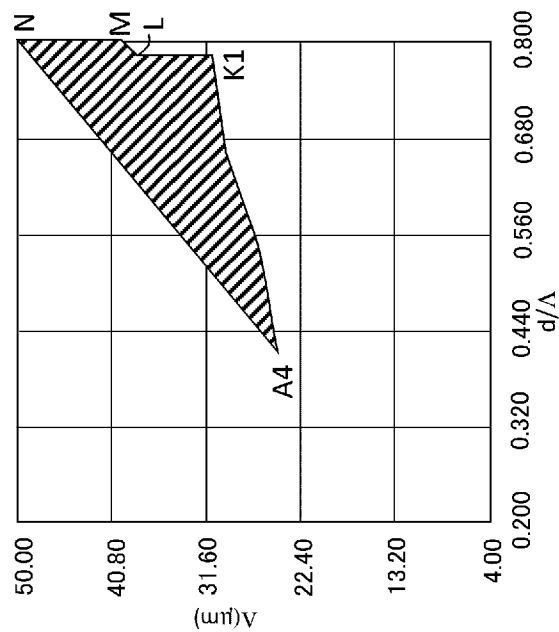
(a) $M2 \leq 2.0$



(b) $M2 \leq 3.3$



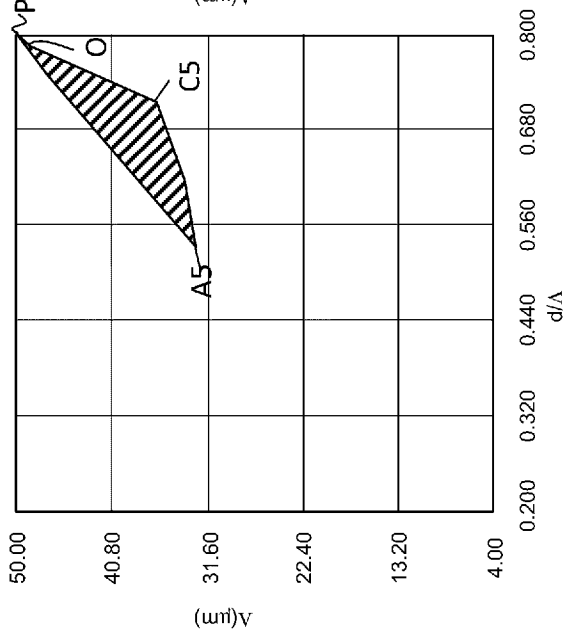
(c) 伝搬モード数が4以下



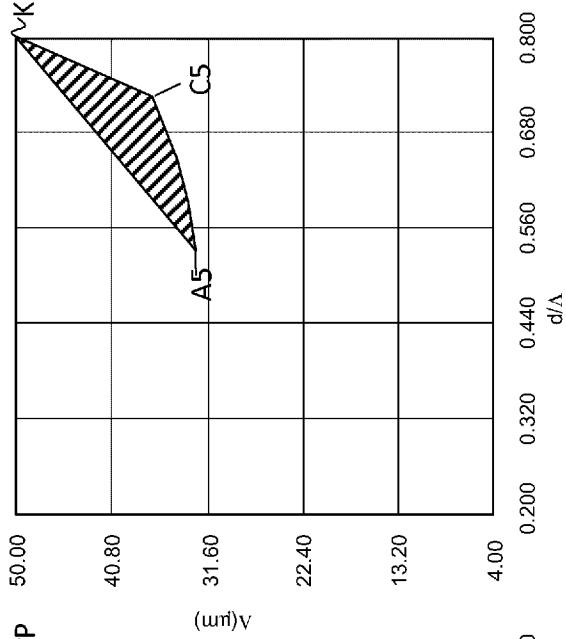
[図26]

[27] (7cell 900kWm可能)

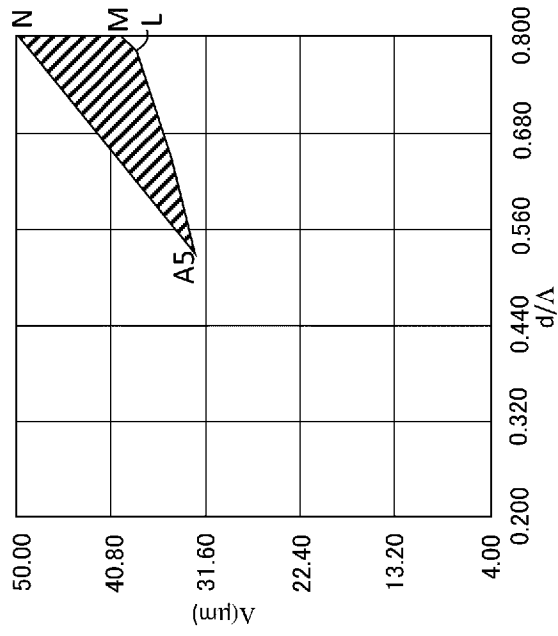
(a) $M2 \leq 2.0$



(b) $M2 \leq 3.3$



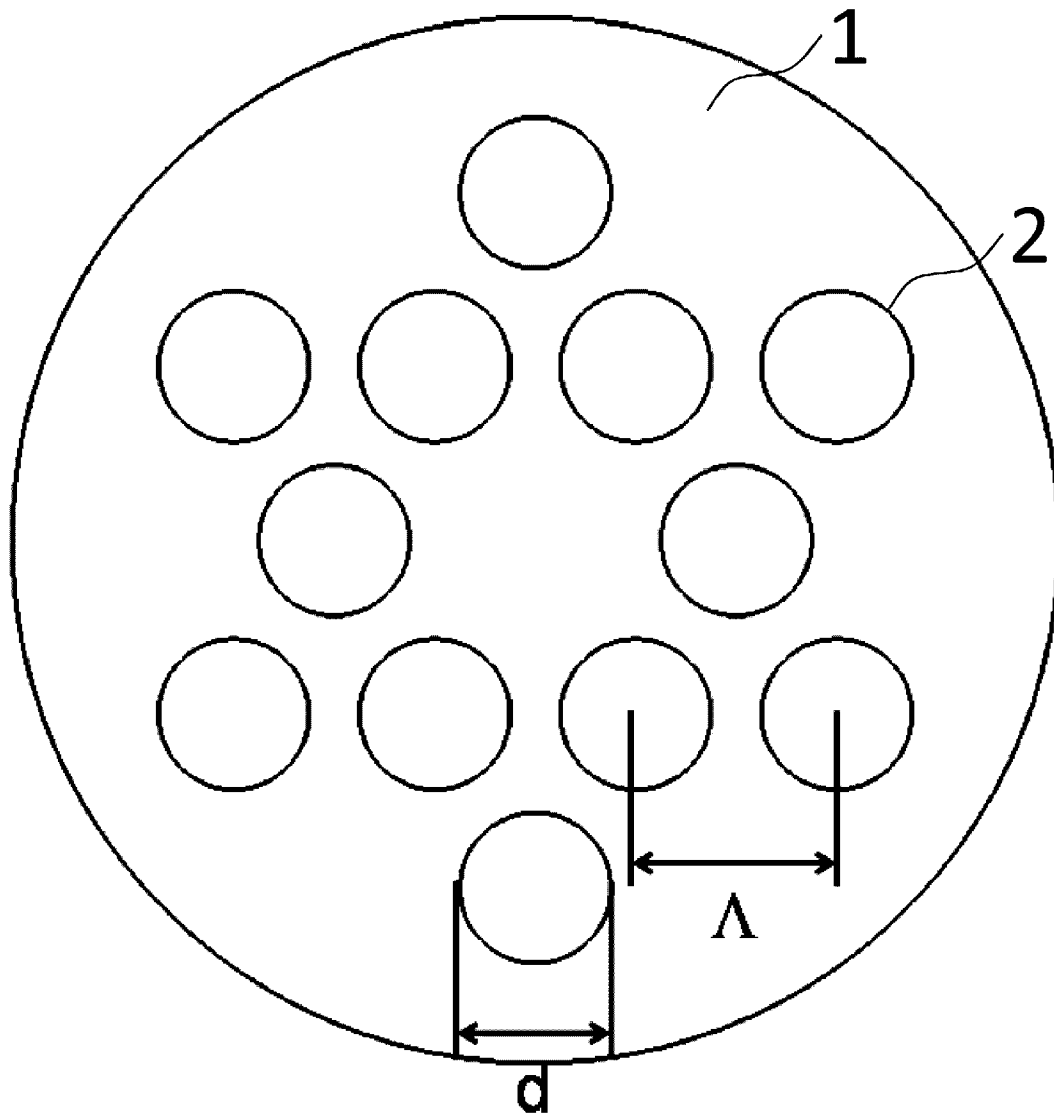
(c) 伝搬モード数が4以下



[図27]

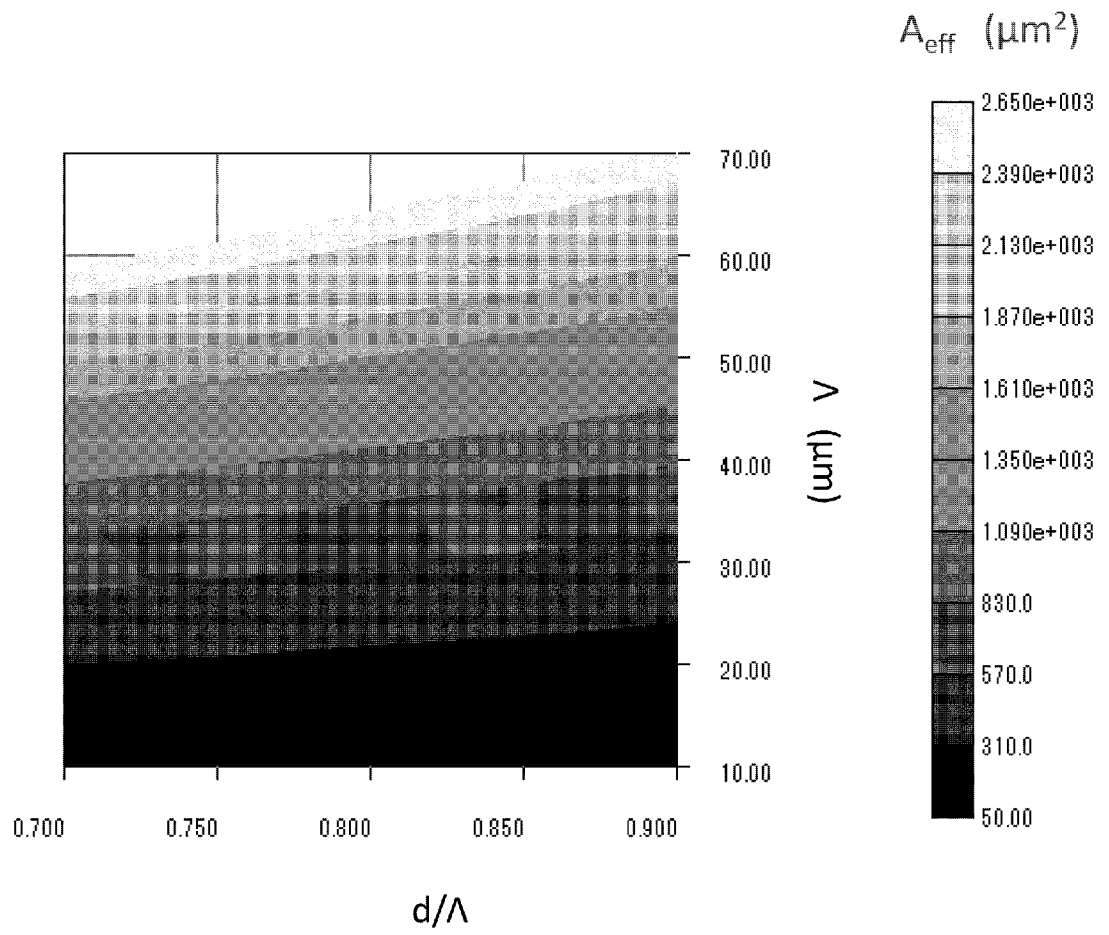
[図28]

[28]



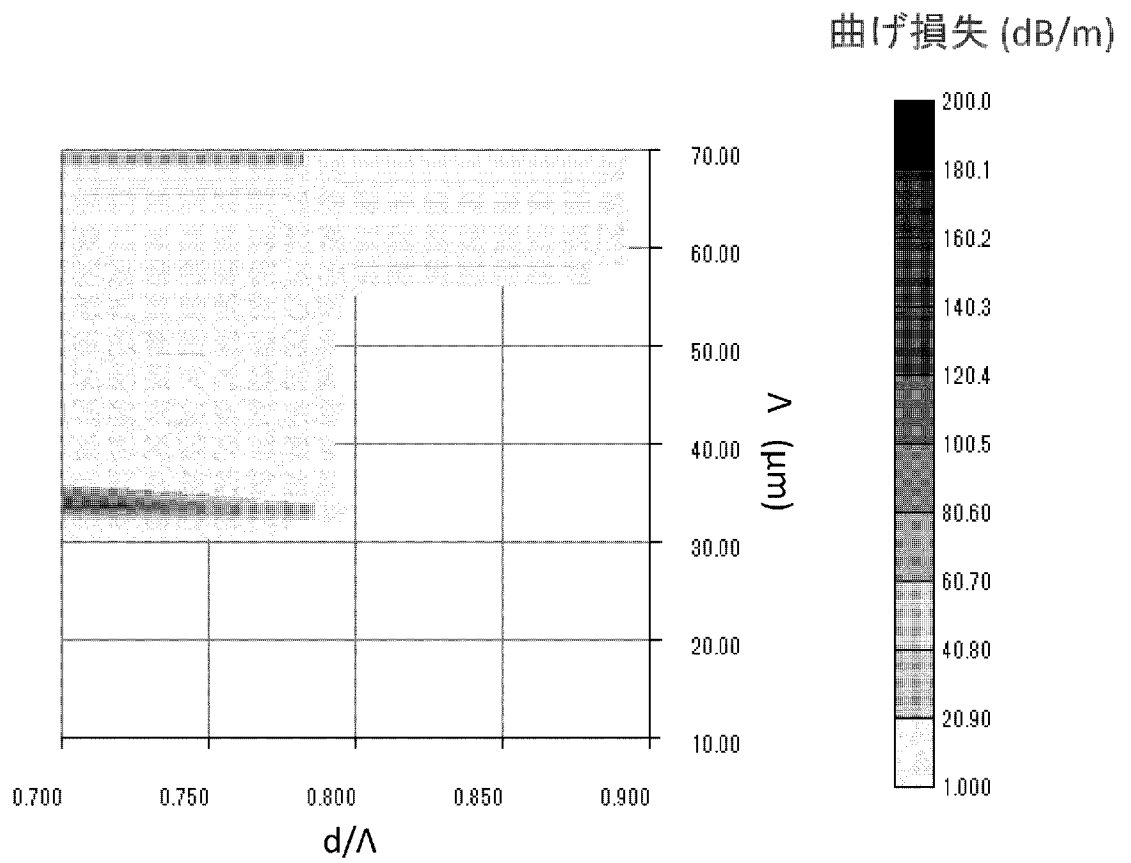
[図29]

[29]



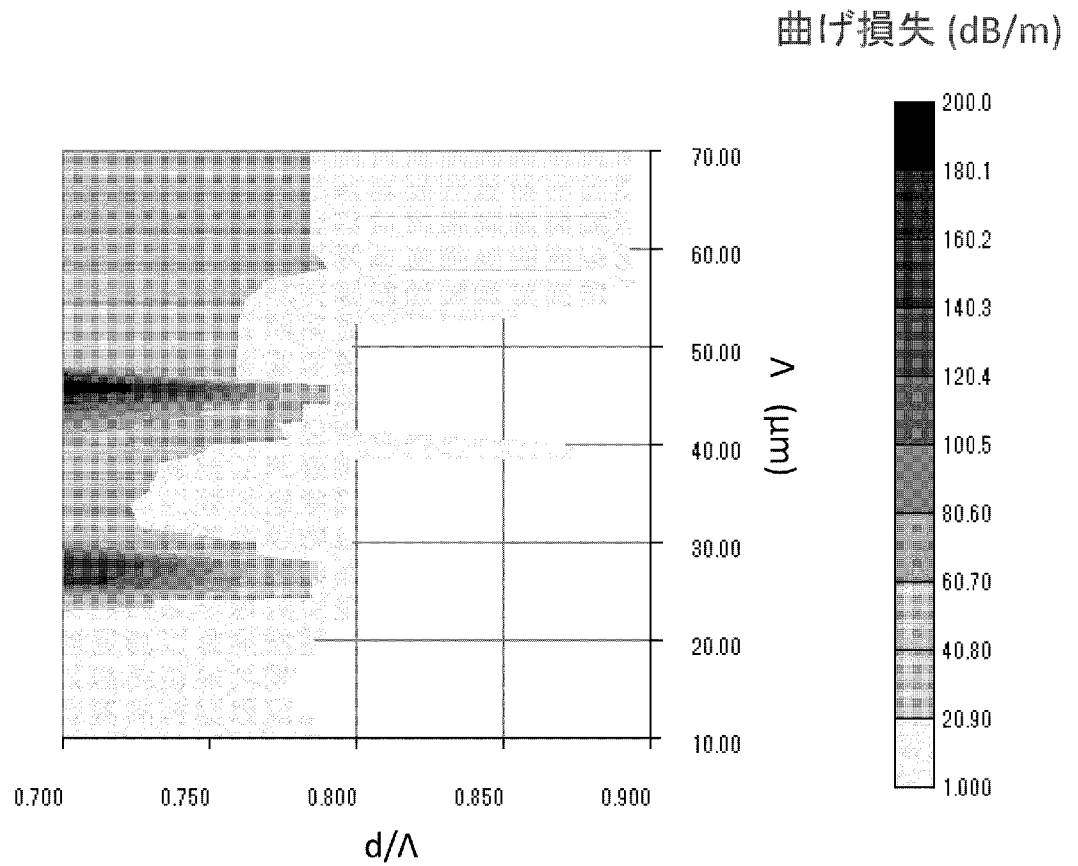
[図30]

[30]



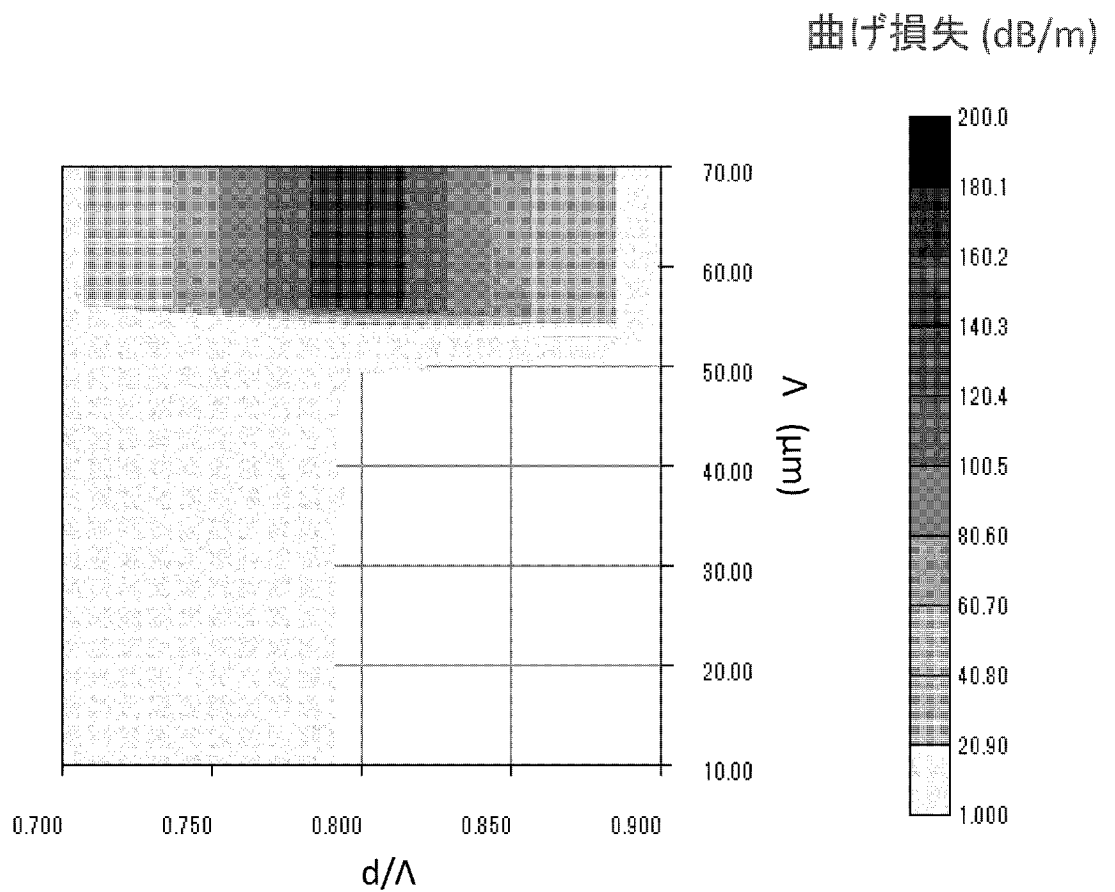
[図31]

[31]



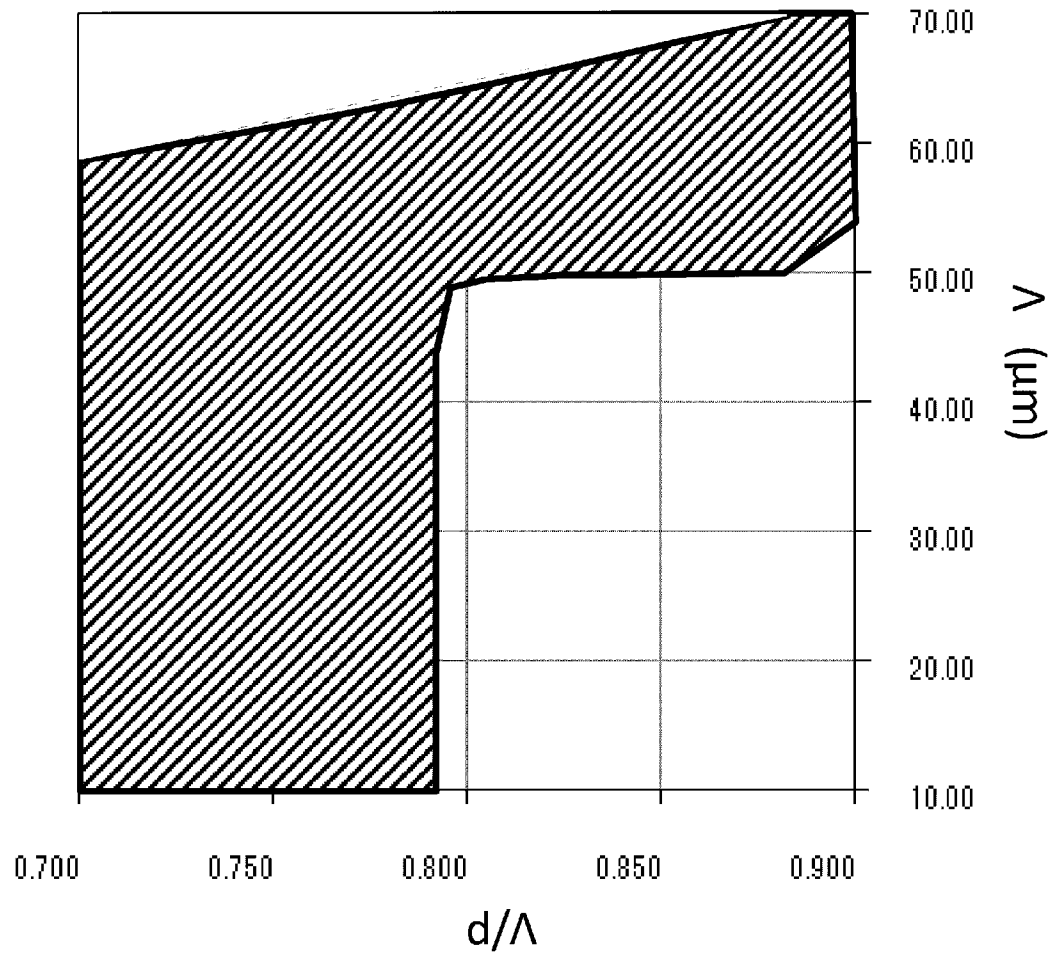
[図32]

[32]



[図33]

[33]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2016/058864

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G02B6/02(2006.01)i, G02B6/032(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G02B6/02-6/036, G02B6/44, H01S3/00-4/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2016
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2016	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2016

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
IEEE Xplore, CiNii

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2010-129886 A (Hitachi Cable Ltd., Gakko Hojin Toyota Gakuen, Toyota Motor Corp.), 10 June 2010 (10.06.2010), entire text; all drawings (Family: none)	1-2
A	JP 2010-541006 A (Imra America, Inc.), 24 December 2010 (24.12.2010), paragraphs [0149] to [0159]; fig. 25 to 26 & US 2010/0157418 A1 paragraphs [0197] to [0207] & WO 2009/042347 A1 & CN 101809475 A	1-2
A	Michalis N. Zervas; Christophe A. Codemard, High Power Fiber Lasers: A Review, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014.10, Volume:20, Issue:5	1-2

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 09 June 2016 (09.06.16)	Date of mailing of the international search report 21 June 2016 (21.06.16)
--	---

Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer Telephone No.
--	---

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/058864

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Jens Limpert et al., The Rising Power of Fiber Lasers and Amplifiers, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007.06, Volume:13, Issue:3, P.537-p.545	1-2
A	Hidehiko Yoda et al., Beam quality factor of higher order modes in a step-index fiber, Journal of Lightwave Technology, 2006.03, Volume:24, Issue:3, p.1350-p.1355	1-2

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G02B6/02(2006.01)i, G02B6/032(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G02B6/02-6/036, G02B6/44, H01S3/00-4/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2016年
日本国実用新案登録公報	1996-2016年
日本国登録実用新案公報	1994-2016年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

IEEE Xplore, CiNii

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2010-129886 A（日立電線株式会社, 学校法人トヨタ学園, トヨタ自動車株式会社）2010.06.10, 全文, 全図（ファミリーなし）	1-2
A	JP 2010-541006 A（イムラ アメリカ インコーポレイテッド） 2010.12.24, [0149]-[0159], 図 25-26 & US 2010/0157418 A1, [0197]-[0207] & WO 2009/042347 A1 & CN 101809475 A	1-2

☑ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

09.06.2016

国際調査報告の発送日

21.06.2016

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）
 郵便番号100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

奥村 政人

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

2L

4752

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	Michalis N. Zervas;Christophe A. Codemard, High Power Fiber Lasers: A Review, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014.10, Volume:20, Issue:5	1-2
A	Jens Limpert et al., The Rising Power of Fiber Lasers and Amplifiers, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007.06, Volume:13, Issue:3, P. 537-p. 545	1-2
A	Hidehiko Yoda et al., Beam quality factor of higher order modes in a step-index fiber, Journal of Lightwave Technology, 2006.03, Volume:24, Issue:3, p. 1350-p. 1355	1-2