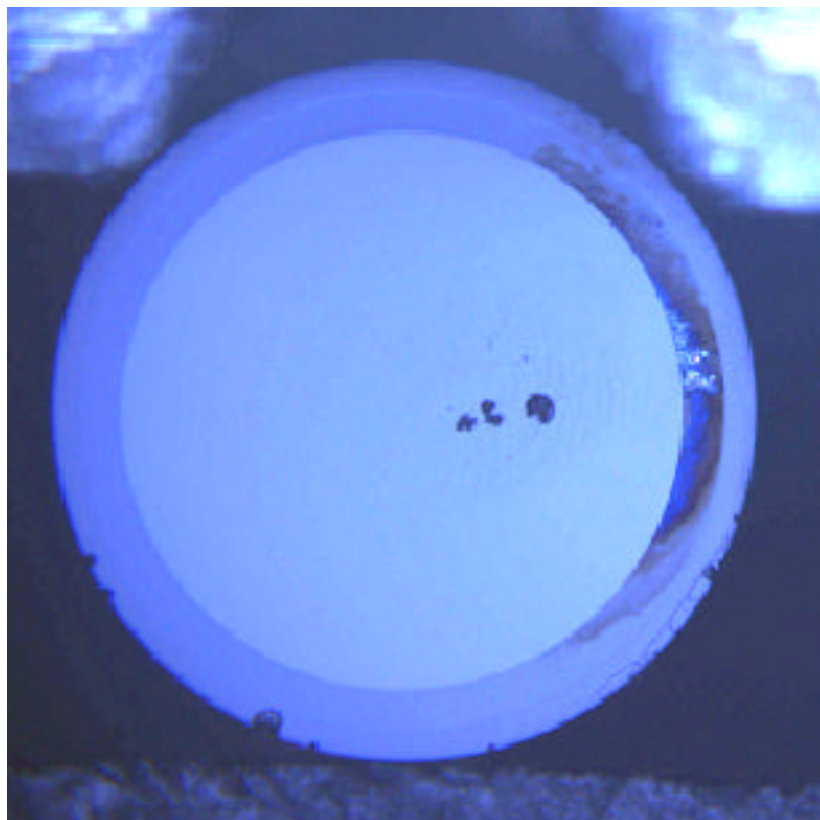


大口径マルチモードファイバによる パルスレーザー伝送技術の開発

レーザー技術開発室

本 越 伸 二



コア径 1000µm マルチモードファイバ端面のレーザー損傷像
(26 J/cm² @1064nm, 10ns pulse)

研究の目的：本研究では、高出力パルスレーザーを光ファイバ伝送することを目指し、レーザー損傷、非線形現象などの課題を明らかにし、伝送技術を開発する。

今後の応用・発展：産業応用レーザーのファイバ伝送

連絡先：TEL 06-6879-8762 FAX 06-6878-1568

E-mail moto@ile.osaka-u.ac.jp

大口径マルチモードファイバによるパルスレーザー伝送技術の開発

レーザー技術開発室

本越伸二、¹吉田実（共同研究員）

¹近畿大学

1. はじめに

現在、光ファイバは産業・医療・情報通信など様々な分野で応用されており、我々が生活する上で欠かせないものとなっている。特に情報通信分野においては、高速・高帯域・大容量の通信が可能な伝送媒体として広く用いられている。最近では光ファイバをセンサーとして利用する研究も盛んに行われており、様々な土木構造物の計測監視や生体内の臓器組織内圧や血圧、血流速度の計測などで応用が可能であるとされている。また、高エネルギー光を光ファイバによって伝送させ、金属の加工や溶接なども行われている。このように光ファイバは低損失性、無誘導性、可撓性などの特長を生かし、更に多くの分野で応用されると考えられている。

近年、光ファイバ自体をレーザーの増幅媒質とするファイバレーザーの研究も盛んに行われており、それに伴いファイバレーザーの高出力化やパルス化が急速に進み、高エネルギーパルス光を伝送する技術が要求されている。しかしながら、高出力パルスレーザー光をファイバ伝送する場合、ファイバの入出射端面あるいは内部における光学損傷が問題となり、現状の産業ラインでは、専らミラー光学系によって伝送されている。また、光ファイバ中での非線形光学効果による伝送効率低下が今後のハイパワーレーザー伝送分野への応用時に解決されなければならない点である。このような問題を解決するには、ファイバのコア径を増加させてレーザー光のエネルギー密度を下げるのが考えられるが、コア径の増加に伴い光伝播モードが劣化することにより、局所的な光強度の集中が起こり、損傷や非線形効果を防ぐには至っていない。

上記を含み、本研究では大口径マルチモードファイバによる高出力パルスレーザーの伝送技術を開発することを目的とし、大口径マルチモードファイバに高出力パルスレーザー光を入射した場合の伝送効率及び非線形光学効果による後方誘導散乱光の測定を行った。また、異なったコア径に対する伝播特性を比較しコア径と伝播特性の関係について考察した。

2. 光ファイバ中の非線形効果及び光学損傷

どのような誘電体でも電磁場の強度が高いと、光に対して非線形効果¹⁾を示す。特に光ファイバの場合、光を細径のコアに閉じ込めるためにパワー密度が高いこと、低損失であるために光と媒質の相互作用距離が長いことなどから、比較的強度においても非線形効果が現れる。非線形効果が生じる理由は、印加された場によって起こる束縛電子の非調和運動と関係したものである。その結果、電気双極子に起因する誘導分極 P はもはや電界 E に比例しなくなり、(1)式に示すような関係で表すことができる。

$$P = \epsilon_0 \{ \chi_1 E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots \} \quad (1)$$

ここで ϵ_0 は真空中の誘電率、 χ_i は受感率である。分極 P に主要な寄与をするのは線形受感率 χ_1 である。

χ_1 の効果は屈折率及び吸収係数に取り込まれている。2次の受感率 χ_2 は第2高調波発生や和周波発生などの非線形効果を発生させる。しかし χ_2 が存在するのは分子レベルでの反転対称性のない系に限られる。例えば石英ガラスの χ_2 は零であるが、それはガラスを構成する SiO_2 分子が対称的であるからである。したがって、光ファイバは通常2次の非線形効果を示さない。そのため光

ファイバ中でみられる最低次の非線形効果は 3 次の受感率 χ_3 から生じる。3 次の受感率に起因する非線形効果は、第 3 高調波の発生、四光波混合、非線形屈折、誘導ラマン散乱²⁾、誘導ブリルアン散乱³⁾が代表的である。第 3 高調波の発生及び四光波混合は位相整合条件を満たさなければ発生しないので起こり難い。

誘導ラマン散乱、誘導ブリルアン散乱⁴⁾に関しては光ファイバを用いて研究された非線形効果の最初のものである。どちらも誘導非弾性散乱から生じるものであるが、誘導ラマン散乱は光学モードのフォノンが寄与するのに対して、誘導ブリルアン散乱は音響モードのフォノンが寄与する違いがある。入射光の 1 個の光子がまず消滅し、周波数が低くなったストークス周波数をもつ光子 1 個とフォノン 1 個が同時に生成すると理解されている。当然、フォノンのエネルギーと運動量は、それぞれの保存則を満たすものとなっている。エネルギーと運動量がうまく合っていれば、フォノンを吸収して、反ストークス周波数をもつエネルギーの高い光子を放出することもある。誘導ラマン散乱と誘導ブリルアン散乱は共に同様な現象に起因するものであるが、光学モードと音響モードの分散関係が異なっているため根本的な差が生じる。つまり、誘導ラマン散乱は光ファイバの中で主に前方に起こるが、誘導ブリルアン散乱は常に後方のみ起こる。

光ファイバ中の誘導ラマン散乱の特徴として、パルス幅が数 ns またはそれ以下の光を入射させたときに発生することが分かっている。また、光ファイバから出射された光は光ファイバの材料である石英ガラスの分子振動の影響を受け、周波数が長波長側と短波長側にシフトする。さらに、光ファイバ中の誘導ブリルアン散乱の特徴としては、光ファイバに強いコヒーレントな光を入射させたときに発生することが分かっている。光ファイバから出射される光は光ファイバの材料に発生するひずみ量に比例して周波数が長波長側にシフトする。

本研究のようにパルス光での光ファイバ中の後方誘導散乱光の研究として、過去には大口径 400 μm ~ 1000 μm の屈折率階段型多モードファイバを用いて、パルス

光での光ファイバ中の誘導ブリルアン散乱発生閾値と光ファイバの各パラメータとの関係についての研究が行われている⁵⁾。ファイバ入射端面での NA、ファイバ長(伝送距離)、ファイバの曲率半径及びファイバのコア径によって、誘導ブリルアン散乱発生閾値が変化し、最終的にファイバ入射端面での NA は小さく、ファイバ長が長く、ファイバの曲率半径を増加させ、さらにはコア径を小さくするほど、誘導ブリルアン散乱発生閾値は下がることが報告されている。これらの結果はファイバ中の非線形効果が伝播する光の強度、相互作用長、光ファイバ材料・構造に依存することを示唆している。

単一モードファイバの場合、光ファイバ中の誘導ブリルアン散乱発生閾値はファイバの長さやモードフィールド径に依存している。誘導ブリルアン散乱発生閾値 P とファイバ長とモードフィールド径の関係は次のように近似できる。

$$P = k \left[\frac{A_{eff}}{L_{eff}} \right] \quad (2)$$

ここで、 k は誘導ブリルアン散乱閾値の定数である。また、 A_{eff} 、 L_{eff} は実効コア断面積及び実効ファイバ長である。これらは、モードフィールド径 $2a$ 、ファイバの損失係数 α 及びファイバ長 L を使って次のように近似することができる。

$$A_{eff} = \pi a^2 \quad (3)$$

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (4)$$

したがって、式(2) ~ 式(4)より入射光の条件を決定すると光ファイバ中の誘導ブリルアン散乱発生閾値はコア径とファイバ長によって決定される。

光学損傷^{6,7)}は、入射させるレーザー光のパルス幅によって、損傷過程や発生する損傷形態などの特徴が異なることが分かっている。特に、数十 ps のパルス幅を境に明確な特徴の違いがある。

パルス幅が数十 ps 以上の光学損傷については、光学損傷の発生は不純物や欠陥に強く依存していて、統計的

なばらつきをもつ。また、損傷形態に関しても薄膜材料の溶解、熱応力による破壊、アブレーションなどがある。つまり、不純物や欠陥に起因する局所的吸収が損傷の主な原因であり、溶解、熱応力による破壊といった損傷形態をとることからも熱的なプロセスが支配的であると考えられている。

パルス幅が数十 ps 以下の光学損傷については、損傷の発生は不純物や欠陥の分布や濃度といった確率的な要素に依存しなくなる。さらに、損傷の形態はアブレーションのみであり、そのアブレーションが周りの領域において熱伝導による損傷を引き起こすこともないと考えられている。

誘導散乱光の発生する閾値と光学損傷の閾値は入射光のエネルギーをコア断面積または入射光のスポット面積で割ったエネルギー密度(Fluence)、

$$Fluence = \frac{\text{入射エネルギー}}{\text{コア断面積} \text{ or } \text{入射光のスポット面積}} \quad (J/cm^2)$$

(5)

で定義されている。また、光学損傷閾値のレーザー強度の定義は、入射レーザー光の端面上での空間パターンがガウシアン分布の場合、ガウシアン分布の平均値である

のでレーザーの尖塔値強度は2倍となる。

3. 実験装置と評価試料

照射実験配置図を図1に示す。照射試験には Nd:YAG レーザー装置 (Quanta-ray) を用いた。10Hz、パルス幅 10ns で出力された単一モードレーザーパルスは、増幅器ユニット内に設置されたポッケルスセルにて、単一パルス動作にし、直径 16mm の Nd:YAG 増幅器にて、最大 500mJ まで増幅される。その後、エネルギー調整用の / 2 板と偏光子を通過し、戻り光を遮断するために / 4 板にて円偏光にし、焦点距離 3000mm のレンズを用いてファイバ端面に入射した。ファイバコアへのアライメントは、予め平板試料表面にダメージを発生し、そのダメージ中心とコア中心が合うように顕微鏡でモニターを行った。入射レーザーパルスのエネルギー、パルス波形、試料表面位置のビームサイズは、ビームの一部をビームスプリッターで取り出すことにより常時測定した。ファイバを通過したレーザーパルスは、コリメートレンズにより平行にされ、エネルギー、パルス波形を観測した。ファイバ内部の誘導散乱による戻り光は、ミラーの約 1%

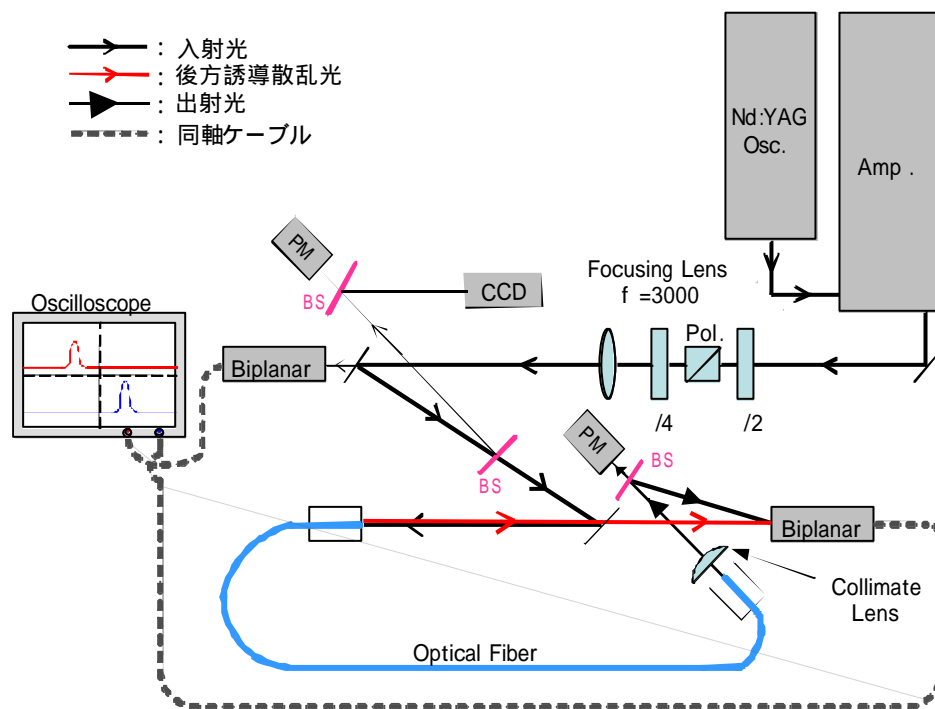


図1 ファイバ伝送実験配置図

表 1 評価用光ファイバ諸元

ファイバの種類	型名	構造				伝送特性	
		コア径	クラッド径	長さ [m]	開口数 (NA)	波長	損失
		[μm]	[μm]			[nm]	[dB/km]
純粋石英コア ステップインデックス型	ST800G	800	1000	5	0.2	633	10
						1060	5
マルチモード ファイバ	ST1000H	1000	1250	5	0.2	633	10
						1060	5

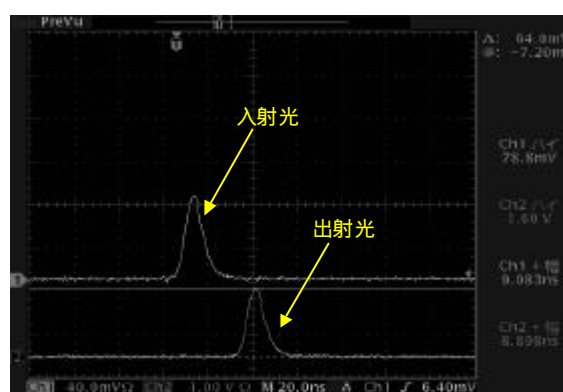
の透過光をファイバ通過後のバイプラナー光電管で一
緒にモニタした。

試験には、コア径 800 μm と 1000 μm のステップインデ
ックス型石英マルチモードファイバを用いた。各々の諸
元を表 1 にまとめた。各々のファイバの長さは 5m、端
面は光学研磨のみで、AR コートは施していないもの
を用いた。異なったコア径への入射ビームサイズは、
650 μm と 850 μm に調整した。

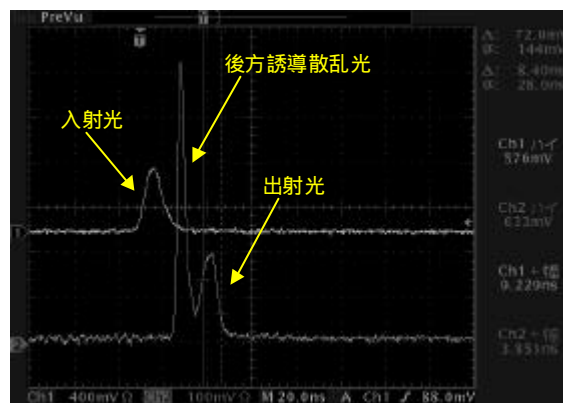
4 . コア径 1000nm 実験結果

コア径 1000 μm のマルチモードファイバに対する伝送
特性を評価した。図 2 に入出力波形モニター用バイプラ
ナ光電管のデータを示す。図 2 (a) は入力 20mJ の時のデ
ータである。ファイバ入出力パルス両方とも、パルス幅
10ns であり波形の変化もないことが確認できる。一方、
入力エネルギーを 60mJ まで増加すると、出力波形用バ
イプラナ光電管に同時に入射した後方散乱光波形が現
れ始める。この後方散乱光パルスは、ファイバへの入射
エネルギーの増加に伴い増加し、反対に、出射パルス波
形はパルス幅、パルスピークともに減少する。図 2 (b)
は入力エネルギー 140mJ の場合である。

入射エネルギーに対する出射エネルギーと、後方誘導
散乱光のパルスピークパワーを図 3 にまとめた。入射エ
ネルギーが 50mJ 以下では、入射エネルギーの増加に対
して、出射エネルギーは線形に増加し、その傾きは
85.5% (入射端面の反射損失を考慮すると 91.5% の伝
送効率) であることが確認できた。しかし、入射エネル



(a)



(b)

図 2 コア径 1000 μm ファイバの入出力パルス波形
入射エネルギー (a) 20mJ、(b) 140mJ

ギーが 50mJ を超えると、伝送効率は低下し、同時に後
方誘導散乱光が現れ始める。コア径 1000 μm から誘導散
乱発生閾値は 6.4J/cm² と求められる。石英固体材料で
行われた誘導ブリリアン散乱の発生閾値は、約 1J/cm²
(パルス幅 18ns) と報告されている⁸⁾。すなわち、マル

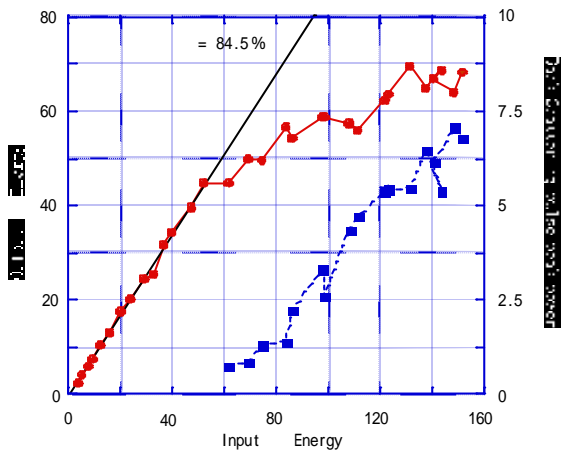


図3 コア径 1000 μm ファイバの入出力エネルギーと後方散乱パルスピークパワー

チモードファイバ内で発生する後方誘導散乱閾値は、固体材料に比べて高いことが判った。これは、固体材料での実験は単一モードレーザーパルスによる実験であり、本実験のマルチモードファイバ内部と違い高輝度で集光されているためと考えられる。

更に、入射エネルギーを増加すると、約 150mJ で入射端面に損傷が発生した。発生したファイバ表面の損傷形状を図 4 に示す。コア中心部に細かい損傷が数点入っていることが確認できる(図中赤い枠内)。ファイバへの入射ビームサイズは、850 μm であるため、端面でのエネルギー密度は 26J/cm² と求めることができる。一般に、光学研磨された石英ガラス表面のレーザー損傷閾値は

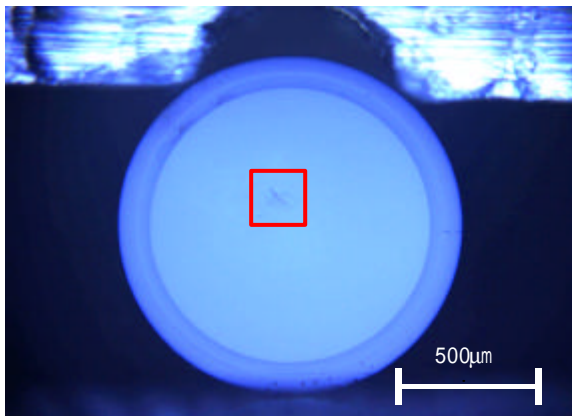


図4 コア径 1000 μm ファイバの端面損傷

約 100J/cm² (10ns) と報告されている⁸⁾。このことから、ファイバ端面の損傷閾値は、ファイバ端面の損傷閾値は、他の光学材料に比べて損傷が起こり易いものと言える。一般に、光学材料の表面損傷は、その表面粗さに依存することが知られている。つまり、ファイバ端面は通常の光学材料に比べて、研磨することが難しく、表面粗さがよくないことが予想される。この表面損傷閾値は、表面に AR コートを施した場合にも依存し、更に低い損傷閾値になることが予想される。この損傷時の伝送効率は約 48% であった。

5 . コア径 800 μm の実験との比較

同様の実験をコア径 800 μm のマルチモードファイバについて行った。その結果、低入射エネルギー時の伝送効率が 60.5% と低く、誘導散乱発生閾値、損傷閾値はそれぞれ 8.6J/cm²、25J/cm² であった。損傷閾値については、コア径 1000 μm の場合とほぼ同じであり、コア径に関わらず表面状態に依存することが判る。しかし、伝送効率が低く、誘導散乱発生閾値が高い。端面の損傷形状(図 5)を確認すると、コア中心より右に損傷が発生しており、クラッド層にも損傷が見られる。このことから、

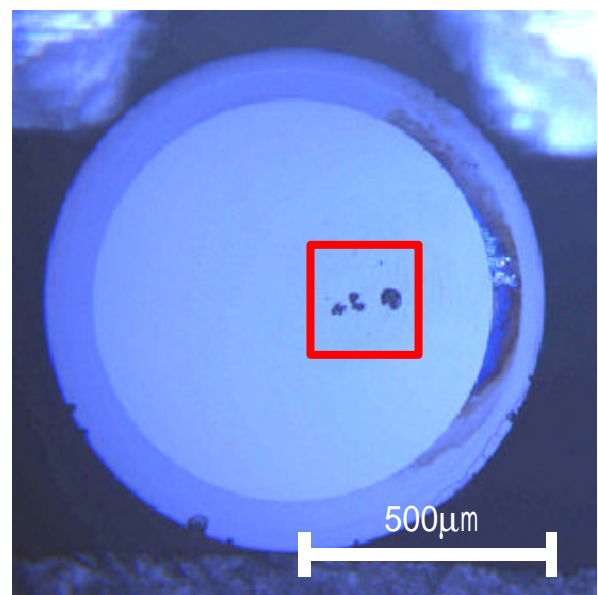


図5 コア径 800 μm ファイバの端面損傷

ファイバへの入射レーザー位置が僅かにずれたために、伝送効率、誘導散乱閾値が異なった値となったものと考えられる。

6. まとめ

光ファイバによる高出力パルスレーザー伝送を可能にすることを目標に、大口径マルチモードファイバの伝送特性の評価を行った。

コア径 1000 μm のマルチモードファイバの場合、低エネルギー時の伝送効率は 91.5%、誘導散乱閾値は 6.4J/cm²、端面損傷閾値は 26J/cm²と求めることができた。端面損傷については、通常の石英ガラス表面に比べて 1/4 程度であり、大幅な改善要素を含んでいる。一方で、更に低い閾値を持つ誘導散乱については、今後、伝送するレーザーの特性や、ファイバへの添加材の影響なども評価し、誘導散乱を抑制する条件について更に検討を進める。

参考文献

- [1] レーザー学会：“レーザーハンドブック”，レーザー学会編，オーム社，pp.97-115 (2006)
- [2] 岡本勝就：“光導波路の基礎”，コロナ社，pp.198-201 (1992)
- [3] 森下裕一：“Stimulated Brillouin Scattering Suppression Fiber”，昭和電線，Vol.55, No.1, pp12-13 (2005)
- [4] 岡本勝就：“光導波路の基礎”，コロナ社，pp.201-206 (1992)
- [5] V.Pashinin, V.Sturm, V.Tumorin, R. Noll：“Stimulated Brillouin scattering of Q-switched laser pulses in large-core optical fiber”，Optics & Laser Technology, Vol.33, pp.617-622 (2001)
- [6] B.C.Stuart, M.D.Feit, A.M.Rubenchik, B.W.Shore, M.D.Perry：“Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses”，Phys. Rev. Lett. 74 (1995)
- [7] B.C.Stuart, M.D.Feit, S.Herman, A.M.Rubenchik, B.W.Shore, M.D.Perry：“Nanosecond to femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics”，Phys. Rev. B53 (1996)
- [8] 吉田英次：“高平均出力固体レーザーの高性能化に関する研究”：博士論文，平成 11 年 1 月