

Nufern 製ファイバー及びファイバーレーザーサブアセンブリの優位性のご紹介

(株) オプトサイエンス

Nufern 社製ファイバーレーザー用光ファイバー（アクティブファイバー）とファイバーレーザーサブアセンブリについてご紹介いたします。

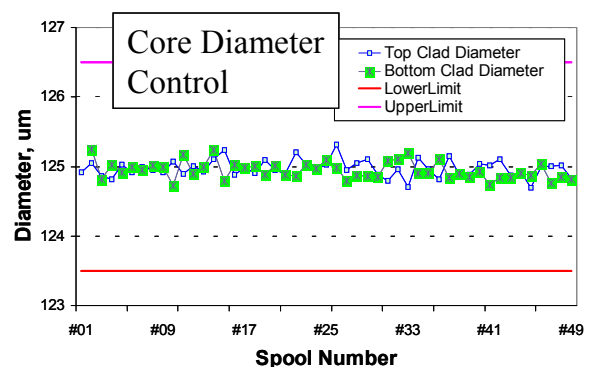
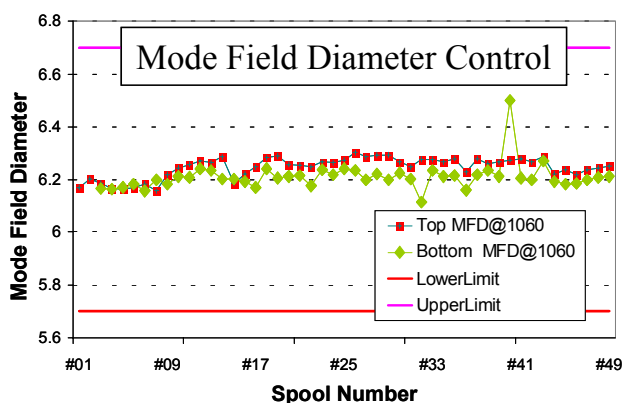
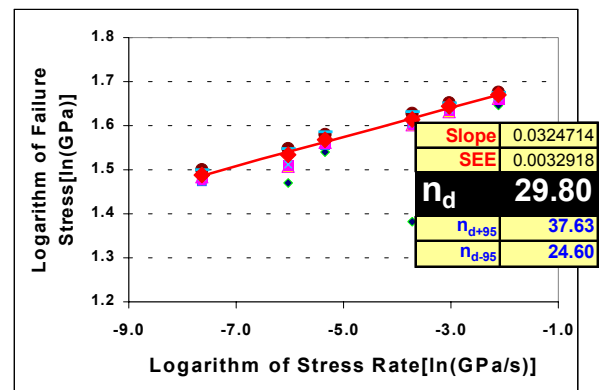
Nufern では次の様な優位性のあるファイバーレーザー用光ファイバー（アクティブファイバー）やファイバーサブアセンブリを製造しております。

- 1) Nufern はラージモードエリア（LMA）ファイバーの開発ではパイオニアです。
LMA ファイバーは連続（CW）発振やパルス発振のファイバーレーザーの高出力化には欠かせないファイバーの技術です。
- 2) 信頼性の高い製造プロセス制御技術を用いて製造しています。
 - － ファイバーの製造はクリーン度クラス100の空間で行っております。
 - － 非常に清浄度の高い化学システムを用いて製造しています。
- 3) 最適なファイバー組成を得るために工業所有権のある液層添加物負荷技術を用いています。
 - － 非常に大きなコア内に高い濃度のランタニド系元素を添加する技術
 - － 低 NA ファイバーの安定製造技術
 - － 屈折率形状の正確な制御技術（ビーム品質に影響度が高い）
- 4) パンダ型偏波面保持（PM）ファイバーも製造しています。
 - － Nufern はコア径が大きく、クラッド径が小さな形状の PM ファイバーを製造できます。例としては コア径：30 μm でグラッド径：250 μm の PM ファイバーが有ります。
 - － この様なファイバーは直線偏光の高ピークパワーの光パルスを発生できます。SHG、THG 等の波長変換用光源としては最適です。

Nufern の優位性について概要を御説明しましたが、個々の点について実績を元に詳しく御紹介致します。

Nufern の優位性（1）製造プロセス制御技術

ここに示します3つの図はシングルモードファイバーでのテレコディア規格のテストデータです。Nufern のファイバーは光学的にも形状精度でもまたファイバー引張り強度でも工業標準を常に上回っております。最先端の製造設備と製造プロセス制御技術と組合わさり、コア径やモードフィールドを前例のない安定な数値を再現良く、継続的に得ております。

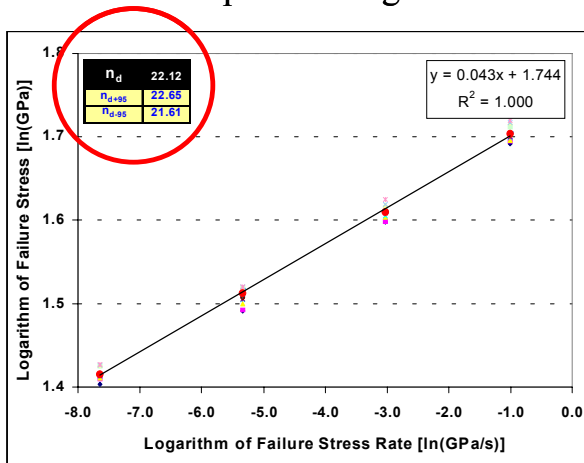


製造プロセス制御技術とクリーンルームでのファイバー製造により引張り強度で非常に優れた特性のファイバーを作っています。

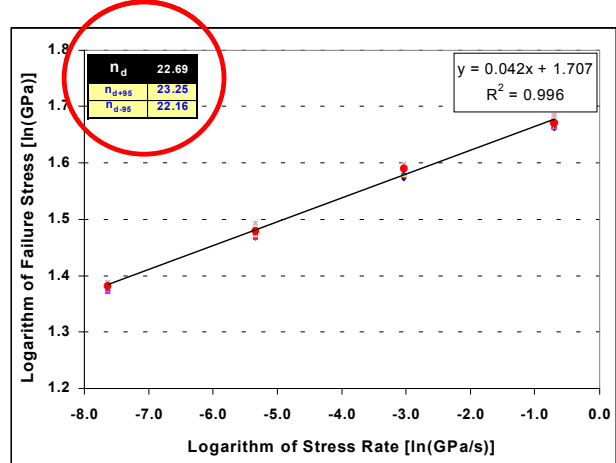
クラッド径 $125\ \mu\text{m}$ のダブルクラッドファイバーにて偏波面保持と通常のファイバーを比較しても応力腐食ファクター： n_d の値は変化しません。 下図をご覧ください。データは8角クラッド形状の非偏光ファイバーと偏波面保持ファイバーの円形クラッドを比較しています。テレコディア規格では n_d 値として約 18 である事が要求されます。この値は長い年月に渡って使用するファイバーレーザ発振器や増幅器で大口径のファイバーをコイル状に巻く時に効いてきます。

Nufern のファイバーは n_d 値が 22 と大きく、非常に強いファイバーであることを示しています。

Shaped cladding



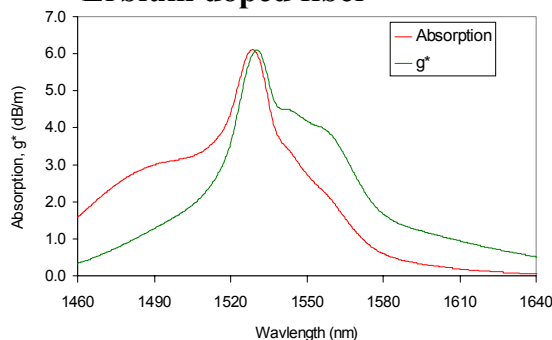
PM double-clad



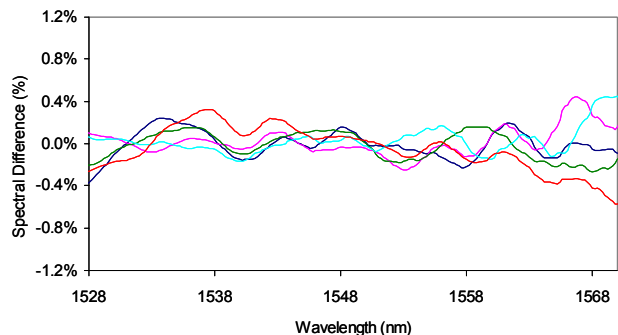
Nufern の優位性 (2) 再現性の良い液層添加物ドーピング技術

Nufern が所有している工業所有権を使う液層添加物ドーピング技術が Er と Yb 様な添加物をドーピングするファイバー製品に用いられています。石英内の添加物の濃度と分散は クラスタ化しない様にまた高いスロープ効率が維持できる様に制御されています。次に示す 2 つのグラフは Er ファイバーの吸収と輻射光のスペクトルと 5 つのプリフォームから作ったファイバーの間のスペクトルの差であり、その差は非常に小さい事が判ります。ファイバーの製造ロット間のスペクトルの再現性は品質を保証するための多数の重要なテストの中の 1 つの指標です。

Abs./Emission Spectrum of Erbium doped fiber

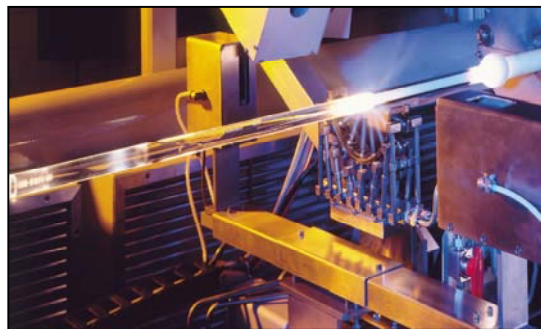


Spectral Differences Between Fibers From Five Different Preforms



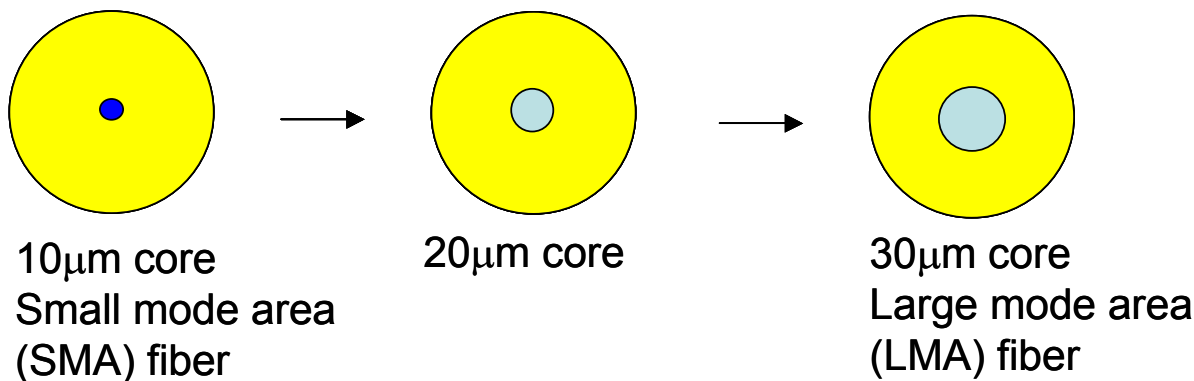
Nufern の優位性（3）最先端

2,300 万ドルの建設費を掛けた 49,000 平方フィートの施設は最先端の技術を導入しました。スペシャルティファイバーはテレコム用伝送ファイバーの標準に則って作られています。ファイバーのプリフォーム製造設備とファイバー線引器の写真を下図に示します。全ての石英は超高純度のガス供給装置を用いて MCVD 法により石英の基材から社内で作られています。ファイバーの長時間信頼性を得るためにファイバーを製造する全ての重要な製造工程はクリーンルーム内に設置されています。品質保証や出荷前検査用の施設も完備しております。また高出力レーザの試験室も有ります。



Nufern の優位性（4）大きなモード領域（Large Mode Area:LMA）ファイバー

ファイバーレーザ用のアクティブファイバーと励起光間の長い相互作用長はファイバーレーザの効率を高め、熱的安定度も増加します。しかしながら ファイバーが長いと高出力化にはいろんな課題が発生します。非線形現象が高出力ファイバーレーザの特性を制限します。その非線形現象とは誘導ラマン散乱(SRS)や誘導ブリルアン散乱(SBS)です。これらを避けるための有効な解はモードフィールドを増加させる事です。つまりファイバーのコア径を増加させます。コア径の大きなファイバーを用いると長い小さなコア径のファイバーで得られるのと同等の利得が短いファイバーで得られます。



ファイバー内におけるシングルモード (LP₀₁) の動作は 次式によって規定されています。

$$V = (\pi \cdot d \cdot NA / \lambda)$$

シングルモードファイバーにおいては $V < 2.404$ です。

これから コア径を大きくし、コアの NA を注意しながら小さくするとシングルモード動作を維持できる事が判ります。

LP₀₁モードでファイバーが曲げに対して損失が敏感にならない様にするには NAの最低限の値は NA~0.06です。この様に小さな NAのファイバーを製造するにはファイバーやプリフォームの製造技術に対して要求される精度が高いレベルになります。

この様なファイバーを製造できる製造プロセス制御技術は Nufernの施設の非常に優れていることを示しております。

Nufernの優位性（5） 出力パワーがスケールできるファイバーレーザ

マルチモードファイバーを使用してシングルモード動作をさせるために高次のモードを抑制するためには種々の方法があります。

- ・ ファイバーの屈折率や添加物濃度を操作する。
- ・ ファイバーの終端をテーパ状にする。
- ・ 種々のファイバーへの入れ方を工夫する。

その他 曲げ損失を誘起させるためにコイル形状に巻くのも1つの方法です。この方法は次の様な特長があります。

- ・ 簡単、効率が良い、信頼性がある、安価である。
- ・ コアの NA 値がコイルの直径を決めます。

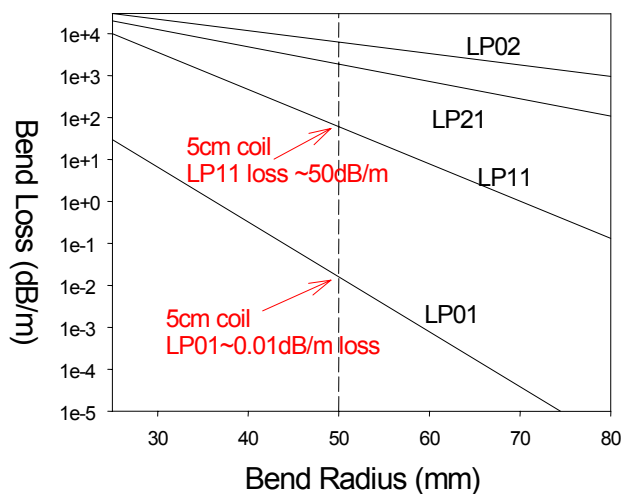
Nufernはこの手法でファイバーの設計とコイルの形状を最適化しています。



Nufern coil forms*

Nufernの優位性（6） LMA ファイバーにおけるモードフィルタリングより高いビーム品質

Bend Loss for 30um core, 0.06NA



Nufern の LMA ファイバーを用い、さらにモードフィルターリングによりシングルモードを得る手法をご紹介します。

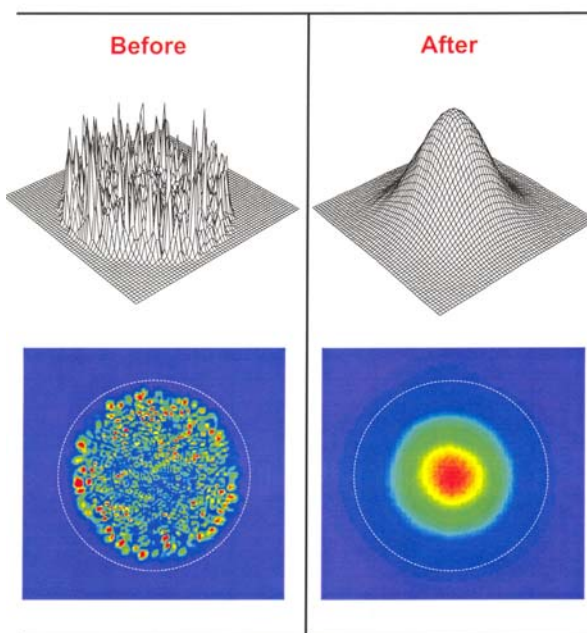
左図にコア径 30 μ m のファイバーをコイル化した時、種々の伝送モードにおけるの曲げ半径と曲げ損失の関係を示しています。曲げ損失が高次のモードにおけるレーザ発振を効果的に除去します。パルス発振や CW 発振に対する多くの論文で取り扱われていますが、基本モードにおける損失は殆どありません。LMA ファイバーを使用している Nufern のファイバーレーザモジュールはこの技術を用いて高品質な出力ビームを得ております。

右図にコア径 $25\mu\text{m}$ で NA が 0.1 の Yb ドープファイバーを用いたファイバー増幅器からの出力ビームのニアフィールド空間分布を示します。(増幅器には 1064nm の種光を入射しております。)

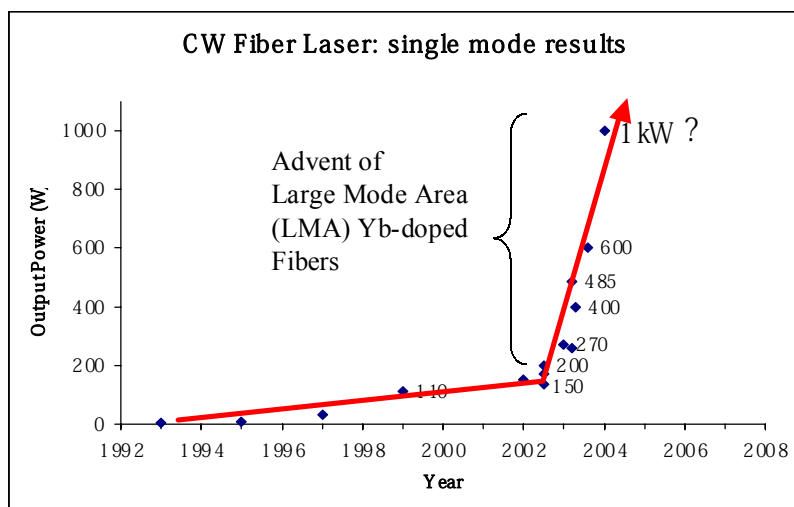
ファイバーを伸ばしたままでは約 27 個の導光モードが発生しましたが、コイル状に巻く事により $M^2=1.08/-0.03$ の非常にきれいな空間分布の出力となります。このことにより、ファイバー内で発生する非線形現象の SBS(誘導ブリルアン散乱) や SRS(誘導ラマン散乱) の発振閾値が増加します。また シングルモードファイバーを用いて出力 100W という最大のシングルモード出力を得られる従来の限界を破る事が出来ます。

下図に示します様に この手法を用いる事により、2002 年以降ファイバーレーザーの出力は飛躍的に増加致しました。

Mode-Filtered Amplifier



Courtesy of Sandia Labs./NRL,
Kleiner/ Koplou



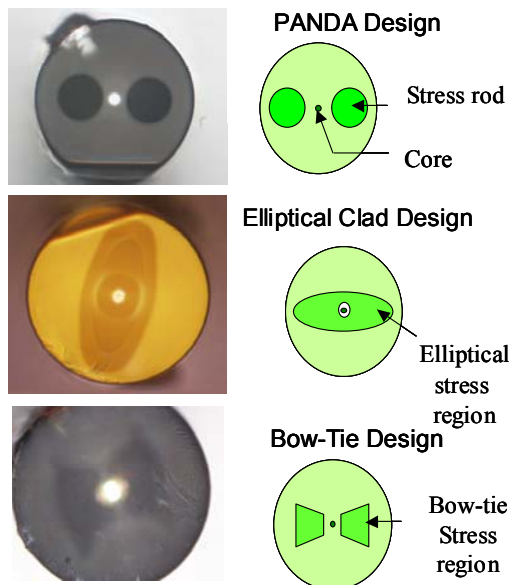
Nufern は $M^2 \sim 1$ で 1kW を越える出力を発生できる LMA ファイバーの開発においてはパイオニアです。

Nufern の優位性 (7) 直線偏光発振器/増幅器用の

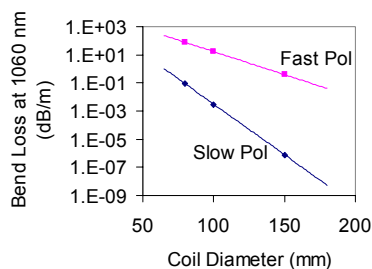
PANDA 型偏波面保持 LMA ファイバー

直線偏光出力のファイバーレーザ発振器/増幅器を作るには偏波面保持型のファイバーを用いる手法が有効です。ここではその偏波面保持型ファイバーについてご紹介致します。

偏波面を保持する為に必要な複屈折はストレスを発生させる構成物を使ってファイバー内に発生させます。右図に3つの手法で作った偏波面保持型ファイバーの例を示します。パンダ型ファイバー構成は他の手法より優れている事が証明されており、また Nufern の LMA ファイバーの中でも特長のあるファイバーです。高い均一性と一貫性は設計パラメータの正確な製造プロセス制御から得られています。

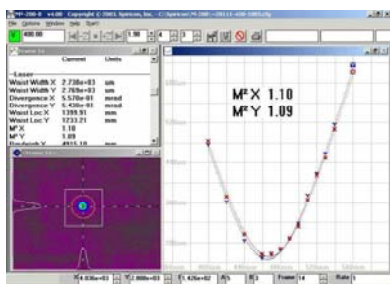


偏波面保持ファイバーをコイル状に巻く事により LMA ファイバーから直線偏光のレーザ出力が発生します。

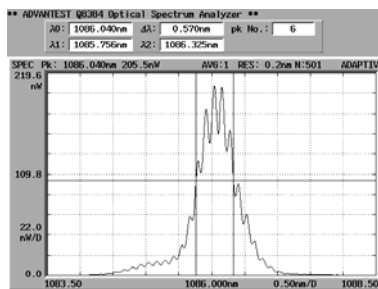


偏光に選択的な損失を発生させる為に偏波面保持ファイバーをコイル状に巻く技術の使用は Nufern 特有の手法です。偏光はファイバーを通して持続できます。(しかもこの手法はコストが掛かりません。) 他の手法はファイバー外の空間に偏光素子を配置する等の手法で追加の予算も必要になります。左図は種々の半径のコイルを用いた場合のファイバー内を通過する光の偏光成分に対する損失を示しています。

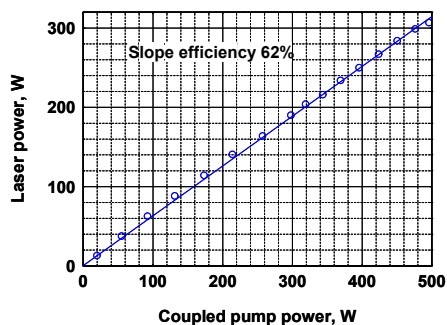
この手法で作られたファイバーレーザの出力特性を下の3つの図でご紹介します。偏光度 (PER:Polarization extinction ratio) は 19dB あります。この手法は特許出願中です。



$M^2 \sim 1$

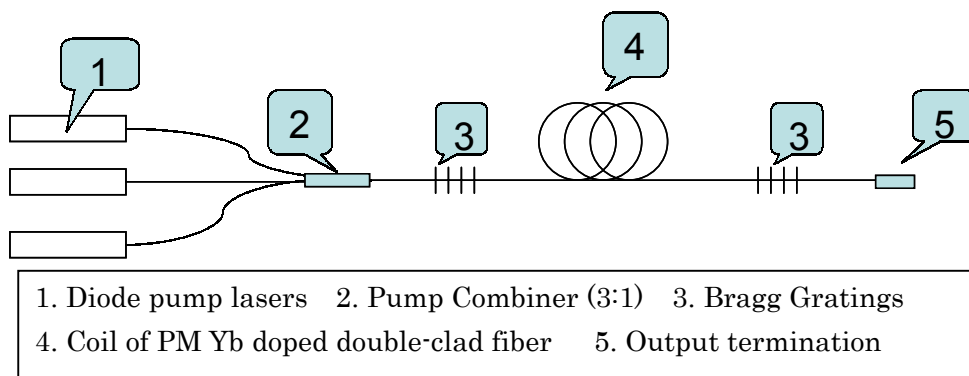


Linewidth ~ 0.5 nm



Nufern のファイバーレーザ発振器／増幅器の構成

下図はファイバーブラッググレーティング（FBG）を用いたファイバーレーザの構成例です。
この構成は 最近では CW200W 以上、パルス発振では 1.5mJ 以上で利用できます。



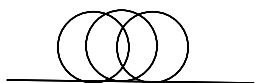
図では 1 は励起用レーザダイオード（LD）、2 は 3:1 の励起光コンバイナー、3 はファイバーブラッググレーティング（FBG）、4 は Yb ドープ DCF のアクティブファイバーであり直線偏光出力のファイバーレーザの場合は偏波面保持ダブルクラッドファイバー（DCF）が用いられます。5 は出力端であり、通常はファイバー端面を空気中の塵などにより生ずる損傷から守る為にエンドキャップを融着します。

上記ファイバーレーザの構成のバリエーションとして以下の様な素子を用いる事も出来ます。

- ・ 増幅器として用いる時は 励起光コンバイナーの 1 本のファイバーをフィードスルーのファイバーとし種光を導光する。
- ・ 励起光増加させる為に両方向励起も可能です。
- ・ 7:1 の励起光コンバイナーや 19:1 の励起光コンバイナーも使用できます。

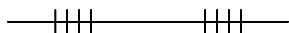
Nufern の優位性（8）ファイバーの互換性

Nufern はレーザゲインモジュールに用いる全てのファイバーを設計し、製造プロセスを制御し、そして生産しております。



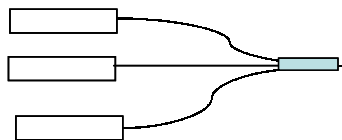
最適化されたコイル形状の

大きなモードエリアのダブルクラッドファイバー
（偏波面保持型、非偏波面保持型ファイバー）



適合性の良いフォトセンシティブファイバーが

ファイバーブラッググレーティング用として使用されます。

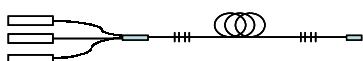


石英コアファイバーで添加物の入っていないダブルクラッド
ファイバーが励起光コンバイナーに用いられます。



ファイバー端の保護や研磨した

ビームデリバリーファイバーにも用いられています。



全てのキー部品について性能確認試験をしています。

Nufern は CW 発振ファイバーレーザーモジュールを供給致します。

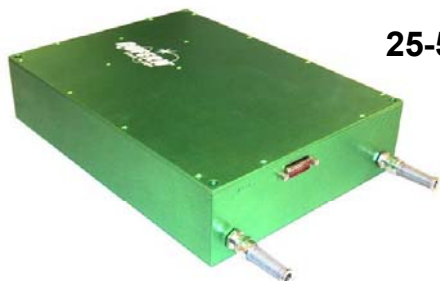
Nufern では Yb ドープ DCF を使い、1 ミクロン帯で発振する次の3つのタイプの CW 発振ファイバーレーザーモジュールを製造しており、OEM 等のお客様に供給を開始しております。このモジュールは次の様な特徴を備えております。



2-15 Watts



15-25 Watts

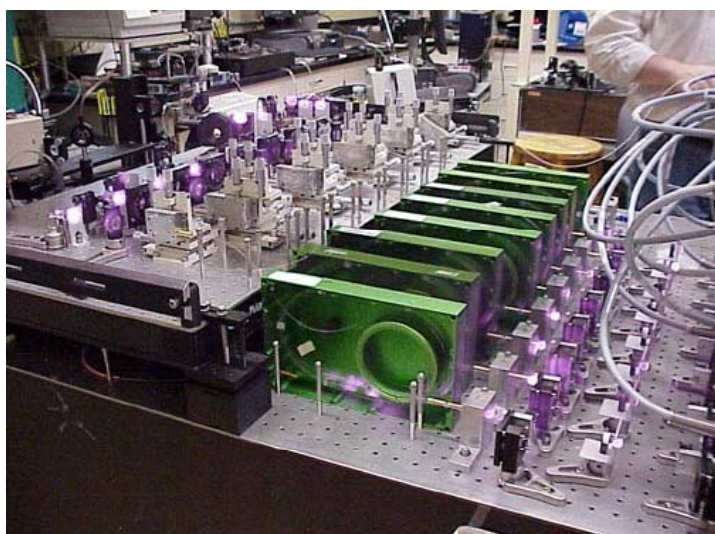


25-50 Watts

- 1 ミクロン帯発振で TEM00, M2 ~1 の出力ビームが得られます。
- 装置への組み込みが簡単です。
- 小型でメンテナンスフリーの OEM パッケージです。
- 光軸のアライメントが不要です。
- 共振器構成用の光学素子もありません。
- 壁コンセント効率が 30%以上と非常に効率が高いです。
- 光 (LD 出力パワー) 光 (ファイバーレーザー出力パワー) 変換効率が 70%以上と高い。
- 冷却の必要性が低い (もしくは要求される冷却が小さい)
- 他のレーザーに比べてメンテナンス時間が短い = ダウンタイムが少ない
- 出力ビーム品質が高い = より高い集光性とより深い焦点深度
- 高効率 = 励起用 LD の必要数が少ない。ユーティリティーの必要性も少ない。
- 915, 940 or 975 nm. の 3 波長の LD が励起用として利用可能です。

Nufern は 50W を越える高出力 CW ファイバーレーザーも供給致します。

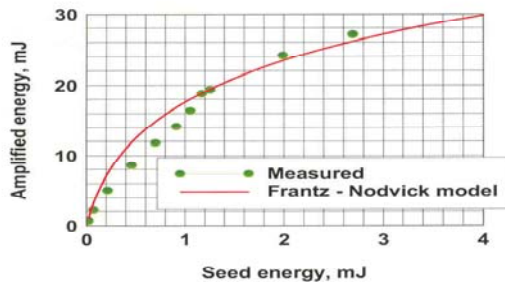
Nufern の 100WCW モジュールは HRL Lab. で コヒーレント結合 (加算) の実験で用いられています。



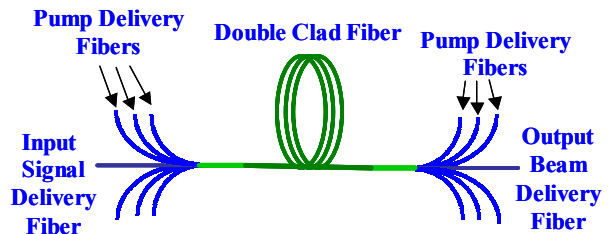
• **Courtesy of
Monica
Minden, HRL**

Nufern はファイバーレーザー増幅器も供給致します。

- Nufern のファイバーレーザー増幅器は 1064nm で 50ns のパルス幅において約 30mJ、ピーク出力 1 MW 以上のパルスを出力できます。(増幅試験結果を下図に示します。)
- 増幅器としては CW 発振にもパルス発振にも利用できます。
- ナノ秒、ピコ秒、フェムト秒などの高ピークパワー動作が可能です。
- 偏波面保持および被偏波面保持の両タイプファイバーを用いた増幅器が供給できます。
- 増幅器では単一および両方向励起のモジュールが利用できます。



Courtesy of Almantas Galvanauskas, U of Michigan



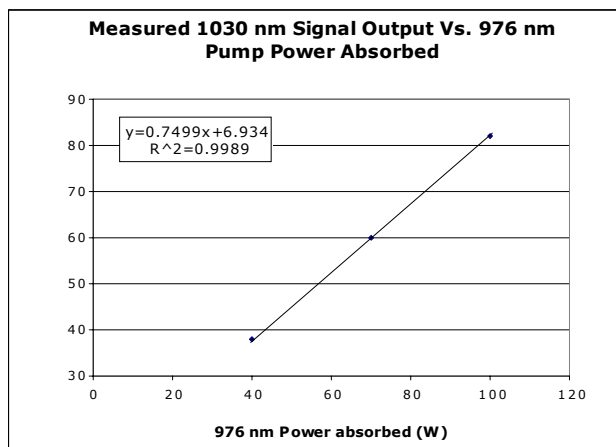
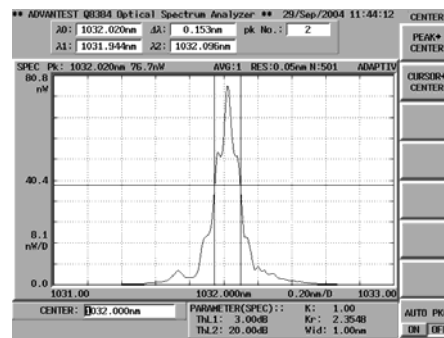
両方向励起ファイバーレーザー増幅器の例

Nufern はカスタム仕様の FBG を用いた高出力ファイバーレーザーを供給致します。

カスタム仕様のファイバーレーザーの例を以下に示します。

- 1030nm にて 121.5W 出力
- 励起光パワー177W
- 吸収されない励起パワーが 24.6W
- 発振波長が 1032nm
- 発振スペクトル幅が 0.15nm
- ノイズ成分 0.7%

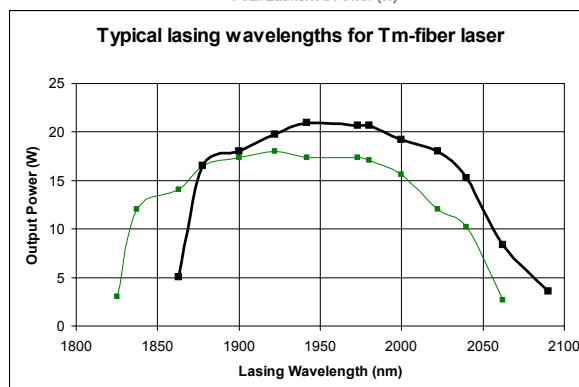
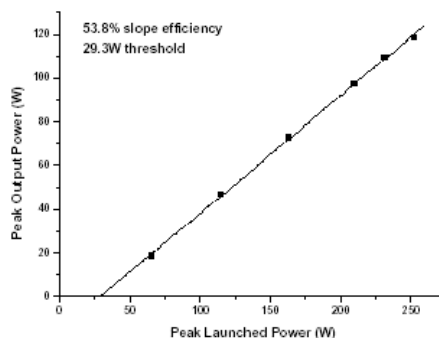
これらのファイバーレーザーの出力特性を3つの図に示します。



Nufern は 2 μm 発振の Tm ドープファイバーレーザ発振器・増幅器も供給致します。

Tm ファイバーレーザの特長は
以下のようなです。

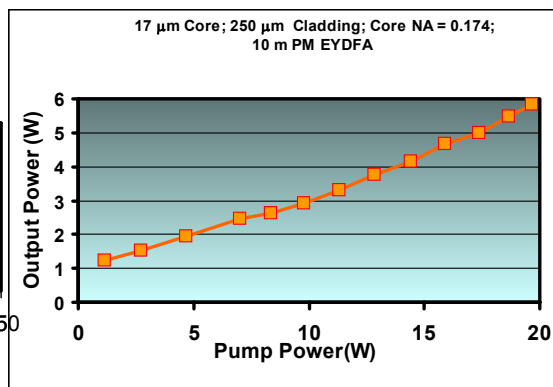
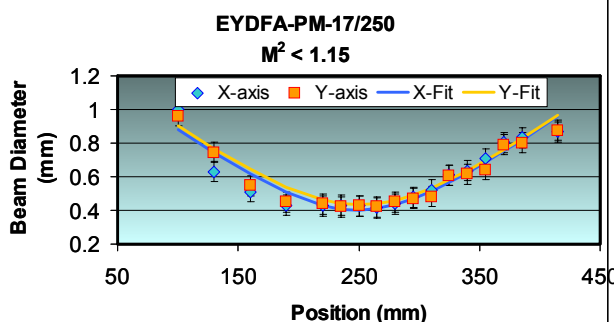
- SiO₂ 石英ガラスファイバーで
56%のスロープ効率
- 励起波長 793nm
- 発振波長 1093nm
- 発振波長域 1840~2080nm
- 出力 50W 以上



Nufern は 1550nm 発振の Er:Yb ドープファイバーレーザも供給致します。

Er:Yb ファイバーの特長は以下の様です。

- 最先端の偏波面保持 17/250 ファイバー
- 良いビーム品質
- 効率 30%以上
- 出力パワーは非飽和状態
もしくは 1050nm の ASE



(著作 : Dr.Andy Held/Nufern)

Nufern のファイバーレーザ用アクティブファイバーやファイバーレーザモジュール (サブアセンブリ) についてのカタログやデータシートは (株) オプトサイエンスのホームページからダウンロードできます。
<http://www.optoscience.com/maker/nufern/nufern.html>

御質問は電話 03-3356-1064 までご連絡いただくか、もしくは E メールにて info@optoscience.com へお問い合わせ下さい。



光技術をサポートする
株式会社オプトサイエンス
<http://www.optoscience.com>

東京本社 〒160-0014 東京都新宿区内藤町1番地 内藤町ビルディング
TEL:03(3356)1064 FAX:03(3356)3466 E-mail: info@optoscience.com
大阪支店 〒532-0011 大阪市淀川区西中島7-7-2 新大阪ビル西館
TEL:06(6305)2064 FAX:06(6305)1030 E-mail: osk@optoscience.com
名古屋営業所 〒450-0002 名古屋市中村区名駅2-37-21 東海ソフトビル
TEL:052(569)6064 FAX:052(569)8064 E-mail: ngo@optoscience.com