

10W級レーザーマーキング用ファイバレーザ

光電子技術研究所 谷川 庄二¹・田中 弘範¹・北林 和 大¹・齋藤 学¹
島田 典昭¹・中居 道弘¹・酒井 哲弥²
光機器・システム事業部 霜越 光太郎³・田谷 浩之⁴

10W Fiber Laser for Laser Marking Application

S. Tanigawa, H. Tanaka, T. Kitabayashi, M. Saito, N. Shimada, M. Nakai, T. Sakai,
K. Shimokoshi & H. Taya

Nd-YAGレーザと比較して微細加工化や小型化、高効率化に利点を持つファイバレーザは、次世代レーザ加工機用レーザ光源として期待されている。とりわけ、レーザーマーキングは、微細印字化の要求が高く、ファイバレーザの利点を生かしたアプリケーションである。

今回、当社では、当社独自構造の多孔石英管を用いたポンプコンバイナを搭載した10W級のパルス出力イッテルビウム添加ファイバレーザを開発したので報告する。これはビーム品質に優れ、レーザーマーキング加工用途を主ターゲットとしている。

Since fiber lasers are superior to Nd-YAG solid-state lasers in most characteristics such as dimensions, energy-efficiency and resolution for micromachining and so on, they are strong candidates for next generation laser sources for laser machining systems. Especially, there exists an obvious demand for fine marking in laser marking application. As a result, laser marking is a befitted application for effective use of the characteristics of fiber lasers.

In this paper, a newly developed fiber laser for laser marking application is reported. The fiber laser employs a unique pump-combiner consisting of a multi-hole silica tube and achieves an averaged output power of 10 W and high beam quality.

1. ま え が き

イッテルビウム (Yb) 添加ファイバ (以下 YbDF) を増幅媒体とするファイバレーザは、ファイバレーザのなかでは最も高出力であることに加え、加工用固体レーザ光源として現在多用されている Nd-YAGレーザと発振波長がほぼ同じ (約 1.06 μm) であるという特徴を持つ。YbDF ファイバレーザは、Nd-YAGレーザと比較して微細加工化や小型化、高効率化に有利であることから、Nd-YAGレーザにかわる次世代レーザ加工機用レーザ光源として期待されている¹⁾。

とりわけレーザ加工機のなかでも、半導体や金属、樹脂等の表面にレーザ光を用いて印字するレーザーマーカは、微細加工 (印字) 化の要求が高いため、ビーム品質が高くビームを細く絞りにくいファイバレーザの特徴を生かすには最適なアプリケーションである。

そこで、レーザーマーキング加工用途を主ターゲットとした10W級のパルス出力ファイバレーザを開発したので報告する。

2. ファイバレーザの原理とその特徴

ファイバレーザは、希土類添加ファイバを増幅媒体とするレーザである。

希土類添加ファイバでは希土類イオンの 4f-4f 準位間遷移の誘導放出を利用して増幅を行っている。希土類イオンの一つである Yb³⁺ は、1.0 μm 帯に ${}^4F_{5/2}$ - ${}^4F_{7/2}$ 遷移を持つ (図1)。Yb³⁺ の増幅過程は図1の2つの準位のみが係わる3準位系であり、吸収断面積の大きい波長900nmから980nm程度の励起光で上準位 (${}^4F_{5/2}$) に電子を励起し、誘導放出により放出断面積の大きい波長1,000nmから1,100nm程度で励起電子を基底準位 (${}^4F_{7/2}$) にエネルギーを放出させることで信号光を増幅・発振させる。YbDFの吸収・放出断面積を図2に示す。

Yb³⁺ はホストであるシリカガラスに高濃度で添加でき、アップコンバージョン等の発光阻害要因も少ないため、様々な希土類のなかでも最も高出力化が可能な元素であ

1 光電子技術研究所光技術研究部

2 光電子技術研究所光技術研究部グループ長

3 光機器・システム事業部光応用製品事業推進室

4 光機器・システム事業部光応用製品事業推進室主席部長

る．そのため，Yb 添加ファイバレーザは，様々なファイバレーザの中でも切断や溶接等の高出力を必要とする材料加工用途のレーザ光源に最も適している．また，YbDF ではエネルギー準位の関係から発振波長を Nd-YAG レーザと等しくできるため，Nd-YAG レーザでの知見や技術，部品等をファイバレーザに応用できるという利点も有している．

ファイバレーザおよび，Nd-YAG レーザ等の一般的な固体レーザの構成概念図を図 3 に示す．一般的な固体レーザではミラーを配置したスペース内に増幅媒体結晶を配置して共振器を構成している（図 3 (b)）．一方，ファイバレーザでは共振器はファイバおよびファイバ型部品のみで構成している（図 3 (a)）．そのためファイバレーザは光軸調整が原理的に不要で，共振器の耐候・耐埃性が高い．

さらに，ファイバ（およびファイバ型部品）は最大でも直径が数百 μm であり，所望の出力まで増幅するには数 m の長さを使用するため，Nd-YAG 等の固体レーザの増幅媒体である結晶ロッド（数 mm \times 数 cm 長）に比べて増幅媒体の比表面積が非常に大きいという特徴も有している．そのため，冷却効率が高く，冷却機構を簡素化できるので装置を小型化でき可搬性が高いほか，レーザ出力パワーの制限要因である熱レンズ効果²⁾の影響を実用上無視できるという利点もある．

また，ファイバレーザでは，共振器を構成するファイバ（およびファイバ型部品）をすべてシングルモードタイプとすることで，完全単一横モード（LP₀₁ モード）でレーザ発振することが可能である．発振モード数と，出力光をレンズでどこまで集光できるかをあわせてビーム品質（M²）とは密接な関係があり，完全な LP₀₁ 単一横モード発振のファイバレーザでは，ビーム品質の理論的限界である M²=1 の出力光を得ることができる．したがって，ファイバレーザは，究極の微細レーザ光源といえ，この点からも微細化の要求の高いレーザマーキングに最適である．

ほかにも，ファイバレーザは，励起光源としてレーザダイオード（LD）を使用しその結合効率も高いため，エネルギー使用効率が高いという利点も有している．一方で共振器（導光）断面積が小さいことからパワー密度が高く（このこと自体は加工の際の利点でもある），高密度光によ

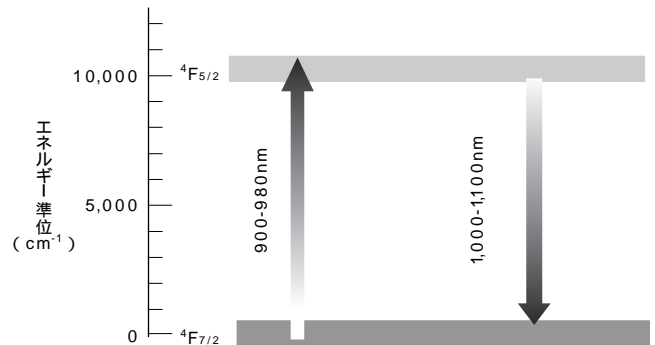


図 1 Yb³⁺ イオンのエネルギー準位図
Fig. 1. Energy level diagram of Yb³⁺.

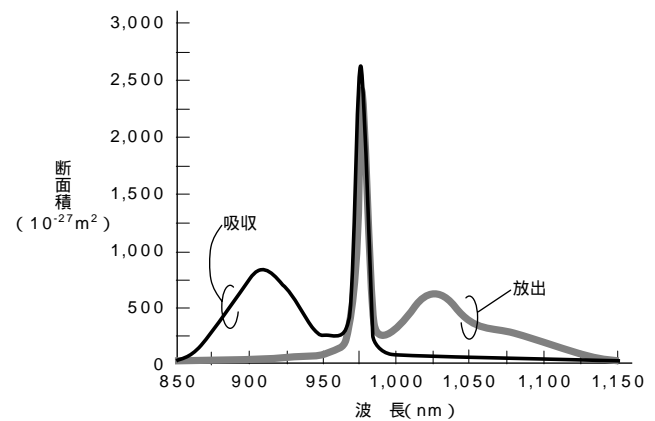


図 2 YbDF の吸収・放出断面積スペクトル
Fig. 2. Absorption and emission cross-section spectrum of YbDF.

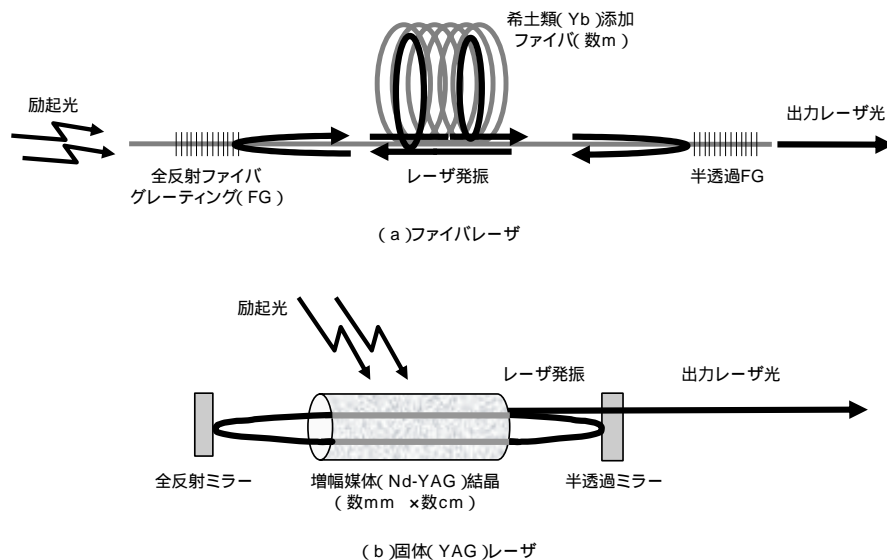


図 3 ファイバレーザと固体レーザの構成概念図
Fig.3. Schematics of (a) fiber laser and (b) solid-state laser.

りファイバ構成材料が破壊される可能性があり、10kWを越える大出力化に関しては技術的難易度が高い。

数十～数百Wクラスのファイバレーザと同クラスのNd-YAG固体レーザの比較を表1に示す。

3. 本ファイバレーザの構成

3.1. 全体構成

今回当社では、MOPA方式と呼ばれる構成を採用した。図4に試作したファイバレーザの構成図を示す。比較的低出力(1W以下)の種光を発生させるMaster Oscillator(MO)部、種光を所望のパワーにまで増幅するPower Amplifier(PA)部、種光および増幅用励起光をPA部に導入するポンプコンバイナ、およびワーク(マーキング対象物)からの反射光を除去するアイソレータ、およびこれらの制御やモニタを行う制御系からなる。

MO部は、図3(a)に示すような構成をしており、ここでレーザ発振させてレーザ光(種光)を発生させる。今回の試作では図3(a)の構成に加えて共振器内にQスイッチも配置することでパルス発振させている。マーキングにおいては加工しきいパワーを越える光のパワーが重要で、Qスイッチパルスは加工しきいパワーよりも高いエネルギーの光の割合が最も高くなることから、Qスイッチ方式を採用した。

PA部は、1W以下の種光から数十Wの励起光を使用して所望の10Wを超える出力を得るための増幅部であり、増幅媒体として後述のダブルクラッドYbDFで構成されている。また、励起光はポンプコンバイナをかいしてPA端部より入射されている。

3.2. ダブルクラッドYbDF(DC-YbDF)

PA部には、前述のとおり数十Wの励起光と10W以上のレーザ光が導波される。光ファイバの主成分であるシリカガラスは、物質のなかでは比較的高い100GW/cm²程度の光損傷しきい値を持つ。しかしながらファイバレーザでは光を導波する断面積が非常に狭いため、この損傷しきい値を意識したファイバ構造とする必要がある。そこで、今回当社ではPA部を構成するYbDFとしてクラッド構造を2層としたDC-YbDFを用いた。

DC-YbDFは、信号光の導光部に当たるコアと、励起光の導光部になるインナクラッド、励起光を閉じ込めるアウトクラッドおよび保護被覆からなる。DC-YbDFの構造を図5に示す。

本構造では、励起光を直径数百μmのインナクラッド内を導波させることで、励起光のパワー密度を下げ励起光に対する耐パワー性を高めている。さらに、信号光に対する光損傷回避のために、信号光が導波するコアの直径も約20μmと大きくして信号光のパワー密度を下けている。これらの構造を採用することにより、平均出力10Wクラス

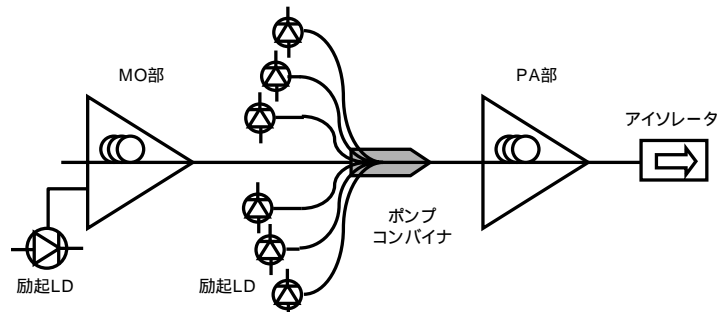


図4 試作ファイバレーザの構成
Fig. 4. Schematic diagram of designed 10W fiber laser.

表1 ファイバレーザと固体レーザの比較

Table 1. Comparison of fiber laser with solid-state (YAG) laser.

項目	ファイバレーザ	固体レーザ
増幅媒質	希土類添加ファイバ	結晶
冷却方法	空冷	水冷
装置サイズ	小	大
可搬性	高 光軸調整不要	低
耐候性	高 全固体部品	低 エアバス部を含む
ビーム品質 (M ²)	高(約1)	低(3~7程度)
共振器断面積	狭	広
パワー密度	高	低
耐パワー性	低	高
エネルギー利用効率	高(数十%)	低(数%)
メンテナンス容易性	容易	水冷系メンテナンス必要 光軸調整必要

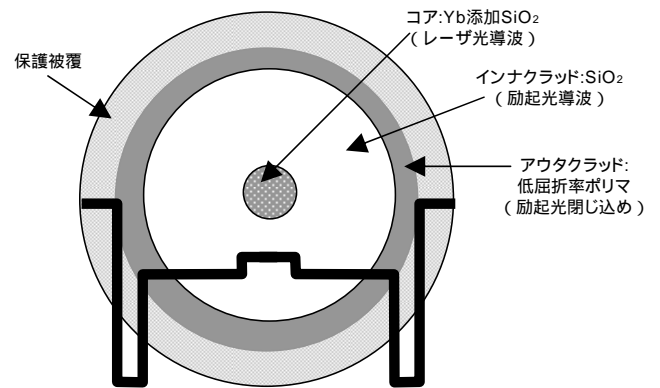


図5 DC-YbDFの断面構造と屈折率分布
Fig. 5. Cross-section structure and reflective index profile of DC-YbDF.

のパルス発振においてもファイバが破壊されることなくレーザー光を出力できる。

また、今回当社ではフォトダークニング^{3,4)}やスキューモード⁵⁾等によるレーザー出力低下を抑制できるDC-YbDFの材料および構造の設計もあわせて採用している。

3.3. ポンプコンバイナ

励起光をPA部に効率的に導入することは、ファイバレーザのエネルギー利用効率に大きく影響する。そのため、ポンプコンバイナはファイバレーザのキーデバイスの1つである。

今回の試作において、当社では、当社独自の構造である多孔石英管を用いたポンプコンバイナ⁶⁾を新たに開発し、本ファイバレーザに搭載した。

ポンプコンバイナの構造を図6に示す。多孔石英管は中心に設けた1個の空孔を取り囲む配置で9個の空孔が設けられている。中心の空孔には、コア径6 μ mクラッド径125 μ mのシングルモードファイバを配置し、これをMO部からの種光を導光する信号ポートとし、周囲に配置された9個の空孔には、コア径100 μ mクラッド径125 μ mのマルチモードファイバを配置して、種光を増幅するための励起光を導波する励起ポートとしている。ファイバを挿入した多孔石英管を加熱することで、石英管とファイバ間の空隙を収縮・溶融一体化している。多孔石英管を使用することにより、励起ポートの変形を抑制し、励起光挿入損失の低減をはかっている。

多孔石英管は、ファイバ外径が徐々に細くなっているブリッジファイバに溶融接続される。多孔石英管を通してブリッジファイバに入射された信号光はファイバ外径が小さくなるにつれてシングルモードを維持しつつモードフィールド径(MFD)を拡大しながら伝搬する。最終的にブリッジファイバを伝搬する信号光のMFDがDC-YbDFのそれとほぼ同程度となったところでDC-YbDFと溶融接続される。このように、MFDを伝搬方向に徐々にマッチングされることにより、ポンプコンバイナでの信号光の挿入損失の低減をはかっている。このようにして、信号光挿入損失2.1dB、励起光挿入損失0.18dBのポンプコンバイナを作製し、試作ファイバレーザに搭載した。

3.4. 制御系

レーザマーキングにおいては、微細印字化に加え、印字速度も重要な特性の一つである。今回試作したファイバレーザにおいては、毎分数百から数千字の高速印字に耐えるよう、レーザ出力光量を実質的に制御することになる励起LDの制御には、アナログ信号による外部からの直接制御方式を採用している。

また、ファイバレーザでは、内部温度の上昇や、ワークからの反射やファイバ断線等による反射光の増大、自己発振の発生等により、主として励起LDが故障することによって所望の出力を得られなくなる可能性が考えられる。そこで、本試作機には、内部温度や冷却ファン、反射光、種光出力、Qスイッチ動作(トリガ信号)等のモニタを搭載し、異常が検知された場合に自動的に出力を停止する

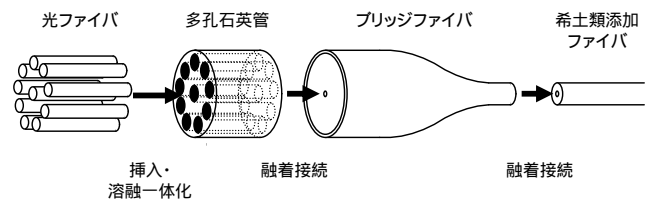


図6 ポンプコンバイナの構造
Fig. 6. Schematics of pump-combiner.



図7 試作ファイバレーザの外観
Fig. 7. Exterior view of developed fiber laser.

表2 試作したファイバレーザの特性一覧
Table 2. Characteristics of the developed fiber laser.

項目	特性
駆動電源	商用AC 100V
サイズ	W 260mm x D 345mm x H 140mm
質量	約9kg
冷却方式	ファン(空冷)
発振波長	1,065nm
発振スペクトル半値幅	3.9nm
繰り返し周波数	5kHz -100kHz可変
パルス幅	57ns @20kHz駆動時
パルスエネルギー	0.33mJ/pulse @20kHz駆動時
最大平均出力	14.4W @100kHz駆動時
最大ピーク出力	5.6kW @20kHz駆動時
ビーム品質 (M ²)	1.1
ビーム楕円度	1.2%
ウォールプラグ効率	6.8% @14W出力時(制御系・ファン等を含む)

フェールセーフ機能を具備した。なお、これらの各種異常や動作状況に関しては、外部からRS-232Cをかいしてモニタ可能となっている。これらは、ファイバレーザ光源としては当社独自の機能である。

4. 試作ファイバレーザの特性

表2に、試作したファイバレーザの特性一覧を示す。また、外観を図7に示す。

本ファイバレーザは、製品質量約9kg、外形寸法は空冷ファンを含め260mm x 345mm x 140mmで、一般的なNd:YAGレーザと比べて大幅に小型化されている。パルス出力の繰り返し周波数は5kHzから100kHzまで設定可能

である．本機の100kHz駆動時の最大平均出力は約14.4Wであった．20kHz, 10W出力時の出力時間波形を図8に示す．ピーク出力は5.6kW, パルス幅57nsで, ここから計算されるパルスエネルギーはおよそ0.33mJ/pulseであった．これらの特性は, ほぼ設計時の目標どおりであり, マーキングには十分な特性が得られていると考えている．また, ウォールプラグ効率(商用100V電源からのエネルギー変換効率)はQスイッチや制御系, 冷却ファンの駆動電力も含めて14W出力時で約6.8%であり, Nd-YAGレーザと比較し高いエネルギー効率が得られた．

図9に, 得られた出力ビームプロファイルを示す．ビーム形状はほぼガウス型を示しており, このビームプロファイルから計算した M^2 は1.1であった．したがって, ほぼ理想的な単一横モード出力を実現できていることが確認できた．なお, 楕円度は1.2%であり, 概ね真円のビーム形状であった．

今回得られた M^2 値とDC-YbDFのコア径から, 理論上の集光限界を計算により見積もったところ, 約15 μ m程度まで集光可能であるとの結果が得られた．市場で入手可

能な同程度のレーザ出力が可能なNd-YAGレーザの M^2 の典型値(3~7程度)と比較すると, 理論上は1/3~1/7程度微細な線を描画でき, それにともないマーキング密度は10~50倍ほども高くなる．

5.むすび

微細レーザーマーキング用光源に適した, 10W級ファイバレーザを開発した．MOPA方式ならびにQスイッチを採用し, また, 当社独自構造の多孔石英管を用いたポンプコンバイナを搭載することによって, 最大平均出力14.4W, ピーク出力5.6kW, パルス幅57nsの光出力を実現した．得られた出力光はほぼレーザの理論限界に近い $M^2 = 1.1$ のビーム品質を持ち, 従来のNd-YAGレーザと比較して数十倍ものマーキング密度を実現できるポテンシャルを持ったレーザ光源である．

また, 高速印字を可能とするアナログ直接制御方式を採用し, 多彩なフェールセーフ機能を具備しているため, 実用性の高いレーザーマーキング用レーザ光源である．

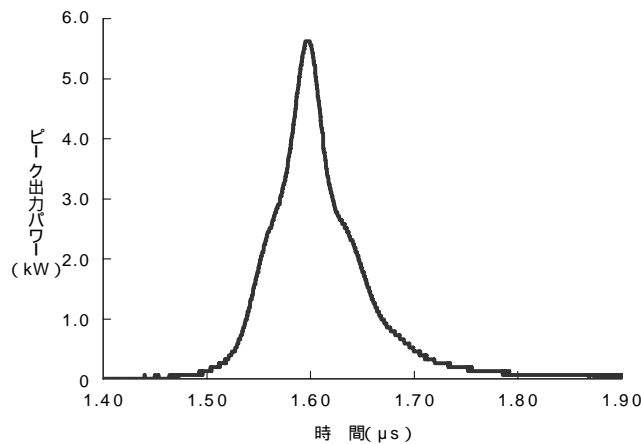
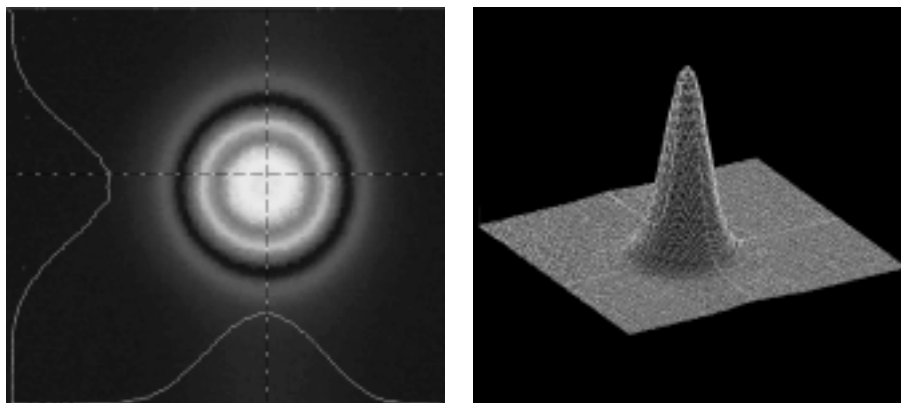


図8 試作ファイバレーザの出力パルス波形
Fig. 8. Pulse waveform of the output light of the fiber laser.



(a) 2次元表示 (b) 3次元表示

図9 試作ファイバレーザの出力ビームプロファイル
Fig. 9. Output beam profile of the fiber laser:
(a) 2-D image. (b) 3-D image.

参 考 文 献

- 1) 例えば, 宮本: ファイバーレーザとその応用, オプトロニクス, No.268, pp.125-130, 2004
- 2) W. Koechner: Solid-State Laser Engineering, Springer-Verlag, 4th edition, 1999
- 3) T. Kitabayashi, M. Ikeda, M. Nakai, T. Sakai, K. Himeno and K. Ohashi: Population Inversion Factor Dependence of Photodarkening of Yb-doped Fibers and its Suppression by Highly Aluminum Doping, Technical Digest of OFC/NFOEC2006, OThC5, 2006
- 4) 北林, 池田, 中居, 酒井, 姫野, 大橋: Yb添加光ファイバにおけるフォトダークニングの反転分布率依存性と高濃度Al添加によるフォトダークニングの抑制, 第26回レーザー学会年次大会, 10aV-2, 2006
- 5) M. Muendel: Optimal inner cladding shapes for double-clad fiber lasers, CLEO Technical Digest, p.209, 1996
- 6) 田中, 谷川, 中居, 酒井, 姫野: 多孔キャピラリを用いた設計自由度の高いポンプコンバイナ, 2006年信学総大, B-13-29