# 

## **REVIEW ARTICLE**

### 中赤外エルビウムファイバーレーザー

時田 茂樹<sup>1</sup>,村上 政直<sup>2</sup>,清水 政二<sup>2</sup>,橋田 昌樹<sup>1</sup>,阪部 周二<sup>1</sup>

<sup>1</sup>京都大学 化学研究所 <sup>2</sup>三星ダイヤモンド工業株式会社

(平成 24 年 6 月 5 日受理, 平成 24 年 6 月 22 日掲載決定)

### **Mid-infrared Erbium Fiber Lasers**

Shigeki Tokita<sup>1</sup>, Masanao Murakami<sup>2</sup>, Seiji Shimizu<sup>2</sup>, Masaki Hashida<sup>2</sup>, Shuji Sakabe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Chemical Research, Kyoto University <sup>2</sup>Mitsuboshi Diamond Industrial Co., Ltd.

(Received June 5, 2012, Accepted June 22, 2012)

#### 要旨

エルビウム (Er) 添加フッ化物ガラスファイバーレーザーは, 波長 2.7 µm 帯の高出力レーザー光源として実用化が期 待されている.本稿では,過去の研究報告に基づき,中赤外 Er ファイバーレーザーの技術概要をまとめ,開発段階の 最新ファイバーレーザー装置を紹介する.

キーワード:ファイバーレーザー、中赤外レーザー、波長可変レーザー

Abstract

Er-doped fluoride grass fiber lasers are expected to be put into practical use as a high-power laser source in the 2.7-µm band. This article provides a technical overview of the mid-infrared Er fiber lasers, and reviews several state-of-the-art fiber lasers.

Key words : fiber laser, mid-infrared laser, wavelength tunable laser

#### 1. はじめに

波長3 µm 帯の高出力レーザー光源は歯科や外科にお けるレーザー手術装置として利用価値が高い<sup>1)</sup>.これは 生体軟組織の60%を占める水の赤外光に対する吸収係 数が 3 μm 付近で極大となることに起因している(Fig.1). 現在、歯科に普及しているフラッシュランプ励起の波長 3 µm 帯 Er:YAG レーザーはパルス幅が数 100 µs、繰り 返し周波数が10~30 Hz 程度のパルスレーザーであり. 照射面での爆発的な水蒸気の発生を利用した硬組織の切 削等に用いられている.しかし,そのような低繰り返し のパルスレーザーを軟組織へ照射すると、組織の破壊等 の副作用を引き起こすことが知られている<sup>2)</sup>. したがっ て、用途に応じたパルス波または連続波(CW)の選択が 必要であるが、従来唯一の実用的な高出力 3 µm 帯レー ザー光源であった Er:YAG レーザーでは高い CW 出力を 得ることが困難である.そのため,3 μm 帯レーザー光 源は歯科以外では広く普及するに至っていない.

近年、Er<sup>3+</sup>イオンを添加したフッ化物ガラスを母材 とする光ファイバーを利用し、CW出力20Wを超える 2.7 μm 帯ファイバーレーザーが開発された<sup>3,4)</sup>. これら の装置では励起光源として半導体レーザーを、レーザ ー 増幅媒質として光ファイバーを用いるため、従来の Er:YAG レーザーと比べ小型・高効率・高出力化が可能 であり、将来的には100 W 以上の CW 出力の実現が期 待される. さらに、ファイバーレーザーでは CW 発振、 ロングパルス発振(準CW発振),ショートパルス発振 (Q スイッチ発振,モード同期発振), 2.7~2.9 μm におけ る波長可変レーザーといった多彩な動作形態が可能とな る. このような高出力 2.7 μm 帯 Er<sup>3+</sup> 添加ファイバー光 源は、医療のみならず産業分野においても新しいレーザ ー加工プロセスを実現する先端光源として期待される. 本稿では, Er<sup>3+</sup> 添加フッ化物ファイバーレーザーの特徴 および原理について述べ,筆者らが開発した高出力 CW レーザー,波長可変レーザー,及びQスイッチ発振レ ーザーを例に挙げ、中赤外ファイバーレーザーの高出力 化技術について解説する.



Fig.1 Optical attenuation in glass fibers, absorption coefficient of water, and emission wavelengths of fiber lasers and CO<sub>2</sub> laser.

159

### 2. Er 添加フッ化物ガラスファイバーレーザー

#### 2.1 フッ化物ガラスファイバーの特性

光ファイバーにおける光損失は不純物や欠陥のない純粋な材料においても存在し、材料固有の損失は次式で表される<sup>5)</sup>.

 $\alpha = A e^{\frac{a}{\lambda}} + B \frac{1}{\lambda^4} + C e^{-\frac{g}{\lambda}}$ 

ここで、*λ*は光波長であり*a*, *g*, *A*, *B*, *C*は材料固有 の定数である.右辺の第一項は紫外吸収端を表しており、 価電子帯から伝導帯への電子励起に起因する。第二項は レイリー散乱による損失を表しており、ガラスに本質的 に存在する分子スケールの密度・組成揺らぎに起因し, 光波長の4乗に逆比例する. 第三項は赤外吸収損失を表 しており、1つの光子の吸収により多数のフォノンが生 成される過程(マルチフォノン吸収)に起因する.一般に ガラス材料の損失スペクトルはレイリー散乱および赤外 吸収の損失曲線が交差する谷間付近(近赤外~中赤外域) で最小となる. 例えば、石英ガラスファイバーにおいて は波長1.55 µm で谷間が生じ、理論的に予測される最小 損失は約 0.2 dB/km (1 km 伝搬で 95.5% 透過) である.石 英ファイバーの製造技術は既に成熟しており、不純物の 混入を極限まで抑えた結果、理論限界に迫る低損失を実 現したファイバーが広く実用に供されている. しかしな がら、1100 cm<sup>-1</sup> 程度の高いフォノンエネルギーをもつ石 英系ガラスは赤外の透過限界波長が比較的小さく、例え ば、10mの石英ファイバーにおいて90%以上の透過率 が得られる波長範囲はおよそ 0.3 ~ 2 µm である (Fig. 1).

フッ化物ガラスは石英系ガラスより低いフォノンエネ ルギー (600 cm<sup>-1</sup> 程度) を有し、およそ 4 µm 以下の中赤 外域において高い透過率が得られる(Fig.1). しかしな がら、フッ化物ガラスは結晶化温度 Tx とガラス転移温 度 Tg の差 (Tx-Tg) が小さいため、製造時に結晶化が起こ りやすく、ファイバー化が一般に困難である. ZrF4系 フッ化物ガラスが 1975 年に発見され <sup>6)</sup>、その後様々な ZrF4 系フッ化物の混合が試された結果, 100℃近い Tx-Tg を有する ZrF4-BaF2-LaF3-AlF3-NaF ガラス (ZBLAN ガラス)が開発され、この材料を用いてフッ化物ファイ バーが実用化された. ZBLAN ガラスの理論最小損失は 波長2.5 μmにおいて0.01 dB/km(1 km 伝搬で 99.8% 透過) 以下と極めて小さく,研究レベルではそれに迫るファイ バーが実現されている<sup>7)</sup>. 今日でも ZBLAN ファイバー は赤外透過ファイバーとして代表的な存在であり、損失 が10~100 dB/km 程度のファイバーが市販されている.

ZBLAN ファイバーは本質的には石英ガラスより優れ た光学特性を有するが、化学的安定性、機械的強度、温 度特性は石英と比べ著しく劣っている.石英とZBLAN の各種特性の比較をTable1 に示す.高出力レーザーの 増幅・伝送を行う場合、最も問題となるのは低いガラス 転移温度である.CW レーザー光に対するガラス材料の 損傷は一般的に温度上昇により生じるため、耐熱温度は レーザー出力限界に直結する.また、ZBLAN ガラスは 潮解性を有しているため、長期間の性能維持のためには 大気への露出を避ける必要がある.

glasses <sup>8)</sup> .		
Glass property	Silica	ZBLAN
Transmission range, $\mu m (10 \text{ m length}, T > 90\%)$	0.3-2	0.3-4
Maximum phonon energy, cm <sup>-1</sup>	1100	600
Strain point or glass transition point, °C	1075	265
Specific heat, J/g·K	0.179	0.151
Thermal conductivity, W/m·K	1.38	0.628
Expansion coefficient, 10-6/K	0.55	17.2
Density, g/cm <sup>-3</sup>	2.20	4.33
Knoop hardness, kg/mm <sup>2</sup>	600	225
Fracture toughness, MPa·m <sup>1/2</sup>	0.72	0.32
Young's modulus, Gpa	70	58.3
Refractive index, at 0.589 µm	1.458	1.499
Abbe number	68	76
Zero material dispersion wavelength, µm	1.3	1.6
Nonlinear index, 10 <sup>-13</sup> esu	1	0.85
Thermo-optic coefficient, 10 <sup>-6</sup> /K	11.9	-14.75
Solubility in water, wt%	insoluble	29.2

Table1 Comparison of properties between silica and ZBLAN



Fig.2 Energy level diagram of Er<sup>3+</sup> ion in ZBLAN glass.

#### 2.2 Er 添加 ZBLAN ガラスのレーザー遷移

ZBLAN ガラスには種々の希土類フッ化物 (PrF<sub>3</sub>, NdF<sub>3</sub>, HoF<sub>3</sub>, ErF<sub>3</sub>, TmF<sub>3</sub>, YbF<sub>3</sub>等) を添加することができ, 3 価希土類イオンの内殻遷移を利用して様々な波長でレ ーザー利得を得ることができる. 3 µm 付近のレーザー 遷移としては, Er<sup>3+</sup>の<sup>4</sup>I<sub>112</sub> → <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> (2.7 µm 帯), Ho<sup>3+</sup>の <sup>5</sup>I<sub>6</sub> → <sup>5</sup>I<sub>7</sub> (2.9 µm 帯), Dy<sup>3+</sup>の<sup>6</sup>H<sub>13/2</sub> → <sup>6</sup>I<sub>15/2</sub> (2.9 µm 帯) 等が報告されている<sup>8)</sup>. この中で, Er<sup>3+</sup> は波長 0.975 µm 付近に幅広い励起波長帯を有するため, 高出力かつ信頼 性の高い InGaAs 系半導体レーザーにより直接励起が可 能である. このため, 高出力化に適している.

ZBLAN ガラスに添加された  $E^{3+}$  イオンのエネルギー 準位図を Fig.2 に示す. 0.655 µm, 0.79 µm, 0.975 µm の 何れかの波長で電子励起が生じ,  ${}^{4}I_{11/2} \rightarrow {}^{4}I_{13/2}$  (2.7 µm),  ${}^{4}I_{13/2} \rightarrow {}^{4}I_{15/2}$  (1.5 µm) の順に発光を伴う遷移により基底 状態へ緩和する. Er 添加フッ化物ファイバーを用いた 1.5 µm 帯の最初のレーザー発振は 1988 年に報告された が<sup>9)</sup>, この波長帯は安価で頑丈な Er 添加石英ファイバ ーでも得ることができるため, その後あまり注目されな かった. 一方で, 2.7 µm 帯のレーザー発振は同じ 1988 年にアルゴンイオンレーザー励起 (476.5 nm) による CW



Fig.3 Energy level diagram of  $\mathrm{Er}^{3+}$  ion and  $\mathrm{Pr}^{3+}$  ion in ZBLAN glass.



Fig.4 Energy level diagram of Er<sup>3+</sup> ions in ZBLAN glass showing the energy transfer upconversion processes.

発振が初めて実証された後<sup>10)</sup>,種々の改良が施されて きた.2.7 μm帯の遷移は,上準位 (<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>)の寿命が6.9 ms であるのに対し,下準位 (<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>)の寿命が9 msと上準位 より長いため,何らかの方法で下準位の占有率を下げな ければ CW 発振が得られない.最初の CW 発振<sup>10)</sup>では, 励起光の励起状態吸収 (ESA) により下準位の占有率が 減少したため CW 発振が得られたと説明されている.

その後の 1991 年に, Er/Pr 共添加ファイバーを用い, Er<sup>3+</sup>から Pr<sup>3+</sup>へのエネルギー移行を利用して下準位 (<sup>4</sup>I<sub>132</sub>)の占有率を下げることでレーザー利得を向上させ る方法が提案された<sup>11)</sup>. Fig.3 では, Er<sup>3+</sup>から Pr<sup>3+</sup>への エネルギー移行過程を ET1 及び ET2 の矢印によって表 している. ET1 により励起される Pr<sup>3+</sup> は速やかに基底 状態へ緩和するため, Er<sup>3+</sup>の下準位 (<sup>4</sup>I<sub>132</sub>)の占有率を効 果的に下げることができる.一方で ET2 は効率の低下を 招くが, ET1 と比べ遷移速度が小さいため, Pr3+添加濃 度の最適化より損失を最小限に抑えることができる.最 初の実験<sup>11)</sup>で得られた赤外光出力はわずか 13 mW で あったが, 8%の高い光-光変換効率が得られている. その後 Er/Pr 共添加ファイバーを用いたいくつもの実験 が行われ,現在までに最大で 2 W を超える出力<sup>12)</sup>と 25 %程度の光-光変換効率<sup>13)</sup>が別々に達成されている.

1999年には、Erのみの高濃度添加により Er-Er 間の エネルギー移行を利用する方法が提案された<sup>14)</sup>.この方 法では, 励起状態の Er<sup>3+</sup> イオンのエネルギーがもう一つ の励起状態の Er<sup>3+</sup> イオンへ移ることによる周波数上昇変 換を利用している. Fig.4 では、Er-Er 間のエネルギー移 行周波数上昇変換を ETU1 及び ETU2 の矢印によって表 している. Pr<sup>3+</sup>を共添加する方法と同様に、ETU1 によ る脱励起によって下準位 (<sup>4</sup>I13/2)の占有率が低下する.し かし、この方法の大きな特徴は、脱励起のエネルギー が 419/2 への周波数上昇変換により再利用されることであ る.<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> へ励起された Er<sup>3+</sup> は <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> へと無輻射緩和し、レ ーザー利得増加に寄与する. このエネルギー再利用によ り、Pr<sup>3+</sup>を共添加する方法よりも高い効率が得られるこ とが理論計算により示されている<sup>15)</sup>. 当初の実験<sup>14)</sup> に おいては、Er 濃度 2 mol.%の ZBLAN ファイバーを用い て 400 mW の出力と 13% の光-光変換効率が得られてい る. 現在では、Er 濃度 7 mol.% のファイバーを用いて 20 Wを超える出力と28%の光-光変換効率が同時に達成 されており<sup>16)</sup>,出力,効率ともに中赤外ファイバーレー ザーとして最も高い値が得られている.

その他に、 ${}^{4}I_{11/2} \rightarrow {}^{4}I_{13/2}$  (2.7 µm)、 ${}^{4}I_{13/2} \rightarrow {}^{4}I_{15/2}$  (1.5 µm)を同時にレーザー発振させるカスケード発振も報告 されている<sup>17)</sup>. 低濃度 Er 添加ファイバーを用い、1.5 µm の CW 発振を起こすことで ${}^{4}I_{13/2}$  の占有率が低下し、 2.7 µm の CW 発振を得ることができる. この方法の特 徴は、励起・レーザー放出に伴う熱発生を最小限とする ことができ、高出力化に有利であることである. 波長 0.975 µm で励起を行った場合、無輻射の電子遷移を伴わ ない励起・発光サイクルとなるため、原理的に他の方法 と比べ著しく熱発生を抑制できる. 現時点で達成されて いる 2.7 µm 出力は 8 W で、光一光変換効率 15%程度で あるが<sup>17)</sup>、今後の高出力化・高効率化が期待される.

# 高出力 Er 添加 ZBLAN ファイバーレーザーの開発 高出力 CW レーザー

先に述べたように、高濃度 Er 添加 ZBLAN ファイバ ーレーザーは高出力中赤外光源として有望である。1999 年に 400 mW<sup>14)</sup> であった CW 出力は、2007 年には 10 W 近くまで引き上げられたが<sup>18)</sup>、この時点では、高出力 化には成功したものの光出力が非常に不安定であるとい う問題があった。2009 年に筆者らは、フッ素系液体循 環冷却を採用した液体冷却 Er 添加 ZBLAN ファイバー レーザーを開発し、24 W の世界最高出力を達成すると ともに、高出力時においても安定した CW 出力を得る ことに成功した<sup>3)</sup>.本節ではその装置の概要を説明する.

液体冷却 Er 添加 ZBLAN ファイバーレーザーの概略 図を Fig.5 に示す.長さ 4.2 mのダブルクラッド Er 添加 ZBALN ファイバーを利得媒質として用いた.ファイバ ーは,直径 25  $\mu$ m, NA 0.12, ErF3 濃度 6 mol.%のマル チモードコア,直径 350  $\mu$ m, NA 0.51 の励起光導光のた めの D 型第一クラッド,および樹脂製の第二クラッド から成る.ファイバー全体をフッ素系液体 (3M 製 FC-40) に浸し,循環冷却により液体を 20℃に保つことでフ



Fig.5 Schematic of liquid-cooled Er-doped ZBLAN fiber laser <sup>3)</sup>.



Fig.6 CW output power as a function of incident pump power  $^{3)}$ .

ァイバーの放熱を行った.ファイバー端面を球面状に研 磨し、その先端を CaF2 製の窓板に押し当てることで、 ファイバー端面から出射するレーザー光が冷却液により 吸収されるのを防いでいる.励起光源として2台のファ イバー結合型半導体レーザー(LD1, LD2)を用いた.半 導体レーザーの出力光は、直径 200 μm, NA 0.22 のコア を持つ出力ファイバーから出射され、最大出力時の中 心波長は 975 nm である. 出力ファイバーから出射され た励起光は非球面レンズ、ダイクロイックミラー(0.975 μm 透過, 2.7 ~ 2.9 μm 反射), YAG 製の集光レンズ, CaF2 窓を通って ZBLAN ファイバーの第一クラッドへ 入射される. LD1 および LD2 の CaF2 窓後の最大光出力 はそれぞれ 89 W. 77 W であった. ZBLAN ファイバー のコアから出力される中赤外光は、LD2 側のファイバ ー端では垂直(入射角0°)に置かれたダイクロイックミ ラー(反射率>99%)によって再びファイバーへ戻され、 LD1 側のファイバー端では斜め(入射角 15°) に置かれた ダイクロイックミラーによってレーザー出力として取り 出される. これにより、LD2 側のダイクロイックミラ ーと LD1 側のファイバー端の間で光共振器が構成され、 レーザー発振が得られる.

励起光入力に対するレーザー出力の変化を Fig.6 に示 す. LD1 のみの励起によって最大で 14 W の出力が得ら れ, LD1 および LD2 の励起により最大で 24 W の出力 が得られた. この時の総励起入力は 166 W であるため,



Fig.7 CW output power during 5 min of operation at 166 W of pump power <sup>3)</sup>.



Fig.8 Schematic of the wavelength-tunable Er-doped ZBALN fiber laser <sup>19</sup>.

光-光変換効率は 14.5% である. 温度上昇によるファイ バーへの損傷は確認されなかったため, 励起入力を増大 させることで更なるレーザー出力の増大が期待できる. 5 分間の出力変動を Fig.7 に示す. 半導体レーザーの冷 却水の温度変化に起因するわずかな出力変動が見られる が, Zhu らの実験<sup>18)</sup> で見られたような大きな変動は生 じなかった.

以上の結果から、フッ素系液体による強制冷却はフッ 化物ファイバーの冷却に有効であることが示された.液 体冷却により出力変動が抑えられたことから、Zhuらが 観測した高出力動作時の出力変動はファイバーの温度上 昇に起因することが示唆される.本実験では、最大出力 は励起レーザーの出力により制限された.したがって、 励起レーザーの増強により更なる高出力化が期待される.

#### 3.2 波長可変レーザー

Er 添加 ZBLAN ガラスはおよそ 2.7 ~ 2.9 µm の波長 範囲で利得が得られるため、幅広い波長範囲にわたって 連続的に波長同調が可能である.ここでは、筆者らが開 発した最大 CW 出力 11 W の波長可変ファイバーレーザ - <sup>19)</sup>の概要を説明する.

波長可変 Er 添加 ZBLAN ファイバーレーザーの概略 図を Fig.8 に示す. 長さ 3.8 m のダブルクラッド Er 添加 ZBALN ファイバーを利得媒質として用いた. 前節と同



Fig.9 Tuning curves of the cw Er-doped ZBLAN fiber laser for different pump-power levels <sup>19</sup>.

様に、ファイバーは、直径 25 µm, NA 0.12、ErF3 濃度 6 mol.% のマルチモードコア,直径 350 µm, NA 0.51 の 励起光導光のためのD型第一クラッド、および樹脂製 の第二クラッドから成る.本装置では前節のような液体 冷却を採用せず、固体ヒートシンクへの熱伝導のみを利 用した信頼性の高い構造により十分なファイバーの冷却 を実現した. 渦巻き状に巻いたファイバーを2枚のアル ミ板の間に挟み込むことでファイバー側面から熱を逃が すとともに、ファイバー端面にサファイア板を押し当て ることで特に熱損傷の生じ易いファイバー端の冷却を 行っている。また、空気中の水蒸気に起因するファイ バー端面の劣化を防ぐため、レーザー共振器の一部を 乾燥窒素で満たされた密閉容器内に配置している。前節 と同型のファイバー結合型半導体レーザー1台を励起光 源として用いた.出力ファイバー端における最大出力は 93 W である。出力ファイバーから出射された励起光は非 球面レンズ,ダイクロイックミラー (0.975 µm 透過,2.7 ~ 2.9 µm 反射), YAG 製の集光レンズ, サファイア板を 通って ZBLAN ファイバーの第一クラッドへ入射される. ZBLAN ファイバーのコアから出力される中赤外光は、励 起光入力側のファイバー端ではダイクロイックミラー (入 射角 45°) によってレーザー出力として取り出され、反対 側のファイバー端では金コート回折格子(溝密度 600 本/ mm) により特定の波長のみがファイバーへ戻される. こ れにより、回折格子と励起光入力側のファイバー端の間 でリトロー型の光共振器が構成され、回折格子の角度に 応じた任意の波長でレーザー発振が得られる.

5 W ~ 93 W の励起入力における波長同調特性を Fig. 9 に示す.励起入力 5 W の場合には波長同調範囲はおよ そ 2710 ~ 2840 nm であったが,励起入力を増大させる につれ同調範囲は長波長側へ移動し,励起入力 93 W で は 2770 ~ 2880 nm であった.レーザー波長が 2817 nm のとき,11 W の最大出力が得られた.また,出力光の 典型的なスペクトル線幅は 1 nm 以下 (分光装置の測定 限界以下)であった.レーザー出力は非常に安定してお り,60 分間の出力変動は 0.13% rms であった.本実験 では温度安定度の高い冷却水循環装置を用いたため,前



Fig.10 Schematic of Q-switched Er-doped ZBLAN fiber laser <sup>21</sup>).

節の実験より高い安定度が得られた.

以上の結果から,高出力 Er 添加 ZBLAN ファイバー レーザーが幅広い波長同調範囲を有することが実証され た.注目すべきは最大で 2880 nm の長波長において発振 が得られたことである.この結果はこれまでに他の研究 グループで得られた最大波長 2830 nm<sup>20)</sup>を大幅に上回 っており,全体の波長同調範囲は 170 nm まで拡大した. また,高度なファイバー冷却技術により,液体直接冷却 を用いずとも 100 W 級の励起入力が可能であることが 実証された.

#### 3.3 Q スイッチパルスレーザー

ナノ秒パルスレーザーによる微細レーザー加工は広く 産業用途で利用されており、その有用性が認知されてい る. CW レーザーが"溶融"や"燃焼"を引き起こすの に対し、短パルスレーザーでは局所的かつ爆発的な"蒸 発"や"昇華"を引き起こすことができるため、除去加 工に適している. 医療の分野においてもレーシックをは じめとする応用例がある. Er 添加 ZBLAN ファイバー レーザーは、共振器のQ値を急速に変化させるQスイ ッチを行うことで容易にパルス発振させることができ, 高いピーク出力を得ることができる. 本節では、筆者 らが開発したピーク出力 0.9 kW のQスイッチEr 添加 ZBLAN ファイバーレーザー<sup>21)</sup>の概要を説明する.

Qスイッチ Er 添加 ZBLAN ファイバーレーザーの概略 図を Fig.10 に示す.長さ 2.1 mのダブルクラッド Er 添加 ZBALN ファイバーを利得媒質として用いた.ファイバー は、直径 35 µm, NA 0.12, ErF3 濃度 6 mol.% のマルチモ ードコア,直径 350 µm, NA 0.5 の励起光導光のための D 型第一クラッド,および樹脂製の第二クラッドから成る. 本装置においても前節と同様のファイバー冷却方法を採 用している.また,励起レーザー及び励起光導入方法に ついても前節と同様である.光共振器の Q 値を高速に変 化させるため,共振器内に音響光学変調器 (AOM)を挿 入した.この AOM は,印加する高周波 (81 MHz)の変 調 (ON/OFF) により,光透過率をおよそ 50% から 98% へ 変化させることができ,透過率の変化にかかる時間は約 100 ns ある.高周波印加時には共振器内の損失増加によ りレーザー発振が停止するが,高周波の印加を止めるこ



Fig.11 Typical output pulse waveform of the Q-switched fiber laser at a repetition rate of 120 kHz <sup>21)</sup>.



Fig.12 Average power, pulse duration, and pulse energy as a function of repetition rate <sup>21</sup>.

とでレーザー発振が開始し、ファイバーに蓄えられたエ ネルギーが一気に放出されることによりジャイアントパ ルスが出力される.この蓄積・放出を一定周期で繰り返 すことで繰り返しパルス発振が得られる.

AOM の変調周波数を変化させ出力パルス波形を計測 した結果、変調周波数が120 kHz ~ 300 kHz の範囲で AOM の変調に同期した Q スイッチ発振が得られた.繰 り返し周波数が120 kHz のときの出力光パルス波形を Fig.11 に示す. パルス幅はパルス毎におよそ 80~100 nsの間で変動し、平均的なパルス幅は約90 ns であった. このときの平均出力は 12.4 W であったため、1パルス 当たりのエネルギーは 103 µJ と算出される.また、パ ルス波形からピーク出力は約0.9 kW と算出される. 繰 り返し周波数 120 kHz ~ 300 kHz における平均出力,パ ルスエネルギー,パルス幅を Fig.12 に示す.繰り返し 周波数の増大とともにパルスエネルギーは減少し、パル ス幅は増大するため、高繰り返し動作時のピーク出力は 著しく減少する。300 kHz におけるパルスエネルギーは 43 µJ, パルス幅は 230 ns, ピーク出力は 150 W であった. より高いピーク出力を得るには繰り返し周波数を更に小 さくすればよいが、本実験においては AOM の変調深さ が約 50% と小さかったため、120 kHz 以下では Q スイ ッチング前に発振が生じることによるダブルパルス発振 が生じ、ピーク出力が制限された.

以上の結果から、Qスイッチ Er 添加 ZBLAN ファイ バーレーザーによって1 kW 級の高ピーク出力と10 W 以上の高平均出力の両立が可能であることが実証され た.平均出力は先行研究の2 W<sup>22)</sup>から大幅に引き上げ られた.本実験において最大ピーク出力は励起レーザー の限界出力および AOM の変調深さにより制限された. 今後の改良で更なるピーク出力の増大が期待できる.

#### 4. おわりに

次世代の医療用 3 µm レーザー光源として最も有望な Er 添加 ZBLAN ファイバーレーザーについて解説した. ここ 10 年程で急速に技術進展した波長 1~2 µm の希土 類添加石英ファイバーレーザーは小型, 堅牢, 低消費電 力,高信頼性,高平均出力,高ビーム品質を特徴とし, 現在、従来型の固体レーザーを駆逐して急速に普及して いる.しかしながら、波長に対する要求の強い医療分野 においては、希土類添加石英ファイバーレーザーの入り 込める用途はかなり限定されるであろう. 石英ファイバ ーを用いる以上,およそ2 µm の透過限界の壁が存在す るためである.フッ化物ファイバーレーザーではおよそ 4 µm までの中赤外光の発生が潜在的に可能であり、現 在の Er:YAG レーザー, CO2 レーザー, 光パラメトリッ ク波長変換器等からの置き換えや、高ピークパワー・高 繰り返しパルスの特徴を利用した新しい治療法を可能に することが期待される. 今後の中赤外ファイバーレーザ ー技術の進展に期待したい.

#### 参考文献

- J.-L. Boulnois: Photophysical processes in recent medical laser dvelopments: a review. Lasers Med. Sci., 1: 47-66, 1986.
- 2) 荒井恒憲,住吉哲実,関田仁:切開・止血機能を連続的 に変化できるレーザー手術装置 Ho3+:ZBLANファイバ ーレーザーを用いたレーザー手術装置の開発. O pulse E, 21: 1291-1297, 1999.
- S. Tokita, M. Murakami, S. Shimizu, M. Hashida, S. Sakabe: Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser. Opt. Lett., 34: 3062-3064, 2009.
- 4) D. Faucher, M. Bernier, G. Androz, N. Caron, R. Vallée: 20 W passively cooled single-mode all-fiber laser at 2.8 μm. Opt. Lett., 36: 1104-1106, 2011.
- 5) C. R. Day, P. W. France, S. F. Carter, M. W. Moore, J. R. Williams: Fluoride fibres for optical transmission. Opt. Quantum Electron., 22: 259-277, 1990.
- 6) M. Poulain, M. Poulain, J. Lucas: Verres fluores au tetrafluorure de zirconium proprietes optiques d'un verre dope au Nd<sup>3+</sup>. Mater. Res. Bull., 10: 243-246, 1975.
- K. Itoh, K. Miura, I. Masuda, M. Iwakura, T. Yamashita: Low-loss fluorozirco-aluminate glass fiber. J. Non-Crystalline Solids, 167: 112-116, 1994.
- X. Zhu, N. Peyghambarian: High-power zblan glass fiber lasers: Review and prospect. Adv. Opto. Electron., 2010: 501956, 2010.
- M. C. Brierley, P. W. France, M. W. Moore, S. T. Davey: Rareearth-doped fluorozirconate fiber lasers. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Anaheim, Calif, USA, 1988, V7, TUM29.

- M. C. Brierley, P. W. France: Continuous wave lasing at 2.7 μm in an erbium-doped fluorozirconate fiber. Electron. Lett., 24: 935-937, 1988.
- J. Y. Allain, M. Monerie, H. Poigant: Energy transfer in Er<sup>3+</sup>/ Pr<sup>3+</sup>-doped fluoride glass fibres and application to lasing at 2.7 μm. Electron. Lett., 27: 445-447, 1991.
- 12) X. Zhu, R. Jain: Watt-level Er-doped and Er-Pr-codoped ZBLAN fiber amplifiers at the 2.7-2.8 μm wavelength range. Opt. Lett., 33: 1578-1580, 2008.
- S. D. Jackson, T. A. King, M. Pollnau: Efficient high power operation of erbium 3 μm fibre laser diode-pumped at 975 nm. Electron. Lett., 36: 223-224, 2000.
- 14) B. Srinivasan, E. Poppe, J. Tafoya, R. K. Jain: High-power (400 mW) diode-pumped 2.7 μm Er:ZBLAN fibre lasers using enhanced Er-Er cross-relaxation processes. Electron. Lett., 35: 1338-1340, 1999.
- M. Pollnau, S. D. Jackson: Energy recycling versus lifetime quenching in erbium-doped 3-μm fiber lasers. IEEE Quantum Electron., 38: 162-169, 2002.
- 16) D. Faucher, M. Bernier, G. Androz, N. Caron, R. Vallée: 20 W passively cooled single-mode all-fiber laser at 2.8 μm. Opt. Lett., 36: 1104-1106, 2011.
- 17) S. D. Jackson, M. Pollnau, J. Li: Diode pumped erbium cascade fiber lasers. IEEE Quantum Electron., 47: 471-478, 2011.
- 18) X. Zhu, R. Jain: 10-W-level diode-pumped compact 2.78 μm ZBLAN fiber laser. Opt Lett, 32: 26-28, 2007.
- 19) S. Tokita, M. Hirokane, M. Murakami, S. Shimizu, M. Hashida, S. Sakabe: Stable 10 W Er:ZBLAN fiber laser operating at 2.71-2.88 μm. Opt. Lett., 35: 3943-3945, 2010.
- 20) X. Zhu, R. Jain: Compact 2 W wavelength-tunable Er:ZBLAN mid-infrared fiber laser. Opt. Lett., 32: 2381-2383, 2007.
- S. Tokita, M. Murakami, S. Shimizu, M. Hashida, S. Sakabe: 12W Q-switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8 μm. Opt. Lett., 36: 2812-2814, 2011.
- 22) M. Gorjan, R. Petkovšek, M. Marinček, M. Čopič: High-power pulsed diode-pumped Er:ZBLAN fiber laser. Opt. Lett., 36: 1923-1925, 2011.

#### 著者紹介



時田 茂樹 (Shigeki Tokita) 2006 年,大阪大学大学院工学研究科博

士後期課程 修了,博士(工学).同年, 日本学術振興会 特別研究員(大阪大学レ ーザーエネルギー学研究センター所属), 12月より京都大学化学研究所 助手(2007 年より助教へ改名).専門分野:レーザ

ー工学,プラズマ物理学.所属学会:応用物理学会,日本物理学会,レーザー学会,プラズマ・核融合学会.



橋田 昌樹 (Masaki Hashida) 1996年,大阪大学大学院工学研究科博 士後期課程 修了,博士(工学).同年, (財)レーザー技術総合研究所研究員. 19992000年,フランス・サクレー原子 力研究所研究員.2003年5月,京都大 学化学研究所 助手を経て,2006年より

同 助教授(2007年より准教授へ改名).原子分子衝突物 理,レーザー同位体分離,半導体励起固体レーザー開発, 極短パルスレーザー開発とその応用に関する研究に従事. レーザー学会進歩賞 受賞.



阪部 周二 (Shuji Sakabe)

1978年,大阪大学工学部電気工学科卒業.1980年,同大学院修士課程電気工 学専攻修了.1982年,大阪大学レー ザー核融合研究センター助手.工学博 士.1985年,西ドイツマックスプランク 量子光学研究所研究員.1989年,大阪

大学大学院工学研究科 助手, 1996年, 同 助教授を経て, 2003年より京都大学 教授(化学研究所先端ビームナノ科 学センター). この間, 1997~1998年, 文部省核融合科 学研究所 客員助教授, 2002年, ウイーン工科大学客員 教授, 2007年より光産業創成大学院大学 客員教授. レー ザープラズマ物理, X 線駆動爆縮核融合の研究, 核融合 用大出力レーザー装置の建設, レーザー同位体分離原子 衝突物理(特に電荷移行衝突断面積の測定とデータベース の編纂)などに従事後, 現在は高強度極短パルスレーザー と物質との相互作用の物理とその応用の研究に従事. レ ーザー学会, 日本物理学会, 応用物理学会, プラズマ核 融合学会各会員. レーザー学会 理事, 同 関西支部長.