

氏名（本籍）	山崎 祐（岡山県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 243 号
学位授与の日付	令和 3 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	シリカガラスファイバーを用いた GHz 高繰り返し発振レーザーの開発
論文審査委員	(主査) 教授 藤本 靖 (副査) 教授 陶 良 教授 小田 昭紀 教授 水津 光司 教授 長瀬 亮 東京大学物性研究所 教授 小林 洋平

学位論文の要旨

シリカガラスファイバーを用いた GHz 高繰り返し発振レーザーの開発

本論文は、著者が千葉工業大学大学院工学研究科工学専攻博士後期課程に行った、シリカガラスファイバーを用いた GHz 高繰り返し発振レーザーの開発についてまとめたものである。

光産業の中で、近年ファイバーレーザーの成長が著しい。OITDA（一般財団法人光産業技術振興協会）の 2019 年報告によると、ファイバーレーザーの国内出荷総額はこの数年、年率 10~20% 程度で成長し、2018 年度には 754 億円（前年度比 +19.6%）に達している。これはファイバーレーザーが共振器に導波路の光ファイバーを用いており、発振効率が高い点、レーザー発振に複雑な光学調整が不要である点など、他のレーザーより優れた特長を有しているからである。その用途は、レーザー加工や各種計測用の光源としての利用などがあげられる。ファイバーレーザーの応用用途を広げるべく、これまで、発振波長の多様化、高出力化、パルス発振化が精力的に研究されてきた。最近では、パルス発振の繰り返し周波数 f を GHz 以上、時間間隔で 1 ナノ秒以下にした、高繰り返しファイバーレーザーに関する研究も盛んに行われている。特に、数 GHz の高繰り返しパルス列を用いた加工が、通常の数 10 kHz のパルス列による加工と比較して、加工効率が高いことが 2016 年に Nature へ掲載されて以降、学界に限らず産業界においても高繰り返しファイバーレーザーの開発が活発になっている。

GHz の高繰り返しを得る方法ではこれまでに、①導波路を用いた周波数の重畳化：数 MHz のパルスから高次の繰り返し周波数のパルス列を得る方法、②短尺共振器による高繰り返し化：希土類イオンを高濃度（1.0 wt. %）添加したファイバーを用いて長さ約 100 mm の共振器を構成し、直

接数 GHz のパルス列を得る方法 が提案されている。①導波路による重畳化では、ファイバーを用いた導波路を工夫する必要があり、装置は複雑化する傾向にある。一方、②の短尺共振器は、共振器が単純な構成であるため、2010 年ごろから盛んに研究されている。希土類イオンの高濃度添加とその分散性の確保から、リン酸ガラスやフッ化物ガラスなどイオン結合性の素材を用いたファイバー作製例が多いが、これらの素材は耐水性が低く実用には向いていなかった。シリカガラスファイバーによる短尺共振器レーザーで GHz の高繰り返しを実現できれば、レーザー加工がより普及する可能性を秘めている。

ゼオライト法は、シリカガラスへ希土類イオンの高濃度添加を簡便に実現できる手法である。本研究では、ゼオライト法によりシリカファイバーを作製し、高繰り返しパルスレーザーの実現を目指した。希土類イオンの中でも、Nd³⁺イオンは 4 準位系のレーザー発振を実現できることから、そのレーザー発振閾値は低い。このため、可飽和吸収体を用いたモード同期の実現も、3 準位系の Yb³⁺、Er³⁺と比較してより低出力なレーザーで実現できる可能性が高く、熱に弱い可飽和吸収体にとって非常に有利となる。そこで、近年研究事例の少なかった、Nd³⁺を高濃度添加したシリカガラスシングルモードファイバー (Nd doped Silica Glass Single-mode Fiber : Nd-SMF) を用いて短尺共振器レーザーを開発し、波長 1060 nm 帯で数 GHz 以上のパルス列を得る事を研究の目的とした。

一方短尺共振器レーザーは、ファイバーの使用量が少なく、レーザー自体の小型化・量産性向上といった優位点も有している。これまでゼオライト法は、波長 1.0 μm 帯で発振する Nd³⁺イオンと Yb³⁺イオンの高濃度添加シリカガラスしか作製例がない。Er³⁺イオンは目に安全な波長 1.55 μm 帯で発振するため、ゼオライト法を Er³⁺イオンにも拡張できると、その応用はさらなる広がりが期待できる。そこで、Er³⁺イオンを高濃度添加したシリカガラス (ErZSG) を作製してその光学特性を明らかにし、波長 1.55 μm 帯の短尺共振器レーザーの構築可能性を明らかにすることも目的とした。

第 1 章では、これまで行われてきたファイバーレーザーの研究について俯瞰した。特に、GHz の高繰り返し周波数を有するパルスレーザーについて着目し、その応用用途と、これまでに提案されているその実現方法の詳細を述べその問題点について明確化した。その解決手段として、ゼオライト法が有望であることを説明し、その優位性を明らかにした。

第 2 章では、Nd-SMF の作製方法とその特性評価方法について示した後に、Nd-SMF を用いて共振器長 40 mm のファブリペロー型レーザーを提案し、実際に CW 発振するか検証・評価しその特性を議論した。その結果、レーザーの出力は最大 19.7 mW、スロープ効率 14.6 %に達することを明らかにした。そのビーム品質は 1.01 ~ 1.03 と非常に高品位であることを示した。これらから、レーザー共振器の構成を変えることで、2.6 GHz の繰り返し周波数をもつパルスレーザーの構築が見込める事を示した。

第 3 章では、実際に Nd-SMF パルスレーザーを提案・構築し、発振特性について評価・議論した。共振器長 40 mm の Nd-SMF 共振器は、半導体可飽和吸収体を用いた受動モード同期によるパ

ルス発振を実現し、レーザーの出力は最大 27.2 mW、スローブ効率は 20.8 %に達した。その繰り返し周波数は、第 2 章で予想した 2.6 GHz となった。これはシリカガラスファイバーを用いたレーザーの基本繰り返し周波数としては、筆者の知る限り最速の値であり、本手法の優位性を示す結果である。また、レーザーは Q-Switched mode-locking と呼ばれる状態にあることも明らかにした。

第 4 章では、ErZSG の作製方法とその光学特性評価方法について示し、ErZSG の光学特性を評価・議論した。Er³⁺イオンを 0.96 wt. % 添加したシリカガラスの蛍光量子収率は 45.6 % となり、L = 100 mm 短尺共振器レーザーの構築が十分見込めることを明らかにした。

第 5 章では、これらの結果をまとめて結論とした。また、今後実施されるべき課題について合わせて記載した。

審査結果の要旨

光産業の中で、近年ファイバーレーザーの成長が著しい。OITDA（一般財団法人光産業技術振興協会）の 2019 年報告によると、ファイバーレーザーの国内出荷総額はこの数年、年率 10 ~ 20 % 程度で成長し、2018 年度には 754 億円（前年度比 + 19.6 %）に達している。これはファイバーレーザーが共振器に導波路の光ファイバーを用いており、発振効率が高い点、レーザー発振に複雑な光学調整が不要である点など、他のレーザーより優れた特徴を有しているからである。その用途は、レーザー加工や各種計測用の光源としての利用などがあげられる。ファイバーレーザーの応用用途を広げるべく、これまで、発振波長の多様化、高出力化、パルス発振化が精力的に研究されてきた。最近では、パルス発振の繰り返し周波数 f を GHz 以上、時間間隔で 1 ナノ秒以下にした、高繰り返しファイバーレーザーに関する研究も盛んに行なわれている。特に、数 GHz の高繰り返しパルス列を用いた加工が、通常の数 10 kHz のパルス列による加工と比較して、加工効率が高いことが 2016 年に Nature へ掲載されて以降、学界に限らず産業界においても高繰り返しファイバーレーザーの開発が活発になっている。

GHz の高繰り返しを得る方法ではこれまでに、①導波路を用いた周波数の重畳化：数 MHz のパルスから高次の繰り返し周波数のパルス列を得る方法、②短尺共振器による高繰り返し化：希土類イオンを高濃度 (1.0 wt. %) 添加したファイバーを用いて長さ約 100 mm の共振器を構成し、直接数 GHz のパルス列を得る方法 が提案されている。①導波路による重畳化では、ファイバーを用いた導波路を工夫する必要があるが、装置は複雑化する傾向にある。一方、②の短尺共振器は、共振器が単純な構成であるため、2010 年ごろから盛んに研究されている。希土類イオンの高濃度添加とその分散性の確保から、リン酸ガラスやフッ化物ガラスなどイオン結合性の素材を用いたファイバー作製例が多いが、これらの素材は耐水性が低く実用には向いていなかった。シリカガラスファイバーによる短尺共振器レーザーで GHz の高繰り返しを実現できれば、レーザー加工がより普及する可能性を秘めている。

ゼオライト法は、シリカガラスへ希土類イオンの高濃度添加を簡便に実現できる手法である。本研究では、ゼオライト法によりシリカファイバーを作製し、高繰り返しパルスレーザーの実現を目指した。希土類イオンの中でも、Nd³⁺イオンは 4 準位系のレーザー発振を実現できることから、そのレーザー発振閾値は低い。このため、可飽和吸収体を用いたモード同期の実現も、3 準位系の Yb³⁺、Er³⁺と比較してより低出力なレーザーで実現できる可能性が高く、熱に弱い可飽和吸収体にとって非常に有利となる。

そこで、近年研究事例の少なかった、Nd³⁺を高濃度添加したシリカガラスシングルモードファイバー (Nd doped Silica Glass Single-mode Fiber : Nd-SMF) を用いて短尺共振器レーザー (Nd-SMF レーザー) を作製し、波長 1060 nm 帯で数 GHz 以上のパルス列を得る事を研究の目的とした。

一方短尺共振器レーザーは、ファイバーの使用量が少なく、レーザー自体の小型化・量産性向上といった優位点も有している。これまでゼオライト法は、波長 1.0 μm 帯で発振する Nd³⁺イオンと Yb³⁺イオンの高濃度添加シリカガラスしか作製例がない。Er³⁺イオンは目に安全な波長 1.55 μm 帯で発振するため、ゼオライト法を Er³⁺イオンにも拡張できると、その応用はさらなる広がり期待できる。そこで、Er³⁺イオンを高濃度添加したシリカガラス (ErZSG) を作製してその光学特性を明らかにし、波長 1.55 μm 帯の短尺共振器レーザーの構築可能性を明らかにすることも目的とした。

第 1 章では、これまで行われてきたファイバーレーザーの研究について俯瞰した。特に、GHz の高繰り返し周波数を有するパルスレーザーについて着目し、その応用用途と、これまでに提案されているその実現方法の詳細を述べその問題点について明確化した。その解決手段として、ゼオライト法が有望であることを説明し、その優位性を明らかにした。

第 2 章では、Nd-SMF の作製方法とその特性評価方法について示した後に、Nd-SMF を用いて共振器長 40 mm のファブリペロー型レーザーを提案し、実際に CW 発振するか検証・評価しその特性を議論した。その結果、レーザーの出力は最大 19.7 mW、スロープ効率は 14.6 %に達することを明らかにした。そのビーム品質は 1.01 ~ 1.03 と非常に高品位であることを示した。これらから、レーザー共振器の構成を変えることで、2.6 GHz の繰り返し周波数をもつパルスレーザーの構築が見込める事を示した。

第 3 章では、実際に Nd-SMF パルスレーザーを提案・構築し、発振特性について評価・議論した。共振器長 40 mm の Nd-SMF 共振器は、半導体可飽和吸収体を用いた受動モード同期によるパルス発振を実現し、レーザーの出力は最大 27.2 mW、スロープ効率は 19.6 %に達した。その繰り返し周波数は、第 2 章で予想した 2.6 GHz となった。これはシリカガラスファイバーを用いたレーザーの基本繰り返し周波数としては、筆者の知る限り最速の値であり、本手法の優位性を示す結果である。また、レーザーは Q-Switched mode-locking と呼ばれる状態にあることも明らかにした。

第 4 章では、ErZSG の作製方法とその光学特性評価方法について示し、ErZSG の光学特性を評価・議論した。Er³⁺イオンを 0.96 wt. %添加したシリカガラスの蛍光量子収率は 45.6 %

となり、 $L = 100 \text{ mm}$ 短尺共振器レーザーの構築が十分見込めることを明らかにした。

第5章では、これらの結果をまとめて結論とした。また、今後実施されるべき課題について合わせて記載している。

以上、本研究はこれまでに無い小型かつ高繰り返し (GHz) のファイバーレーザーを構築する手法の提案とその原理実証を行い、レーザー加工やレーザー計測の分野で価値ある知見を提示した。従って、学位申請者である 山崎 祐 は博士 (工学) の学位を得る資格があると認める。