

京都大学	博士 (工学)	氏名	森 田 遼 平
------	---------	----	---------

論文題目	フォトリック結晶レーザーの短パルス・高ピーク出力化に関する研究
------	---------------------------------

(論文内容の要旨)

本論文は、フォトリック結晶レーザーの2次元フォトリック結晶共振器に可飽和吸収領域を導入した新たな短パルスフォトリック結晶レーザーを提案し、従来の半導体レーザー素子単体では実現が困難であった、高ビーム品質かつ短パルス・高ピーク出力動作を実証した成果をまとめたものであり、全6章から構成される。

パルス幅ピコ秒オーダーの短パルス・高ピーク出力なレーザーは、自動車の自動運転等で需要の高まる光距離計測や、金属材料などのレーザー微細加工など多岐にわたる技術への応用が期待されている。特に、小型・安価などの特長を有する半導体レーザー素子単体で、上記応用を可能とするレーザー光源を実現できれば、上記計測システムや加工システムの大幅な小型化・低コスト化が期待される。しかし、従来の半導体レーザー素子単体における短パルス動作は、ピーク出力は最大で10W程度に留まっており、上記応用を可能とする100Wを超えるピーク出力は実現されていなかった。

本論文では、2次元フォトリック結晶をレーザー共振器として利用した半導体レーザーであるフォトリック結晶レーザーにおいて、その2次元的な共振器構造に着目し、半導体量子井戸において可飽和吸収効果を生じさせる領域を円環状に導入した新たなデバイス構造が提案されている。これにより、ビーム品質の劣化に繋がる高次モード発振を抑制しつつ、単一モードにおいて受動Qスイッチング動作が得られ、パルス幅30ピコ秒程度の自励パルス発振を実現している。また、フォトリック結晶共振器内のバンド端周波数分布が過渡応答に大きな影響を及ぼすことが見出され、その過渡応答を安定化させる方法として、バンド端周波数に大域的な分布を導入した新たな共振器構造が提案されている。その結果、ビーム拡がり角0.15度程度の高ビーム品質、かつ、パルス幅30ピコ秒程度・ピーク出力200W級の短パルス・高ピーク出力動作の実現に成功している。以上のように、本論文で実現した高ビーム品質かつ短パルス・高ピーク出力動作を可能とする短パルスフォトリック結晶レーザーは、半導体レーザー素子単体ではこれまで実現が困難であった、高いビーム品質と高いピーク出力(先行研究の数十倍)の両立を実現し、半導体レーザーの応用分野を広げる大きな成果といえる。以下に各章の要約を記載する。

第1章は序論である。まず研究背景として、半導体レーザーの短パルス動作に関する先行研究について、高ピーク出力動作における課題を含めつついくつか挙げられている。そのうえで、フォトリック結晶レーザーを短パルス動作させることによって、半導体レーザー素子単体では実現されていなかった短パルス・高ピーク出力動作の実現が期待できることが述べられている。

第2章では、まず、フォトリック結晶レーザーの基本的な動作原理、および、短パルス動作を実現するための方法の概要が述べられている。その後、短パルスフォトリック結晶レーザーのデバイス構造の設計に必要な解析手法について、過渡応答の計算手法を中心に述べられている。

第 3 章では、フォトニック結晶レーザーにおいて、半導体量子井戸の可飽和吸収効果を利用した受動 Q スwitching による短パルス動作の実証に向けた検討がなされている。2次元フォトニック結晶共振器内の可飽和吸収領域の位置によって、面内共振モードの基本モードと高次モードの閾値利得がそれぞれ変化することを数値計算によって示し、単一モード動作可能、かつ、発振モードの可飽和吸収効果が大きくなるような構造として、円環状の可飽和吸収領域が提案されている。これをもとに、水素イオン注入によって可飽和吸収領域を実装することでデバイスを作製し、直径 400  $\mu\text{m}$  の発振領域において、電流 3 A 注入時にピーク出力 20 W 程度の自励パルス発振が実証された結果が示されている。

第 4 章では、短パルスフォトニック結晶レーザーのピーク出力の向上のため、発振領域の拡大に関する検討について述べられている。共振器として用いている二重格子フォトニック結晶について、その格子点に存在する 2 つの空孔の距離や大きさの比などを調整し、フォトニック結晶共振器の結合係数を系統的に変化させることで、発振領域を拡大した場合にも自励パルス発振が得られる条件を数値計算によって探索した結果が示されている。この結果に基づき作製したデバイスにおいて、発振領域を直径 800  $\mu\text{m}$  に拡大した場合でも自励パルス発振が得られる一方で、面内で発振モードが分裂する過渡応答も得られた結果が示されている。これを踏まえて、フォトニック結晶共振器面内のバンド端周波数に意図しない非対称な分布が存在する場合に過渡応答が不安定化することを数値計算により示しつつ、その分布の補償のために面内電流密度分布の調整を行うことで、過渡応答特性が改善することが実験的に示されている。

第 5 章では、第 4 章において示された過渡応答特性の不安定化の改善のために、フォトニック結晶共振器面内への大域的な周波数分布の導入が検討されている。まず、この大域的周波数分布によって、過渡応答が安定化するとともに Q スwitching 効果の増強によってピーク出力が向上することが数値計算結果から示されている。また、フォトニック結晶共振器の結合係数および大域的周波数分布について、高いピーク出力を実現できる設計を数値計算によって行い、それをもとにデバイスを作製した結果、過渡応答特性が大幅に改善され、ビーム拡がり角 0.15 度程度の高ビーム品質、かつ、パルス幅 30 ピコ秒程度・ピーク出力 200 W 級の短パルス・高ピーク出力動作の実現に成功したことが示されている。さらに、パルス幅の狭小化や繰り返し周波数の制御に向けた検討についても述べられており、分散補償媒質によるパルス幅の狭小化によってパルス幅 10 ピコ秒程度・ピーク出力 300 W 級の短パルス・高ピーク出力動作の実現に成功しつつ、ナノ秒パルス電流励起によってピーク出力 100 W を超える単一パルス動作の実現に成功したことも述べられている。最後に、更なる高ピーク出力化に向けた検討として、最適化アルゴリズムを用いたデバイス構造の最適化によって、ビーム拡がり角 0.07 度程度の高ビーム品質を維持しつつ、1kW 級の自励パルス発振が実現可能であることが示されている。

第 6 章では、本論文において得られた成果を要約するとともに、今後の展望について述べられている。

## (論文審査の結果の要旨)

フォトニック結晶レーザーは、2次元フォトニック結晶の特異点であるバンド端における共振作用を利用した面発光型半導体レーザーである。本論文においては、このフォトニック結晶レーザーについて、そのレーザー共振器内部に円環状の可飽和吸収領域を導入した新たなデバイス構造を提案するとともに、2次元フォトニック結晶への大域的なバンド端周波数分布の導入を提案し、従来の半導体レーザー素子単体では実現が困難であった、短パルス・高ピーク出力動作を実証した。本論文に示されている主な成果は次のとおりである。

1. フォトニック結晶レーザーにおいて、その2次元的な共振器構造に着目し、半導体量子井戸において可飽和吸収効果を生じさせる領域を円環状に導入した新たなデバイス構造を提案した。これにより、面内単一モードで受動Qスイッチング動作が可能となり、直径400  $\mu\text{m}$ の発振領域において、パルス幅30ピコ秒程度・ピーク出力20W程度の短パルス・高ピーク出力動作の実現に成功した。
2. フォトニック結晶共振器内のバンド端周波数の分布によって、過渡応答特性が大きく変化することを見出し、過渡応答の安定化のために、大域的なバンド端周波数分布を導入したレーザー共振器構造を提案した。その際、発振領域の時間的な変化によって共振器損失が短パルス発振時に減少することでQスイッチング効果が増強され、ピーク出力が向上することを明らかとした。そして、具体的な構造設計を行い、ビーム拡がり角0.15度程度の高ビーム品質、かつ、パルス幅30ピコ秒程度・ピーク出力200W級の短パルス・高ピーク出力動作の実現に成功した。
3. フォトニック結晶共振器の結合係数、バンド端周波数分布、可飽和吸収領域の分布について、粒子群最適化を用いて最適化することで、高いビーム品質を維持しつつ、1kW級の自励パルス発振が実現可能であることを示した。

以上のように、本論文で実現した高ビーム品質かつ短パルス・高ピーク出力動作を可能としたフォトニック結晶レーザーは、半導体レーザー素子単体ではこれまで実現が困難であった、先行研究の数十倍程度の高いピーク出力を高いビーム品質で実現するものである。これは、光計測技術や光加工技術を始めとした多岐にわたる分野への応用が期待され、その分野の進展に繋がる大きな成果といえる。このように、本論文は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年1月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。