

フォトリック結晶レーザーの高輝度単一モード連続動作の実現

電子工学専攻 光量子電子工学分野

博士後期課程3回生 勝野 峻平

1. 研究背景

レーザー加工（光加工）技術は、研磨・切削では困難な精密加工が可能であり、デジタル制御との親和性も高い技術として注目されている。光加工用光源としては、連続駆動における高出力・高ビーム品質動作による、 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 以上という高輝度（=単位出射面積、単位立体角あたりの光出力）が要求され、現状では、高輝度ではあるものの大型・低効率・高コストな CO_2 レーザーやファイバーレーザー等が用いられている。もし、小型・高効率・低コスト・高制御性という特長をもつ半導体レーザーにおいて高輝度連続動作を実現できれば、これらの大型レーザーを置き換え、超小型・シンプルな光加工システム実現によるスマート製造（=デジタル化による自動的かつ効率的なものづくり）への貢献が期待できる。しかし従来の半導体レーザーは、高ビーム品質動作（単一モード発振）を維持可能な光出力（出射面積に比例）に限りがあるため、その輝度は最大でも $\sim 0.1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ と、他の大型レーザーの 1/10 程度以下にとどまっており、スマート製造実現のボトルネックとなっていた。

2. 研究内容

以上の半導体レーザーの課題を解決し、高輝度動作を可能とする新たな半導体レーザーとして、図 1(a) に示す、光の波長程度の周期構造をもつフォトリック結晶を活用したフォトリック結晶レーザー（PCSEL）の研究を進めてきた。まず、図 1(b) に示す、楕円孔と円孔をもつ2つの正方格子フォトリック結晶を、距離 d （4分の1波長程度）ずらして重ねた「二重格子フォトリック結晶」という独自の構造を用いて、PCSEL の面積を拡大しても高次モードの発生を抑制し、単一モード発振を実現可能とする方法について検討した。具体的には、図 1(c) に示すように、共振領域中央に腹をもつ基本モードと、端部に腹をもつ高次モードの垂直方向からの出射角度が異なることに着目し、わずかに斜め方向へ出射する高次モードの放射損失のみ大きくすることを検討した。そのために、図 1(b) の左図に示す二重格子構造における距離 d と、楕円孔と円孔の大きさのバランスの微調整によりエルミート結合を、さらには図 1(b) の右図に示す放射波を介した非エルミート結合を精密に制御することで、光波結合を総合的に低減することとした。その結果、垂直方向へ放射する基本モードの放射損失を小さく保ちつつ、わずかに斜め方向へ放射する高次モードの放射損失のみを増大させ、カットオフ可能となることが理論的に判明した。そして、半導体レーザーとして極めて大面積である直径 3mm においても高ビーム品質動作（単一モード発振可能）であり、50~100W 級動作による輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ が期待できる設計に成功した。

さらに、光加工に必須な連続動作かつ高電流注入状態（発熱の影響を大きく受ける動作状態）においても、高ビーム品質動作を維持するための工夫を考案した。連続動作においては、図 2(a) に示すように、PCSEL の温度上昇に伴ってフォトリック結晶面に不均一な空間分布が生じ、精密に制御した光波結合が乱されて高ビーム品質動作が阻害される懸念が生じる。そこで、図 2(b) に示すように、連続動作におけるフォトリック結晶の不均一性を打ち消すため、フォトリック結晶の空孔周期（格子定数）に面内分布を与える温度補償構造を考案した。これにより、連続動作においても適切な光波結合が維持され、高ビーム品質動作（単一モード動作）が期待できる。

以上の、光波結合の総合的な低減と、それを連続動作においても維持するための温度補償構造の導入を取り入れた直径 3mm の PCSEL を開発した (図 3(a))。図 3(b)~(d) に連続動作時のレーザー発振特性の評価結果を示す。同図(b)に示す光出力特性より、最大で 50W を超える光出力を達成した。さらに、同図(c)および(d)より、単一モード動作による極めて狭いビーム拡がり角 ($\sim 0.05^\circ$) を得ることに成功した。その結果、単一素子の半導体レーザーにおいて、大型レーザーに匹敵する輝度 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ を実現した。

次に、このような高輝度 PCSEL の金属加工への応用も試みた。その結果、図 4(a)、(b) に示すように、半導体レーザー単一チップによる金属板の切断加工にも成功した。以上の成果は、大型・低効率・高コストという欠点をもつ大型レーザーを、小型・高効率・低コストという利点をもつ半導体レーザーに置き換え可能な段階に達したことを示すものと言える。

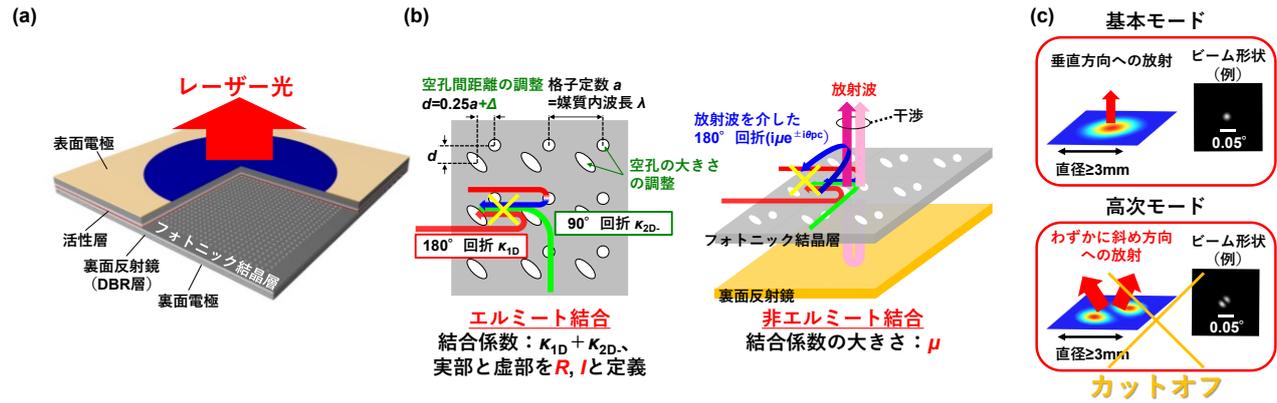


図 1. (a) フォトニック結晶レーザー (PCSEL) の模式図。(b) 二重格子フォトニック結晶における光波結合の模式図。(c) 基本モードと高次モードの光強度分布と放射角度の模式図。

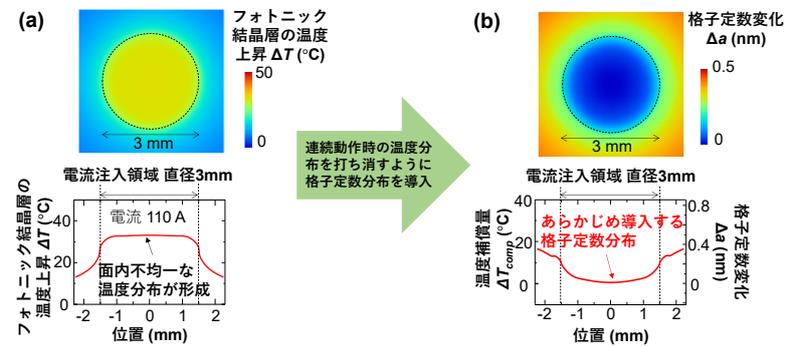


図 2. (a) 直径 3mm PCSEL の連続動作時 (電流 110A 注入時) のデバイス面内温度分布とその断面プロファイル。(b) 連続動作時の面内温度分布を打ち消すように導入する温度補償構造 (格子定数分布)。

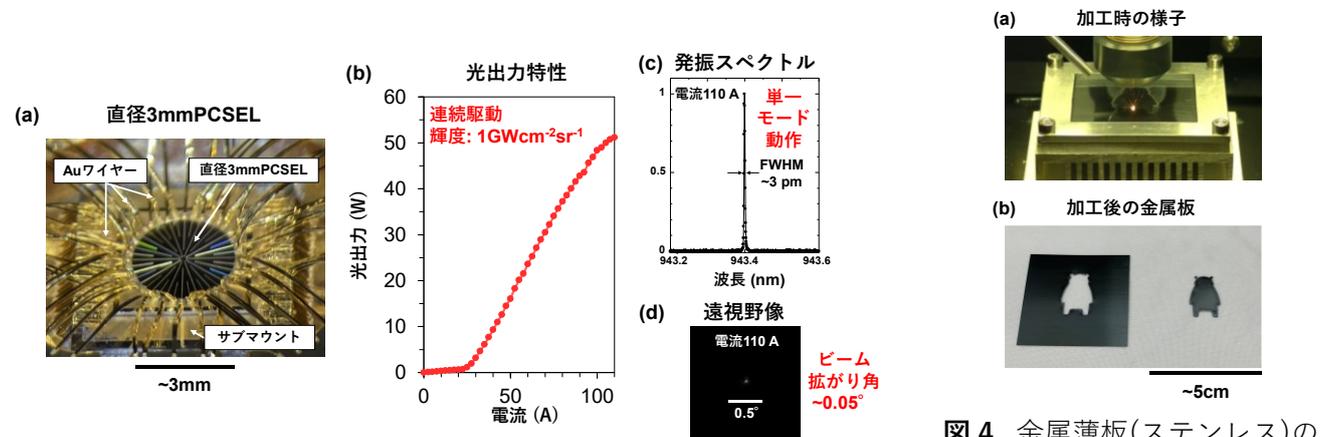


図 3. (a) 直径 3mm PCSEL の実装後の写真。(b) 連続動作における光出力特性。(c) 発振スペクトル。(d) 遠視野像。

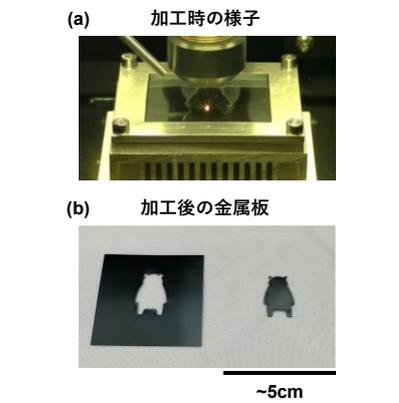


図 4. 金属薄板 (ステンレス) の切断加工。(a) 加工時の様子。(b) 加工後の金属板。