

氏 名	きたざわ みき 北澤 美紀
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 1 0 1 9 号
学位授与の日付	令和 3 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 電子システム工学専攻
学 位 論 文 題 目	集積型フォトニック結晶面発光レーザーによる光渦ビームの生成
審 査 委 員	(主査)教授 裏 升吾 教授 大柴 小枝子 教授 山下 兼一 准教授 北村 恭子

論文内容の要旨

レーザーが発明されてから 60 年、室温連続発振半導体レーザーが開発されてから 50 年、レーザーを利用する科学技術分野は急進展を遂げ、高速大容量情報通信に不可欠な光通信、車の自動運転に不可欠な LiDAR、医療診断、環境計測など、現在の社会生活基盤を支える様々な分野で活用、展開されている。これまでのレーザービームは主として光強度分布がガウス分布で位相が平面に近いガウシアンビームであった。しかしながら、近年、異なる形態のレーザービームが脚光を浴びるようになってきた。光渦ビームもその一つであり、ビーム伝搬方向に垂直な断面において円周方向に沿って位相が変化し、1 回転での位相変化量が 2π の整数倍 (l 倍) を示す特殊な形態を有する。位相回転の次数を表す l はトポロジカルチャージと呼ばれる。本論文は、このような光渦ビームを半導体レーザーチップから直接出力させる光源の実現可能性を探究した結果をまとめたものである。半導体レーザーとしてフォトニック結晶レーザーを利用し、8 段階位相の螺旋位相シフタ (SPP) を集積してチップ光源を構成しており、それによる光渦ビーム生成を理論的・実験的に検討している。

第 2 章では、面発光型フォトニック結晶レーザーの出力表面に SPP を集積する構造の提案、作製、および光渦ビーム生成の実験的検証結果について記述している。フォトニック結晶レーザーとはフォトニック結晶で形成するレーザー共振器を光半導体の活性層近傍に集積したものである。SPP としては連続位相シフトが理想であるが、その表面加工作製には Γ 特性の緩やかなレジストの開発ならびにグレーマスクの最適化を必要とする。そこで、それらを不要とする離散型位相シフトで SPP を形成することを試みている。離散型 SPP により形成される光渦ビームの特性を理論的に明らかにし、8 段階位相が特性および作製の面から最適であることを見いだした。実際に、フォトニック結晶レーザーにその 8 段階 SPP を加工するプロセスを開発している。また、光渦ビームを簡便に検証する光学システムを構築し、作製した素子から出力されたレーザービームが光渦ビームの特徴を備えていることを実証している。

第3章では、半導体レーザーの面上光強度分布と SPP の位置ずれが光渦ビームに及ぼす影響について、理論的に検討している。SPP 位置ずれと光渦ビームの形状の関係を定量的に明らかにすることにより、集積プロセスの作製許容誤差に関する知見を得るだけでなく、SPP による光渦ビームの形成の物理的イメージを明らかにしている。

第4章では、高次光渦ビームの生成とその検証実験について記述している。トポロジカルチャージ l は光渦の次数を表しており、 l が 2 および 3 の高次光渦ビームの生成デバイスを設計、作製、特性評価しており、それらの結果についてまとめている。SPP の位相シフトとしては段数 8 の離散型を用いて検討しており、2 次および 3 次に対応させて 16 分割および 24 分割の SPP を集積し、出力された光渦ビームを 1 次の光渦ビームと比較している。定量的比較検証法を考案し、実験結果に適用して、高次光渦ビームの形成を確認している。

第5章では、作製した光渦ビーム発生半導体レーザーチップのひとつの応用例として、プラズマ流速測定を検討している。プラズマ流速測定における課題を明らかとして、光渦ビームがその測定に有効であること、および測定条件を議論している。

論文審査の結果の要旨

レーザーを利用する科学技術は、高速大容量情報通信に不可欠な光通信、車の自動運転のための LiDAR、医療診断、環境計測など、社会基盤を支えるコア技術として活用、展開されている。レーザー光の基本形態は、光強度分布がガウス分布で位相が平面に近いガウシアンビームである。しかしながら、近年、異なる形態のレーザービームが脚光を浴びるようになってきた。本論文は、その中のひとつである光渦ビームを生成する光源の開発に関するものである。光渦ビームは、軌道角運動量を有し、レーザービーム中心が光強度の暗点となる。このような特徴から、新たな光通信方式やレーザートラッピング、金属加工などへの応用が期待されている。

光渦ビームの生成には、これまで、ホログラムを中心とした光学システム、もしくは螺旋状位相板を中心とした光学システムを構築する必要があり、光学部品の作製・調達およびそれらのアセンブリが必要であった。本論文では、半導体レーザーチップから光渦ビームを直接出力する手段の可能性について議論している。このようなチップを実現できれば、上記のような光学システムを不要とし、mm サイズの超小型光渦ビーム光源が出現することとなり、新たな応用展開を含めて関連分野の進展を促すことが期待される。

まず、半導体レーザーとして空間モードが制御可能な面発光型のフォトニック結晶レーザーに着目し、その表面に階段状位相シフトを集積する構造を提案し、その作製および光渦ビームの生成に成功している。フォトニック結晶レーザー表面に別の光学素子を集積すること自体が世界初の試みである。また、位相シフトを階段状とすることが光渦ビームの品質に及ぼす影響、および集積化における作製誤差が光渦ビーム形成に及ぼす影響を、理論的、定量的に解明しており、実用上の重要な知見を得ている。さらに、階段状位相シフトを円周方向に 2 および 3 に分割して集積することにより、2 次および 3 次の高次光渦ビームの生成にも成功している。

本論文は、レフェリー制度の確立した以下の 3 編の学術論文を基礎としている。

1. K. Kitamura, M. Kitazawa, and S. Noda “Generation of optical vortex beam by surface-processed photonic-crystal surface-emitting lasers,” *Optics Express*, vol. 27, pp. 1045-1050 (2019).
2. M. Kitazawa, H. Himura, T. Mine, and K. Kitamura, “Revisit: principle of transverse flow measurement by using an optical vortex beam in cylindrical coordinates,” *OSA Continuum*, vol. 3, pp. 2470-2484 (2020).
3. M. Kitazawa, K. Kitamura, and S. Ura, “Deformation of optical vortex beam by displacement of incident-beam optical axis from spiral phase plate center,” *Results in Optics*, vol. 3, paper 100076 (2021).

以上から、本論文の内容は十分な新規性と独創性、さらには工学的な意義があり、博士論文として優秀であると審査員全員が認めた。