

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600059

研究課題名(和文) マイクロチップ型ラゲール・ガウシアンビーム光源の開発

研究課題名(英文) Development of Laguerre-Gaussian beam sources at micro-chip scale

研究代表者

北村 恭子 (Kitamura, Kyoko)

京都大学・白眉センター・助教

研究者番号：40635398

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：光波は、波の周期的な長さ(波長)、振動する大きさ(振幅/強度)、振動する方向(偏光)、周期中での位置(位相)といった様々な物理量を有する。近年、半導体レーザーにおいては、構成元素を変えることでの、色(波長)の変調はもとより、フォトニック結晶(PC)レーザーと呼ばれる半導体レーザーを用いることで、ビーム形状(強度分布)や偏光の制御をも可能になってきている。このような背景の下、本研究では、PCレーザーの設計自由度に着目して、位相の空間的な制御を目指してきた。特に、円周方向に位相を制御することで、ラゲール・ガウシアンビームと呼ばれる、ドーナツ形状のビーム出射に取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：Light wave has variety of physical quantities, such as wavelength, amplitude (intensity), polarization and phase. Recently, in the fields of semiconductor lasers, photonic-crystal lasers have been achieved to control beam shapes (intensity profiles), polarization, as well as wavelength by changing materials. Based on such background, in this research project, we have been attempted to realize special phase control by focusing on the flexibility of design of photonic-crystal lasers. In particular, by controlling the phase distribution towards circumferential direction, we tried to directly emit the doughnut shape beam called Laguerre-Gaussian beam.

研究分野：光量子電子工学

キーワード：フォトニック結晶レーザー ラゲール・ガウシアンビーム

1. 研究開始当初の背景

光波は、波の周期的な長さ(波長)、振動する大きさ(振幅/強度)、振動する方向(偏光)、周期中での位置(位相)といった様々な物理量を有する。近年、半導体レーザにおいては、構成元素を変えることで、色(波長)の変調はもとより、フォトニック結晶(PC)レーザを用いることで、ビーム形状(強度分布)や偏光の制御をも可能になってきている。このようなビーム形状や偏光の制御されたビームは、ベクトルビームとも呼ばれ、光軸上に偏光の特異点を有するために、ドーナツ形状の強度分布を有する(図1)。ベクトルビームは、新奇な集光特性を示すことが明らかにされ、注目を集めている。

一方で、同様のドーナツ形状の強度分布を有するビームに、ラゲール・ガウシアン(LG)ビームが知られている(図1)。このビームは光軸上に位相の特異点を有することで、ドーナツ形状の強度分布を示す。また、軌道角運動量を有することから、微粒子の捕捉や回転などの顕微鏡下での応用に利用されている。通常、LGビームの発生は、光源に対して位相ホログラムの導入や光学系の複合によってなされている。しかしながら、より小型でアライメントフリーな LG ビーム光源ができれば、微粒子の捕捉や回転が可能という特性を、マイクロマシン技術などにもより広く応用されるようになると期待できる。

そこで、PCレーザの設計自由度に着目すると、これまでの、色・強度・偏光に加えて、位相も空間的に制御可能なのではないかと、さらに円周上に位相差を与え、LGビームを単一の半導体レーザで発生させることが可能ではないかと着想したのが、研究開始当初の背景である。

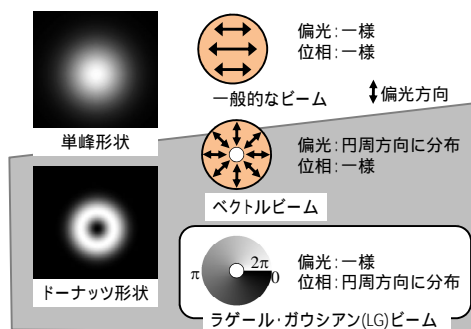


図1: ビーム形状・偏光・位相の関係
本研究は LG ビームの発生を目指す

2. 研究の目的

以上の研究背景をもとに、研究期間内に PC レーザの(1)出射面の自由度 (2)共振器

(PC 層)構造の設計自由度に着目し、空間的な位相制御方法を検討する。これらの検討によって、(3)PC レーザによる LG ビームの発生が可能であることを明らかにすることを、本研究の目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、フォトニック結晶(PC)レーザによるラゲール・ガウシアン(LG)ビーム発生という目的を達成するため、2通りの戦略を立案した。

戦略(1) 出射面の加工

LGビームは、あるビーム断面で、円周方向に段階的に位相が異なるビームである。すなわち、通常のビームに対して、円周方向に段階的な位相遅れを与えることができればよい。そこで、レーザ出射面を加工し、発振したレーザビームに対して、出射する面でらせん状に段階的な光路差を与えることができれば、ファーフールドには LG ビームが生成されるはずである。

戦略(2) PC レーザ共振器の設計

これまでに PC レーザ共振器において、線欠陥を適切に設計することで、位相差 π を与えられると報告されている。このコンセプトを発展させると、PC の共振状態を大きく乱すことなく、線欠陥を円周方向に導入することができれば、LGビーム様の位相差も与えることができるのではないかと考えられる。加えて、近年2種類以上の複合 PC によるビーム制御も報告されている。位相を変調するような PC を設計できたならば、従来の定在波形成を担う PC との複合によって、LGビームの発生も有力な位相制御手法ではないかと考える。

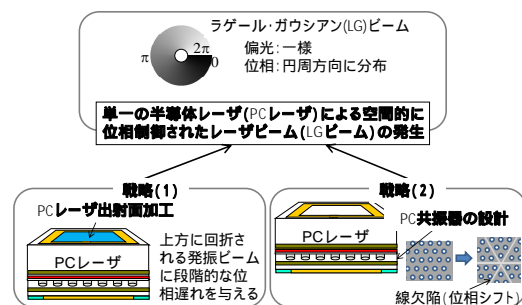


図2: 研究計画の全体像

4. 研究成果

本研究では、フォトニック結晶(PC)レーザによるラゲール・ガウシアン(LG)ビーム発生という目的を達成するため、2通りの戦略

により研究を実施した。それぞれについて得られた知見について述べ、最後にまとめる。

戦略(1) 出射面の加工

PC レーザの出射面自由度の拡張(ナノ構造の導入)に取り組み、まずは、PC レーザ出射面へのらせん状の3次元構造加工プロセスの検討を行った。第一に、電子線リソグラフィの3次元描画機能を用いて、3次元構造を堆積する作製手法を試みた。しかしながら、現状入手可能な Hydrogen Silsesquioxane (HSQ)ネガティブレジストは、作製環境(温度・湿度・レジストの生産日からの日数)によって大きく膜厚条件が異なり、所望の構造を再現性良く作製することが困難であることが分かった。次に、PC レーザ出射面の多段階のエッチング法を考えた。3回の精密位置合わせフォトリソグラフィによってマスクを形成し、ドライエッチングで段階的にエッチングする方法と、ウェットエッチングで段階的にエッチングする方法とを検討した。その結果、後者のウェットエッチング法がほぼ理想的な構造を作製しうることが分かった。具体的には、PC レーザ表面となる GaAs 基板層に対して、フォトリソグラフィにてマスクを形成し、硫酸・過酸化水素水混合溶液で時間を制御しながらウェットエッチングをすることを3回繰り返すという方法である。AFM 像を観察したところ、この場合、ほぼ理想的な8段階の位相制御板となる出射面加工ができることが分かった。

戦略(2) PC レーザ共振器の設計

フォトリソグラフィ(PC)層への線欠陥(位相シフト)等の導入による、位相操作については、理論検討を行った結果、線欠陥設計や複合結晶設計のいずれの方法においても、面内で同時に右回りと左回りの位相変化が起こるため、あるいは出射面に対して裏面からの反射が反対周りの位相変化となるため、結果的に、位相変化が消失してしまうことが分かった。

以上の検討状況から、多数回でのフォトリソグラフィとウェットエッチングを用いて、PC レーザ出射面となる GaAs 基板を加工することが最も適切な手法であり、GaAs 基板上において理論上ほぼ理想的な構造の作製に成功した。この挑戦的萌芽研究で得られた成果を基に、いよいよ、PC レーザ表面に同加工を施し、作製したデバイスの光学測定による評価、特に、ガウシアンビームとの干渉による位相を評価したい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

M. Nishimoto, K. Ishizaki, K. Maekawa, Y. Liang, K. Kitamura and S. Noda "Fabrication of Photonic-Crystal Lasers by MBE Air-Hole Retained Growth", *Applied Physics Express*, vol. 7, no. 9, 092703 (2014) 査読有.
DOI: 10.7567/APEX.7.092703

Y. Liang, T. Okino, K. Kitamura, C. Peng, K. Ishizaki and S. Noda "Mode stability in photonic-crystal surface-emitting lasers with large κ 1DL", *Applied Physics Letters*, 104, pp. 021102-021105 (2014) 査読有.
DOI: 10.1063/1.4861708

K. Kitamura, Ting Ting Xu and S. Noda "Investigation of electric field enhancement between metal blocks at the focused field generated by a radially polarized beam", *Optics Express*, vol. 21, No. 26, pp. 32217-32224 (2013) 査読有.
DOI: 10.1364/OE.21.032217

[学会発表](計24件)

北村恭子, "[第5回女性研究者研究業績・人材育成賞(小館香椎子賞)研究業績部門(若手)受賞記念講演]フォトリソグラフィによる新奇集光ビームの生成とその応用", 第62回応用物理学会春季学術講演会, 13p-A10-1, 東海大学, 厚木市, 2015年3月13日.

北村恭子, 野田進: "[依頼講演]フォトリソグラフィによる集光ビームと偏光走査", 電子情報通信学会2014年ソサイエティ大会, C-4-20, 徳島大学, 徳島市, 2014年9月24日.

北村恭子, 野田進: "径偏光ビームの集光点における誘電体を用いたz偏光電場形成の提案", 応用物理学会秋季学術講演会, 19p-C1-9, 北海道大学, 札幌市, 2014年9月19日.

Kitamura, K., T. T. Xu, and S. Noda, "Generation of electric-fields enhancements between metal cubes by focused radially polarized beams", OMC4-3, The Optical Manipulation Conference (OMC) 2014 of the Optics & Photonics International Congress (OPIC) 2014, Yokohama,

Japan, 24th April 2014.

Kitamura, K., T. T. Xu, and S. Noda, "Generation of Electric-fields Enhancements by Focused Radially Polarized Beams", T2G-2, The 9th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS), Hawaii, USA, April 2014.

北村恭子, ジョ テイテイ, 野田進: " 径偏光ビームの集光点における位相操作の検討 ", 応用物理学会春季学術講演会, 17a-PA1-16, 青山学院大学, 相模原市, 2014年3月17日.

北村恭子, ジョ テイテイ, 野田進: " 径偏光ビームの集光点における電場増強効果の検討 II ", 応用物理学会秋季学術講演会, 17a-PA14-6, 同志社大学, 京田辺市, 2013年9月17日.

〔その他〕

アウトリーチ活動情報

京都大学ジュニアキャンパス 2014 において中学生向けゼミを開講 2014 年 9 月「虹の謎に迫る - 光と波と、ついでに音! ? - 」 北村恭子・デゾイサメーナカ・小石かつら

京都大学ジュニアキャンパス 2013 において中学生向けゼミを開講 2013 年 9 月「光の波・音の波」 北村恭子・小石かつら

報道関連情報

北村恭子、Kyoto University Research Activities Vol. 4 No. 1 「京大で活躍する女性研究者」に寄稿 (2014 年 6 月)

北村恭子、京都大学女性研究者支援センター「未来につながる青いリボンのエトセトラ」取材対応 (2014 年 4 月)

北村恭子、Kyoto University Research Activities Vol.3 No. 1 に寄稿 (2013 年 6 月)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

北村 恭子 (KITAMURA, Kyoko)

京都大学白眉センター・特定助教 (白眉)

研究者番号 : 40635398