

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01995

研究課題名(和文) 光波から電子波への波面転写

研究課題名(英文) Wavefront transfer from light wave to electron wave

研究代表者

佐藤 俊一 (Sato, Shunichi)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：30162431

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、光の領域で確立された波面制御技術を電子波へ転写する基盤技術の確立を目指したもので、光波から電子波への転写は、光ビームを用いて作製するホログラムを介して行うこととした。そのために、光の波面と強度分布を精密に制御する技術を新たに開発した。これをレーザーマイクロ加工に適用し、電子渦発生用のホログラムを作製した。このホログラムは光の干渉パターンを反映しているため、位相変調が加わっている点が大きな特徴のひとつであり、電子波への変換効率が大きく改善できると期待される。

研究成果の概要(英文)：This research aimed to establish a basic technology to transfer the wavefront from light wave to electron wave by using wavefront control techniques developed in the field of light. The wavefront transfer from light wave to electron wave was conducted by a hologram fabricated by light beams, for which a new technique was developed to precisely control the wavefront and intensity distributions of light wave. These techniques were applied to laser micro-processing of a hologram used for the generation of an electron vortex. Because this hologram contains a phase modulation, which is a unique feature of this hologram, improvement of the conversion efficiency to electron wave is expected.

研究分野：光工学

キーワード：波面 レーザー 電子波 光波

1. 研究開始当初の背景

近年、光の位相や偏光、振幅の分布を制御する技術が発達しており、様々な光ビームの発生とその応用技術が開発されている。一方、電子の波の性質を用いる技術開発も進展しており、干渉計測へ用いることのできる可干渉性に優れた波面制御技術も確立しつつある。

しかしながら、電子波の位相や振幅の分布を制御する技術開発は始まったばかりであり、一部電子顕微鏡で用いられる電子ビームは、干渉計測に十分な可干渉性が得られているものの、レーザーから出力される光ビームや、特殊な光学素子を用いてビーム変換された光ビームのように、自在に制御する方法に関しては、その原理すら提案されていない状況であり、新しい電子ビーム制御法の開発が待たれていた。

2. 研究の目的

上記背景を考慮すると、電子波の性能や機能のさらなる向上を図ることは喫緊の課題であり、将来的には光の領域に置けるレーザーのように、自在にパラメータを制御した電子ビーム源に関する技術を開発することが重要であると考えられる。

そこで本研究では、技術開発が進んでいる光領域での特に位相分布制御技術を駆使して、光技術を用いて生成された光ビームの波面を、物質を介してその波面を電子波へ転写する技術の基盤を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

らせん状の位相波面を有する光波が存在することは古くから知られており、その性質については特に 90 年代以降に盛んに研究されている。一方で、2010 年にらせん状の位相波面を有する電子波の生成が報告されてから、物質波においても平面または球面以外の波面構造を有するビームを生成できることが明らかになり、この新しい電子ビームの物理的性質の解明や応用を目指した研究が盛んに行われている。しかし、レーザー発振器からの直接生成や、空間位相変調器などによって容易に生成できる光渦とは異なり、電子渦の生成では一般に、イオンビーム加工等によるスリット状の 2 次元パターンを有したホログラフィック回折格子を用いており、原理的に回折効率が低いという課題がある。

そこで本研究では、自由に制御できる光波の位相波面を電子の波面に転写するという発想のもとに、レーザー干渉加工による電子線ホログラフィック回折格子を作製するために必要なレーザー光源の開発と、レーザー微細加工によるホログラムの作製を

行った。

4. 研究成果

位相ホログラムを作製するために点欠陥ミラーを用いたレーザー共振器を設計し、紫外域の光渦を発生する He-Cd レーザーを開発した。これは過去に本研究者が確立した光渦生成の手法であり、共振器の固有モードを利用することで品質が高く、純粋な固有モードに近い光渦を安定に生成することができていることがわかっている。本研究では、レーザー共振器の反射鏡におけるレーザービーム径を計算によって求め、また、レーザー媒質の利得を考慮して、適切な点欠陥のおおよその大きさを求めた。この結果に基づき、高反射率共振器ミラーの中央に直径約 100 μm の穴を開けて光軸中心に配置することにより、その点に強度暗点（ここでは位相特異点に相当）を形成することができた。

Fig. 1 にこの He-Cd レーザーで発生した光渦の強度プロファイルを示す。一次元断面の強度分布と $p = 0, l = 1$ のラゲールガウスビームに対応する固有関数によるフィッティングの結果から、高品質な紫外域光渦ビームの発生が確認された。また、平面波との干渉により期待される、光渦に特徴的なフォーク状干渉パターンの発生も確認することができた。

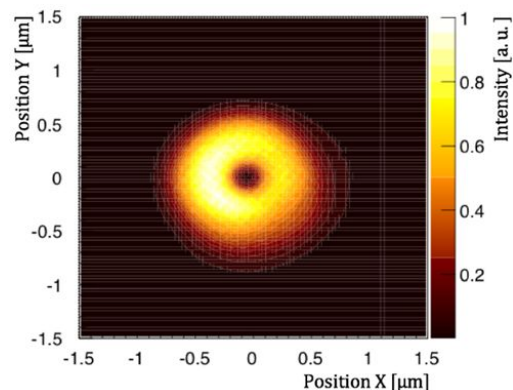


Fig. 1 点欠陥ミラーを用いた光共振器により発生した He-Cd レーザービームの強度プロファイル。

次に、レーザーマイクロ加工による、電子渦発生のための、ホログラムの作製を行った。波長 1 μm のフェムト秒レーザーを用い、光路を 2 本に分岐した後に、片方に空間位相変調を用いてらせん状の位相波面を付与したうえで、加工試料の表面に集光した。Fig. 2 に加工試験として、Gaussian ビーム 2 本を用いて Si 基板に対しレーザー干渉加工を行った加工痕を示す。3D レーザー顕微鏡を用いて断面画像を取得し、形状を調べたところ、レーザーの強度分布に従って数 10 ~ 150 nm の深さの加工痕が形成されていることがわかり、電子の位相を制御するうえで十分な加工深さを実現した。さらに、窒化シリコンについても同様の実験を行い、干渉パターンの作製に成功した。

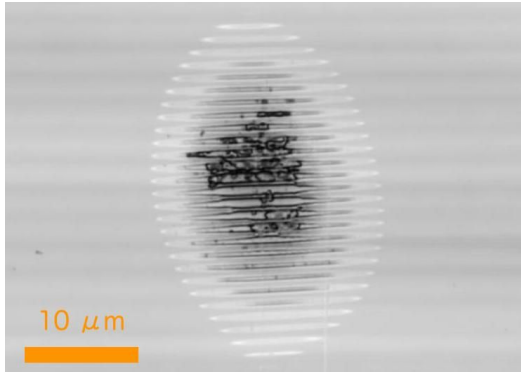


Fig. 2 ガウス型の強度分布を持つ2本の光ビームの干渉パターンで直接加工した Si 基板表面の光学顕微鏡像。

これらの成果をもとに、加工表面における光強度の分布を均一にし、レーザーパワーと照射繰り返し数を最適化し、また光渦と平面波との干渉パターンにより、最終的に目標とする位相変調型のホログラフィック回折格子を作製することができた。ここで干渉パターンを形成するひとつの光ビームである光渦は、中央に存在する位相特異点のために、固有モードとしての光渦の周囲では光強度が減少してしまうため、平面波との干渉の際に、十分な光強度を得ることができず加工が不十分となってしまう。このような光強度が不均一となる問題を克服するために、ガウス型の強度分布を有する入射レーザー光の中心部分のみを利用した。また、空間位相変調器の表面を対物レンズの焦点面に結像するように光学系を設計した。これらの工夫により、均一な加工を実現することができた。

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 5 件)

Shugo Matsusaka, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Micro-hole drilling by tightly focused vector beams, *Optics Letters*, 43(7), 1542-1545 (2018) 査読有

DOI: 10.1364/OL.43.001542

Yuichi Kozawa, Daichi Matsunaga, Shunichi Sato, Superresolution imaging via superoscillation focusing of a radially polarized beam, *Optica*, 5(2), 86-92 (2018) 査読有

DOI: 10.1364/OPTICA.5.000086

Muttaqin, Takahiro Nakamura, Yuta Nishina, Shunichi Sato, Chemical surface modification of graphene oxide by femtosecond laser pulse irradiation in aqueous suspensions, *Journal of Materials Science*, 52(2), 749-759 (2017) 査読有

DOI: 10.1007/s10853-016-0368-8

Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, Yoko Miyamoto,

Creation of polarization gradients from superposition of counter propagating vector LG beams, *Optics Express*, 23(26), 33970-33979 (2015) 査読有

DOI: 10.1364/OE.23.033970

Takumi Sato, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Transverse-mode selective laser operation by unicursal fast-scanning pumping, *Optics Letters*, 40(14), 3245-3248 (2015) 査読有

DOI: 10.1364/OL.40.003245

〔学会発表〕(計 32 件)

- 1) 小澤 祐市, 佐藤 俊一, ベッセルビームとエアリービームによるレーザー走査型顕微鏡法での3次元イメージングの検討, 第65回応用物理学会春季学術講演会, (2018)
- 2) 奈良 優樹, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 複屈折レンズを用いた光フィードバック光学系による面発光レーザーからのベクトルビームの発生, 第65回応用物理学会春季学術講演会, (2018)
- 3) 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 位相補償を用いた光ファイバー増幅器における高出力・高品質ベクトルビーム発生, 第64回応用物理学会春季学術講演会, (2017)
- 4) 上杉 祐貴, 保坂 勇志, 浦川 順治, 大森 恒彦, 小菅 淳, 坂上 和之, 高橋 徹, 本田 洋介, 鷲尾 方一, 自立安定性を備えた光蓄積共振器の開発, 第64回応用物理学会春季学術講演会, (2017)
- 5) 阪下 良太, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 軸方向電場を用いた共焦点イメージングにおけるサイドロープの抑制, 第64回応用物理学会春季学術講演会, (2017)
- 6) 上杉 祐貴, 佐藤 俊一, レーザー干渉加工による電子線ホログラフィック回折格子, 第78回応用物理学会秋季学術講演会, (2017)
- 7) 小澤 祐市, 佐藤 俊一, レーザー走査型顕微鏡におけるエアリービームを用いた深さ情報の抽出, 第78回応用物理学会秋季学術講演会, (2017)
- 8) 松坂 修吾, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 強く集光したベクトルビームによるレーザー微細穴あけ加工, 第78回応用物理学会秋季学術講演会, (2017)
- 9) 奈良 優樹, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 面発光半導体レーザーからの径偏光ビーム発生の検討, 第78回応用物理学会秋季学術講演会, (2017)
- 10) 松坂 修吾, 上杉 祐貴, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, ベクトルビームを用いた金属材料の微細穴あけ加工, 日本金属学会東北支部研究発表大会, (2017)
- 11) 松坂 修吾, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, ベクトルビームによる高開口数レンズを用いたレーザー微細穴あけ加工, 応用物理学会東北支部学術講演会, (2017)
- 12) 奈良 優樹, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 光フィ

- ードバック光学系を用いた 面発光半導体レーザーからの径偏光ビームの発生, 応用物理学会東北支部学術講演会, (2017)
- 13) 保坂 勇志, 上杉 祐貴, 浦川 順治, 大森 恒彦, 小菅 淳, 坂上 和之, 高橋 徹, 本田 洋介, 鷲尾 方一, レーザーコンプトン光源のための自発共鳴型光蓄積共振器の開発, 日本物理学会第 71 回年次大会, (2016)
- 14) 大町 弘毅, 中村 貴宏, 佐藤 俊一, レーザー誘起前方転写法への円環ビームの適用, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, (2016)
- 15) 光主 幸紀, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 径偏光ビームの光ファイバー増幅器における液晶型可変波長板の偏光補償効果, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, (2016)
- 16) 松永 大地, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 高次方位偏光ビームを用いた差引イメージングによる高空間分解能レーザー顕微鏡, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, (2016)
- 17) 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 収差存在下における高次径偏光ビームの集光特性の検討, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, (2016)
- 18) 山中祐実, 日比輝正, 小澤祐市, 大友康平, 根本知己, トップハット型レーザービームを用いた多点走査型 2 光子顕微鏡の開発, 日本顕微鏡学会 第 72 回学術講演会, (2016)
- 19) 保坂 勇志, 上杉 祐貴, 本田 洋介, 小菅 淳, 大森 恒彦, 浦川 順治, 高橋 徹, 坂上 和之レーザーコンプトン光源のための自発共鳴型光共振器のモードロックパルス発振, 第 13 回日本加速器学会年会, (2016)
- 20) 阪下 良太, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 高次径偏光ビームの軸方向電場を用いた共焦点イメージング, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, (2016)
- 21) 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 収差存在下における非回折光ニードルスポット形成, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, (2016)
- 22) 上杉 祐貴, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 点欠陥ミラーを用いた He-Cd レーザーからの光渦生成, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, (2016)
- 23) 阪下 良太, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 高次径偏光ビームを用いた共焦点イメージングにおける偏光特性の検討, 応用物理学会東北支部第 71 回学術講演会, (2016)
- 24) 小澤祐市, ベクトルビームの発生と超解像イメージング, 東北大学附置研究所若手アンサンブルワークショップ, (2015)
- 25) 小澤 祐市, ベクトルビームを用いたレーザー顕微鏡における高空間分解能イメージング, 放射光学学会第 8 回若手研究会, (2015)
- 26) 光主 幸紀, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, ファイバー増幅器における径偏光ビームの偏光補償効果の検討, 第 76 回応用物理学会

- 秋季学術講演会, (2015)
- 27) 大町 弘毅, 中村 貴宏, 佐藤 俊一, フェムト秒レーザー誘起前方転写法によるクロムナノ構造体の直接形成, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, (2015)
- 28) 松永 大地, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 高次径偏光ビームのスーパーオシレーションによる生体試料イメージング, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, (2015)
- 29) 小澤 祐市, 阪下 良太, 佐藤 俊一, 軸方向電場を用いた共焦点イメージングにおける高空間分解能化, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, (2015)
- 30) 大町 弘毅, 中村 貴宏, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, レーザー誘起前方転写法を用いたナノ構造の位置選択的直接的造形と円環ビーム適用の検討, 第 70 回応用物理学会東北支部学術講演会, (2015)
- 31) 光主 幸紀, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 径偏光ビームの光ファイバー増幅における液晶型可変波長板の位相補償効果, 第 70 回応用物理学会東北支部学術講演会, (2015)
- 32) 松永 大地, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 差引法への適用を目的としたフラットトップビームの作製, 第 70 回応用物理学会東北支部学術講演会, (2015)

〔図書〕(計 1 件)

Kohei Otomo, Terumasa Hibi, Yuichi Kozawa, Sari Ipponjima, Shunichi Sato, Tomomi Nemoto, Super-Resolution Imaging in Biomedicine, Chapter 10 Super-Resolution Two-Photon Excitation Microscopy Utilizing Transmissive Liquid Crystal Devices, CRC Press, pp. 189-214, (2016)

〔その他〕

ホームページ等:

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/>
<http://satolab.tagen.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 俊一 (SATO, SHUNICHI)
 東北大学・多元物質科学研究所・教授
 研究者番号: 30162431

(2) 連携研究者

中村 貴宏 (NAKAMURA, TAKAHIRO)
 東北大学・多元物質科学研究所・准教授
 研究者番号: 50400429

小澤 祐市 (KOZAWA, YUICHI)
 東北大学・多元物質科学研究所・准教授
 研究者番号: 90509126

上杉 祐貴 (UESUGI, YUUKI)
 東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：60780682