

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 15 日現在

機関番号：32410

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610116

研究課題名(和文) 巨大な軌道角運動量の自由度をもつ原子ビームの生成法の開発

研究課題名(英文) Development of a production method for atom beams carrying huge orbital angular momentum

研究代表者

内田 正哉 (UCHIDA, MASAYA)

埼玉工業大学・付置研究所・教授

研究者番号：80462662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)： 研究の最終目標は、世界でも報告のない、波動関数(位相)の制御により「軌道角運動量をもつ原子ビーム」を生成することである。本研究では、その実現に必要な実験スキームを明らかにし、特殊な形状を有する回折格子等の光学素子の提案を行った。提案する光学素子の作製には、最先端の超微細加工技術、集束イオンビームを用いて試作に成功した。本研究は巨大な軌道角運動量の自由度をもつ原子ビーム生成実現への第一歩となるものである。

研究成果の概要(英文)： The final target of this study is, hitherto unreported, the generation of atom beams carrying orbital angular momentum (OAM) by controlling the phase of wavefunctions. Towards this goal, in this study we proposed some atom optical elements such as a forked diffraction grating. A prototype nanometer-sized forked diffraction grating has been designed with wave simulations and implemented using focused ion beam milling. The present results represent a first step toward atom beams with OAM.

研究分野： ビーム物理、超微細加工

キーワード： 原子ビーム 量子ビーム イオンビーム 軌道角運動量 ボルテックス 位相特異点 微細加工

## 1. 研究開始当初の背景

本研究代表者らにより、2010年、「軌道角運動量をもつ電子ビーム」が世界で初めて生成された(Nature, 2010)。この研究以前では、利用される電子ビームは軌道角運動量をもたない「平面波」のみであり、それ以外の伝播モードについての利用はもちろん、存知されることもなかった。実は、波動関数(位相)の制御による軌道角運動量をもつビームは、電磁波や音波などではすでに生成されていた(図1)。光の分野では、1992年に軌道角運動量をもつ光ビームの存在が確認され、現在では、物質をトラップし、回転させる光ピンセットなどを始め、天文学、情報通信等の幅広い分野で種々の応用がなされている。

原子(およびイオン)も波としての性質をもつが、波動関数(位相)の制御による軌道角運動量をもつ原子(イオン)ビームについては、これまで報告がなく、この実在を世界に先駆けて実験的に検証することは極めて重要な研究課題であると思われる。

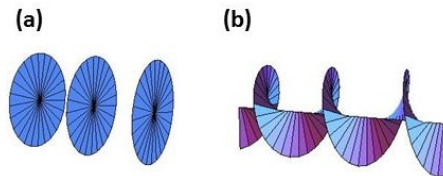


図1 (a)平面波波面, (b)軌道角運動量を与えるビーム波面。

## 2. 研究の目的

本研究の最終目標は、「軌道角運動量をもつ電子ビーム」の研究を踏まえ、世界で初めてとなる波動関数(位相)の制御による「軌道角運動量をもつ原子(イオン)ビーム」を生成することである。

現在まで、このような原子(イオン)ビーム生成に関する報告や技術はなく、本研究は多くの新たな開発を必要とする非常にチャレンジングな研究である。原子やイオンは電子スピンによるスピン角運動量および軌道角運動量を元来有しており、これらに伴う磁気モーメントもある。これらの性質は、シュテルン-ゲルラッハ実験を始め、原子(イオン)ビームをもちいる基礎研究・応用で重要な役割を担ってきた。原子(イオン)ビームに新たに軌道角運動量を付与することができれば、非常に有効なプローブとなりうる。また、軌道角運動量に伴う磁気モーメントも期待される。ここでの軌道角運動量は原子が元来有しているスピン角運動量や軌道角運動量の場合と異なり、人工的に大きな量を付与できるのが大きな特徴である。たとえば、光の場合では1光子あたり  $10000\hbar$  の、電子の場合では1電子あたり  $200\hbar$  の軌道角運動量をもつビームがすでに実現されている。本研究において軌道角運動量をもつ原子(イオン)

ビームが実現されると、その巨大な軌道角運動量ゆえ、材料科学分野等で多大な貢献をすることが期待される。特に、表面の磁性原子の解析や材料における軌道角運動量の役割の解明に役立つプローブとなるであろう。

本研究は原子(イオン)ビームの新しい空間伝播モードの創出、すなわち、原子(イオン)の波動関数(位相)を制御しようとする試みと捉えることもできる。この制御により、材料科学への応用のみならず、素粒子研究や物理基礎研究のための新しい量子プローブを創出することで、幅広い分野での新しい展開を与えることも期待される。

本研究では、まず、「軌道角運動量をもつ原子(イオン)ビーム」の生成および検出に必要な条件を明らかにし、実験スキームの構築、光学素子の提案・作製を目指した。

## 3. 研究の方法

本研究では、「軌道角運動量をもつ原子(イオン)ビーム」を生成するのに不可欠な原子ビーム用光学素子の提案および設計に対し、シミュレーションを含む詳細な検討を行う。実際の光学素子作製では集束イオンビーム(FIB)等の超微細加工技術を用いてそれら試作を目指す。

## 4. 研究成果

### (1) 光学素子の提案・設計

2010年に世界で初めて「軌道角運動量をもつ電子ビーム」が生成されてから、「軌道角運動量をもつ電子ビーム」を生成するための種々の方法が提案・実現されてきた。位相板、ホログラムの原理に基づく回折格子、スパイラルゾーンプレート、電磁場レンズ、光、モノポール型磁場等を用いた方法がある。光の場合も参考に、シミュレーションを含む詳細な検討を行い、ここでは2種類の光学素子が現状では適当であると考え、試作することにした。1つは光や電子の場合でも使われているホログラムの原理に基づく透過型回折格子(図2)である。結晶格子における刃状転位のように、縞が枝別れしているのが特徴である。この枝別れの数により回折ビームのもつ軌道角運動量が決まる。もう1つは、多角形スリット(図3)である。このような多角形スリットは、われわれの知る限り、電子はもちろん光の場合でも報告がない。円環スリットから出射したビームが軌道角運動量をもたないベッセルビームを形成するのに対し、多角形スリットの場合では位相特異点(ボルテックス)を含むビームを形成し、軌道角運動量をもつビームが得られることを見出した。このことはフレネル法に基づく数値シミュレーションによって得られた位相分布においても確認することができる(図4)。多角形スリットからのビームは、円環スリットにより形成されるベッセルビーム

の特徴である非回折性、自己修復性がある上、光学素子回折対称軸上でのビーム形成、スリット形状が簡単であることによる構造作製上の有利さもある。光学素子の大きさとしては、原子波のド・ブロイ波長が原子源の種類により pm から 1  $\mu\text{m}$  以上に渡るが、ビームコヒーレンスや実験制約上、できるだけ小さいナノサイズのものが望ましい。

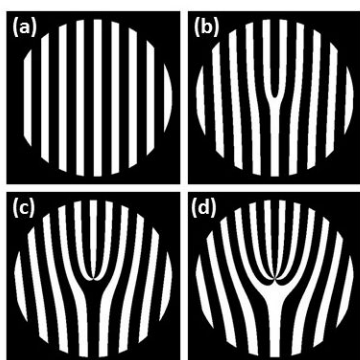


図2 計算機合成ホログラム法によって得られた 1 次の回折ビームに軌道角運動量( $m$ )を与える回折格子のパターン. (a)  $m=0$ , (b)  $m=1$ , (c)  $m=3$ , (d)  $m=5$ .

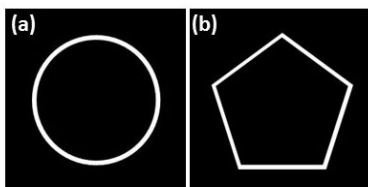


図3 (a) 軌道角運動量をもたないベッセルビームを生成する円環スリットパターン. (b) 軌道角運動量をもつベッセルビームを生成する五角形スリットパターン.

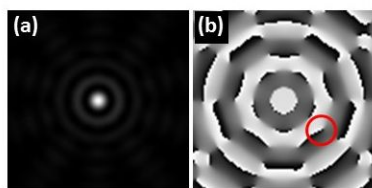


図4 正五角形スリットにより形成されるビームの光学シミュレーション結果. (a) 強度分布. (b) 位相分布. 位相分布図において丸で囲まれる位置等に位相特異点(ボルテックス)が観察される.

## (2) 光学素子の試作

回折格子およびスリットの作製は Pt を蒸着した窒化シリコン TEM 用メンブレンに、集束イオンビーム (FIB) 装置を用いて微細加工を施すことで行った。光学素子の評価は走査イオン顕微鏡(図5)、走査・透過電子顕微鏡、走査プローブ顕微鏡および光学顕微鏡

(図6、図7)を用いて行った。現在、20 から 30nm のピッチをもつ透過型回折格子の作製に成功している。また作製した光学素子をイオンビーム装置に組み込みイオンビーム照射のテスト実験も行った。

本研究により、「軌道角運動量をもつイオンビームの生成」に必要な基礎技術を一部ではあるが確立することができた。今後、さらに小さい光学素子を作製し、ビーム生成実現を目指す。

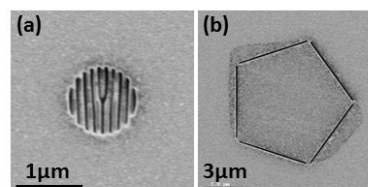


図5 FIB 作製した光学素子の走査イオン顕微鏡像. (a)  $m=1$  の回折格子, (b) 正五角形スリット.

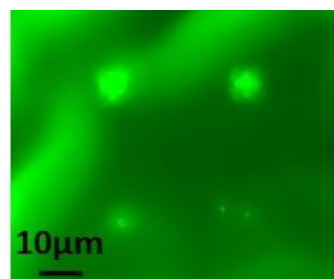


図6 単色光(波長 550nm)を用いて観察される回折格子 ( $m=1$ ) の透過観察像.

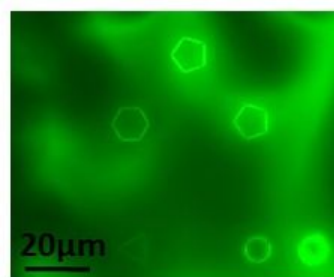


図7 単色光(波長 550nm)を用いて観察される多角形スリットの透過観察像.

## 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1件)

- 江夏耀慶, 内田正哉, “新しい変形ベッセルビームの生成に向けて”, 埼玉工業大学先端科学研究所 Annual Report 2014, pp.16-20 (2014).

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内田 正哉 (UCHIDA, Masaya)

埼玉工業大学・附置研究所・教授

研究者番号：80462662

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし