

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32410

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01884

研究課題名（和文）電子ビームの軌道角運動量測定法の開発およびその応用研究

研究課題名（英文）Development of electron beam orbital angular momentum measurement method and its application research

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） 10,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目標は、電子ビームのもつ軌道角運動量を測定する方法を開発し、その応用研究を行うことであった。まず、「ダムマン渦回折格子」ベースの測定器開発を行った（Noguchiら, Phys. Rev. Applied, 2019）。開発した「ダムマン渦回折格子」測定器は軌道角運動量スペクトルの同時取得が可能である。測定法の応用の一つとして、電子ビームがナノサイズ磁性針を通して生じる軌道角運動量の測定を行い、軌道角運動量スペクトルの測定に成功した。また、軌道角運動量をもつ電子ビームを入射ビームとして用いる収束電子線回折法を新規に提案し、実証した（Saitohら, Microscopy, 2022）。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は世界で初めて研究代表者が生成した電子ビームの軌道角運動量（Uchidaら, Nature, 2010）が、電子ビームに普遍的であることの実証に資する軌道角運動量測定器の開発および測定法の開発を行ったことである。さらに、電子の軌道角運動量の測定によって磁場分布などの種々の物理量の取得できること、応用に役立つことを実際に示したことである。本研究は電子ビームや電子顕微鏡での応用にとどまらず、光・中性子・原子、あるいは素粒子物理分野へも大きなインパクトを与えている点で社会的意義が大きいと思われる。

研究成果の概要（英文）：The goal of this research was to develop a method to measure the OAM of an electron beam and to conduct its application research. First, we developed a “Dammann vortex diffraction grating”-based detector (Noguchi et al., Phys. Rev. Applied, 2019). The developed “Dammann vortex diffraction grating” detector can simultaneously acquire OAM spectra. As one application of the measurement method, we measured the OAM generated by an electron beam passing through a nano-sized magnetic needle, and succeeded in measuring the OAM spectrum. We also proposed and demonstrated a novel convergent electron diffraction method using an electron beam with nonzero OAM as an incident beam (Saitoh et al., Microscopy, 2022).

研究分野：ビーム物理、超微細加工

キーワード：電子ビーム 量子ビーム 軌道角運動量 電子顕微鏡 波動関数 超微細加工

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者(内田)らは、2010年、「軌道角運動量をもつ電子ビーム」を世界で初めて生成した(Nature, 2010)。従来、材料分析や研究に利用されてきた電子ビームは、軌道角運動量をもたない「平面波」であった。内田らは位相板をもちいて、平面波の位相形状をらせん状にし、電子ビームに軌道角運動量を付与することを世界で初めて実現した(図1)。この発見を契機に、軌道角運動量をもつ電子ボルテックスビームの研究が世界中で急速に進められ、続々と研究成果が報告されていた。電子ビームの軌道角運動量が電子ビームにとって普遍的なものであることを実証するため、あるいは電子ビームの軌道角運動量を物性測定等にもちいるためには、軌道角運動量を測定する方法を開発する必要があった。たとえば、われわれの研究グループは世界で初めて1次元フォーク型回折格子による軌道角運動量測定法を開発した(Saitohら, Phys.Rev.Lett, 2013)。

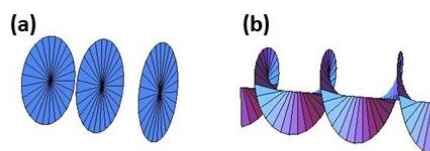


図1 : (a) 平面波波面, (b) 軌道角運動量をもつビーム波面.

2. 研究の目的

本研究代表者(内田)らは、内田らにより発見された電子ビームの新しい伝播モードである「軌道角運動量をもつ電子ボルテックスビーム」の先駆的研究を踏まえ、波動関数(位相)の制御による「電子ビーム波動関数の操作による革新的ビーム制御技術の創成」

(科研費基盤研究(B)H26~H29)に挑んできた。本研究課題では、生成法の確立に続き、「電子ボルテックスビームの軌道角運動量の測定法の開発およびその応用研究」を行う。電子ビームの軌道角運動量測定技術により、光電子を含む真空中軌道角運動量を測定できるようになり、「物性を見る」「位相イメージング」「物理基礎研究」などに役立つ新しい量子測定器として、広い分野での波及効果が期待される。

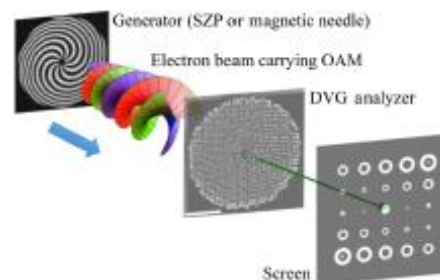
3. 研究の方法

電子ビームの軌道角運動量測定技術は生成法と同じく極めて重要である。電子ボルテックスビームの生成技術を逆にもちいれば軌道角運動量を測定することができる。これまで、本研究代表者(内田)らは、1次元フォーク型回折格子を用いて電子ボルテックスビームの軌道角運動量測定方法を提案し、測定が可能であることを実証している(Saitohら, PRL, 2013)。研究目的の達成には、軌道角運動量成分の同時取得(すなわち、軌道角運動量スペクトル取得)ができる測定器が欠かせない。電子ビームの軌道角運動量スペクトルを測定することで、たとえば、ナノ領域の磁性状態を知ることができるようになる。具体的研究方法は以下のとおりである。

3-1. 「ダンマン渦回折格子」ベースの測定器

(Noguchiら, Phys. Rev. Applied, 2019等)

(a) 「ダンマン渦回折格子」ベース測定器の設計および作製：われわれの研究グループが世界で初めて開発した1次元フォーク型回折格子による軌道角運動量測定法(Saitohら, Phys.Rev.Lett, 2013)を2次元回折格子に拡張した「ダンマン渦回折格子」を提案し、これをベースにした測定器開発を行った。開発した「ダンマン渦回折格子」測定器は $-10 h/2\pi$ から $+10 h/2\pi$ に渡る軌道角運動量スペクトルの取得が可能である。また測定に関わる解析手法、ソフト等も整備し、本手法による軌道角運動量の測定法を確立した。「ダンマン渦回折格子」の設計には、開発した波動伝播シミュレーションも併用して進めた。作製は集束イオンビーム(FIB)をもちいた超微細加工技術によって行った。作製した「ダンマン渦回折格子」を透過型電子顕微鏡に搭載し、2次元検出器をもちいて測定器の性能評価を行った(図2)。



(b) 「ダンマン渦回折格子」ベース測定器をもちいた応用(ナノサイズ磁性体を通った電子ビームの軌道角運動量スペクトル測定)：平面波電子(軌道角運動量ゼロ)が不均一な分布をもつ電場あるいは磁場を通ると、軌道角運動量がゼロでない電子が生成される。ここでは、ナノサイズの磁性針および磁性針が作る磁場によって生じる電子の軌道角運動量およびスペクトルを「ダンマン渦回折格子」ベースの測定器によって測定した。

図2 : 軌道角運動量スペクトル取得のための実験配置図. ダンマン渦回折格子(DVG analyzer)の後方スクリーンにリング状強度分布をもつ回折パターンが得られる.

3-2. 電場型軌道角運動量測定器の設計および作製

(a) 電場印加ホルダーの作製：電場を用いて電子ビームの位相を制御することで、軌道角運動量電子の生成のみならず測定もすることができる。透過型電子顕微鏡に搭載できる電場印加ホルダーの開発・評価を行った（図3(a)）。

(b) 電場分布制御用デバイス：金属線に電位を印加することで、電場分布の制御を目指した。実際のテストデバイスはSiN上金薄膜にFIB加工をすることによって作製した（図3(b)）。

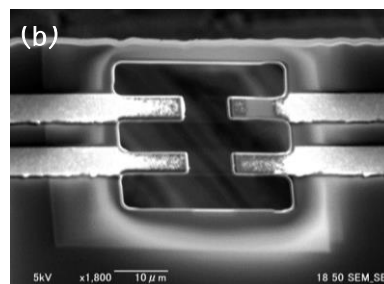


図3：(a) 開発した透過型電子顕微鏡用電場印加ホルダー。(b) 電場分布制御用ナノデバイス。

3-3. 軌道角運動量分解収束電子線回折 (CBED) 法の提案

および実証実験：入射電子ビームとして軌道角運動量をもつ電子ビームをもちいて収束電子線回折(CBED)パターンを得ると、たとえば、結晶のカイラル対称性を識別することができる。本研究ではナノサイズのピンホールをFIBで作製し、作製したピンホールを透過型電子顕微鏡内試料の後方に置き、回折ビームを選択することで、軌道角運動量で分解したCBEDパターンを得た（図4）。

4. 研究成果

論文とし纏められている主な研究成果は以下の2つである。

(1) 世界で初めての「ダンマン渦回折格子」ベースの測定法の開発

(Noguchi ら, Phys. Rev. Applied, 2019 等)

開発した「ダンマン渦回折格子」によって軌道角運動量および軌道角運動量が定量性に取得できることを世界で初めて示し、磁性体試料の場合に応用した。これらの成果は国際誌論文として纏められ、国内外から多くの反響がある。

(2) 世界で初めての軌道角運動量分解収束電子線回折 (CBED) 法の提案および実証実験 (Saitoh ら, Microscopy, 2022)

軌道角運動量をもつ電子ビームをもちいた収束電子線回折 (CBED) パターンを観察するための新しい方法を提案した。本研究は手法の提案および実証実験で、試料としてはシリコン結晶だけであった。今後、カイラル結晶をはじめとする種々の結晶への適用が多いに期待される。

(3) まとめと今後の課題

本研究において、電子ビームの軌道角運動量の測定器の開発を行った。開発した測定器をもちいて軌道角運動量および軌道角運動量スペクトルを定量的に効率的に取得できることを示した。本研究を含めた関連研究の進展によって、電子ビームの軌道角運動量は特異な状態ではなく、測定されていなかっただけで、測定可能な「ありふれた物理量」であることが明らかになった。軌道角運動量測定法について、われわれは回折格子をもちいる方法を提案しているが、ピンホールや電場や磁場を使う方法なども提案されており、今後も軌道角運動量測定器の開発を引き続き行っていく必要がある。当初目標の「物性を見る」「位相イメージング」「物理基礎研究」などの応用研究は道半ばであるが、開発した軌道角運動量測定法によって大きく前進するものと考えている。

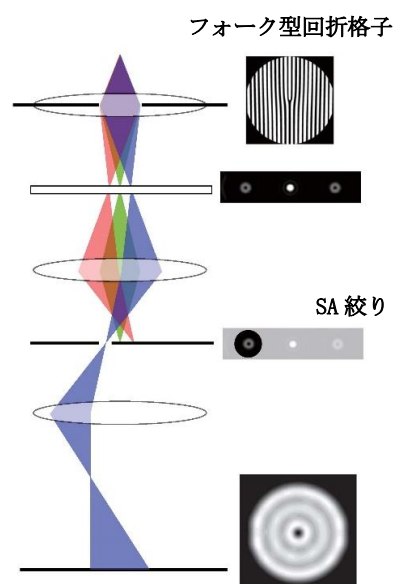


図4：軌道角運動量分解収束電子線回折 (CBED) パターンを得るための実験配置図。フォーク型回折格子によって軌道角運動量をもつ電子ビームを生成し、試料に入射する。試料後方に置いたナノサイズのSA絞りによって軌道角運動量別のCBEDパターンを選別する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Noguchi Yuuki, Nakayama Shota, Ishida Takafumi, Saitoh Koh, Uchida Masaya | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Efficient Measurement of the Orbital-Angular-Momentum Spectrum of an Electron Beam via a Dammann Vortex Grating | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Applied | 6. 最初と最後の頁 64062 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.12.064062 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Saitoh Koh, Yonezawa Tatsuya, Nambu Hiroki, Tanimura Shogo, Uchida Masaya | 4. 巻 71 |
| 2. 論文標題 Orbital angular momentum-resolved convergent-beam electron diffraction by the post-selected injection of electron beam | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Microscopy | 6. 最初と最後の頁 374 ~ 379 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfac046 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 米澤龍哉, 齋藤 晃, 内田正哉 |
| 2. 発表標題 半平面状試料を透過した電子線の軌道角運動量解析 |
| 3. 学会等名 日本顕微鏡学会第77回学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Saitoh, W. Li and M. Uchida |
| 2. 発表標題 Orbital angular momentum spectrum measured by forked gratings and its relation to angular Fourier transform |
| 3. 学会等名 Microscopy Conference 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 (1)Y. Noguchi, K. Saitoh, and M. Uchida |
| 2. 発表標題 Measuring the orbital angular momentum spectrum of electron beams using a Dammann vortex grating |
| 3. 学会等名 19TH INTERNATIONAL MICROSCOPY CONGRESS (Sydney) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 齋藤 晃, 野口雄紀, 内田正哉 |
| 2. 発表標題 2次元ダンマン渦渦回折格子をもちいた軌道角運動量測定 |
| 3. 学会等名 日本顕微鏡学会第74回学術講演会 (久留米市) |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-----------|--|---|----------|
| 研究 分担者 | 齋藤 晃 (Saitoh Koh) (50292280) | 名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授 (13901) | |
| 研究 分担者 | 桑原 真人 (Kawahara Masato) (50377933) | 名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授 (13901) | 2018年度のみ |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|