

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：82110

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610080

研究課題名(和文)軌道角運動量の自由度を持つ新規伝播モード中性子ビームの生成法の開発

研究課題名(英文)Development of generation of neutron beam with new propagation mode

研究代表者

久保田 正人(KUBOTA, Masato)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号：10370074

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):電磁波や音波などにおいて、平面波ではない特殊な伝播モードを生成・制御することは、学術的な意義深さだけでなく、応用面でも注目を浴びている。中性子も波としての性質をもつが、軌道角運動量をもつ中性子ビームの生成については、これまで報告がなく、その可能性について検証することが重要である。軌道角運動量を持つ中性子ビームの生成するための特殊マスクを設計および作製した。また、作成した特殊マスクの観察を行い、微細加工における知見を得た。

研究成果の概要(英文):It is significant to generate and control a peculiar propagation mode for electromagnetic wave and sound wave etc. in terms of academic and/or applicable points of view. Because neutron beam possesses characteristics of wave, it is important to examine the possibility of the generation of new propagation mode of neutron beam. In this study, to realize new propagation mode of neutron beam, we designed and fabricated the peculiar mask. By observing the mask, we obtained the knowledge of the micromachining.

研究分野：固体物性

キーワード：微細加工

1. 研究開始当初の背景

電磁波や音波などにおいて、平面波ではない特殊な伝播モードを生成・制御することは、学術的な意義深さだけでなく、応用面でも注目を浴びている。例えば、光分野では、1992年にオランダのグループにより特殊な伝播モードを示す光ビームの存在が確認され、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。中性子や電子といった粒子も量子力学的には、物質波として扱えるので、同様の現象を観測することは、原理的に可能である。電子線分野では、これまで電子ビームは軌道角運動量をもたない「平面波」であり、それ以外の伝播モードについては認知されていない状況であった。しかし、最近電子ビームの新しい空間伝播モードが初めて知られることとなった。中性子も波としての性質をもつが、軌道角運動量をもつ中性子ビームの生成については、これまで報告がなく、その可能性について検証することが重要である。スピン角運動量の大きさを定量的に導出可能な現有の中性子偏極解析技術を組み合わせることにより、物質内の磁性情報を詳細に抽出することが可能となると期待される。

2. 研究の目的

中性子は、1) 深く埋もれた界面へのアプローチ、2) 軽元素の識別、3) 異なる同位体の識別、4) 磁化ベクトルの深さ方向分布の同定が可能といった特徴を持つので、これまでの電磁波などで示された伝播モードとは異なる特性を持つことが期待される。また、中性子は、透過力が大きいので、バルク全体の物性評価を行うことができる。本研究では、特殊な伝播モードを持つ中性子ビームの生成を行うために有用な中性子ビームに適したマスクおよび光学系の開発を目指した。

3. 研究の方法

軌道角運動量をもつ中性子ビームの生成のために、ホログラフィーの原理を応用した回折格子の作成を試みた。代表的な形状パターンの一つがフォーク型回折格子である。電子ビームの場合、同様な回折格子を作製し、軌道角運動量をもつ電子ビームの生成に成功している。電子ビームでの研究をベースに、中性子ビームに適した回折格子および光学系を作製することとした。回折格子の形状パターンを設計することで、ビームのモード、すなわち波動関数を制御したビームを生成することができる。回折格子の形状の設計には、波動伝播シミュレーションも併用して進めた。

特殊マスクの設計において、ガドリニウム金属材料にアスペクト比が大きい微細加工を行う手法は、あまり知られていなかった。今回、半導体デバイス加工に広く利用されているFIB装置を用いて、アスペクト比が大きい特殊マスク(ガドリニウム製)の微細加工を行うこととした。マスクの設計は、大きさが $10\mu\text{m}$ であり、 $1\mu\text{m}$ 幅の湾曲ラインで構成されている。文部科学省のナノテクノロジープラットフォームである東北大学ナノテク融合技術支援センターの技術支援を受け、ナノテク融合技術支援センターにおいて、FIB微細加工作業、並びに走査型電子顕微鏡を用いて作製マスクの観察を行った。走査型電子顕微鏡では、サンプルを細かく切断しなければいけない、観察まで時間がかかる、高さや粗さの測定ができないといった困難な点がある。一方、3Dレーザー顕微鏡はこれらの困難を克服した装置であり、微細箇所の表面形状観察を得意としているので、更に3Dレーザー顕微鏡を用いてFIB微細加工したサンプルの観察も行った。

4. 研究成果

材料の選定やマスクパターンの形状や大きさを決定し、素材は、ガドリニウムを利用することとした。また、加工作業を効率的に行うためには、アルミ板フレームにガドリニウムを取り付けることが有効であるとの見通しが立ったので、両者を装着させた部材を製作することとした。アルミ板フレームの大きさは、 $15\text{mm}\times 15\text{mm}$ (厚さ 1mm)であり、中心部に $1\text{mm}\phi$ の通し穴が空けてある。厚さ $50\mu\text{m}$ のガドリニウム板をこの通し穴の上に取り付けた。

続いて、微細加工スピード・駆動モードやビームサイズなどを検討し、集束イオンビーム加工装置(FIB)装置により作成したマスクの観察評価を行った。

集束イオンビーム加工

FIB装置を用いたガドリニウム板上への微細加工の製作手順は、以下の通りである。今回は、マスクの大きさなどの微細加工条件を変えて、3種類のマスクを作成した(A, B, C sample)。

A sample

1) 予め、ガドリニウム板の中心部の直径 $10\mu\text{m}$ の領域の厚さを $20\mu\text{m}$ にまで薄くしておいた。

2) 上記のガドリニウム板をアルミ板フレームに接着させた後、電気的コンタクトを取るために、カーボンテープを側面に貼る。これにより、チャージアップを防ぐことが可能と

なる。

3) FIB 装置の加工台の上に、2)の状態に準備したアルミ板フレームに固定したガドリニウム板をサンプルホルダーの上にセットした。

4) カーボンを $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ のエリアについて、 $2\mu\text{m}$ 厚にデポした。その時にスピードは、 $0.5\mu\text{sec/dot}$ であった。

5) FIB 微細加工スタート。最初は、 $5\mu\text{m}$ の深さを試し掘りした。(仕上げモード $20\mu\text{sec/dot}$ 片方向掘り。)

6) 続けて $5\mu\text{m}$ ずつの追加掘りを更に 8 回行った。追加掘りを複数回に分けて、その都度、ビームの並進ずれなどが無いかの確認を行った。FIB 微細加工モードは、5)と同一条件。(仕上げモード $20\mu\text{sec/dot}$ 片方向掘り。)

B sample

続いて、より小さい大きさの特殊マスクを作ることにした。

1) 直径 $8\mu\text{m}$ の領域をガドリニウム板の中心部に作製するために、厚さを $20\mu\text{m}$ にまで薄くした。

2) カーボンテープを側面に貼り、上記のガドリニウム板をアルミ板フレームに接着させた。

3) ガドリニウム板を FIB 装置の加工台の上にセットした。

4) カーボンを $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ のエリアについて、 $2\mu\text{m}$ 厚にデポした。デポレートは、 $0.5\mu\text{sec/dot}$ であった。

5) FIB 微細加工スタート。最初は、 $5\mu\text{m}$ の深さを試し掘りした。仕上げモードとして、 $20\mu\text{sec/dot}$ 片方向掘りを行った。続けて $5\mu\text{m}$ ずつの追加掘りを 7 回行った。但し、FIB 微細加工モードは、すべて同一条件で実施した。

C sample

更に、追加掘りの回数や厚さ、カーボンの照射エリアの条件を変えて、FIB 微細加工を実施した。

1) B sample と同様に、予め、ガドリニウム板の中心部の直径 $8\mu\text{m}$ の領域の厚さを $20\mu\text{m}$ にまで薄くしておいた。

2) 上記のガドリニウム板をアルミ板フレイ

ムに接着させた後、電気的コンタクトを取るために、カーボンテープを側面に貼った。

3) FIB 装置の加工台の上にガドリニウム板を固定した。更に、その上からカーボンを $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ のエリアについて、 $0.5\mu\text{sec/dot}$ のデポレートで $2\mu\text{m}$ の厚さにデポした。

4) FIB 微細加工スタート。最初は、 $30\mu\text{m}$ の深さを試し掘りした。(仕上げモード $20\mu\text{sec/dot}$ 片方向掘り。)

5) 最後に、 $5\mu\text{m}$ の追加掘りを行った。FIB 微細加工モードは、4)と同一条件であり、仕上げモードには、 $20\mu\text{sec/dot}$ 片方向掘りを採用した。

A sample のマスクの大きさは、 $10\mu\text{m}\phi$ 、B, C sample のマスクの大きさは $8\mu\text{m}\phi$ である。また、FIB による加工を制御するためにカーボンのデポする領域もマスクの大きさにより変更した。

A, B sample の微細加工中には、追加掘りごとに観察を行った。これに対して、C sample においては、微細加工と観察の切り替えによるビームのフォーカルポイント位置の影響を最小限にするために、最終追加掘りが終了時点でのみ観察を行った。

マスク観察評価

FIB 加工で製作した特殊マスクを走査型電子顕微鏡 (scanning electron microscope; SEM) を用いて、微細加工状態の観察を 3 つのサンプル (A, B, C sample) について行った。観察時における電場印加条件は、 $5\text{kV} * 31\mu\text{A}$ であった。

SEM で捉えた画像情報から、湾曲ラインどうしの間隔は、設計通り約 $1\mu\text{m}$ 幅で作成されていることが明らかとなった。一方、3D レーザ顕微鏡を用いた測定では、SEM 観察で一樣な高さに見えた湾曲ラインが、局所的には凸凹していることを明らかにした。しかし、レーザー光のプロブ径が $0.5\mu\text{m}$ 程度のため、正確な掘削深さを正確に評価することは困難であった。特に、深くなるに連れて、奥の方までは、矩形上に掘り進められていないことが、観察像から明らかになった。ラインが 2 つに分かれる接合部では、表面が荒れ、非常にもろい構造となっていた。要因としては、アスペクト比が 1:20 と大きいことが挙げられ、掘ったガドリニウムが側面に堆積し、FIB ビームにより加工を少なからず阻害しているためであると考えられる。また、半導体 Si 板と異なり、ガドリニウム素材の加工スピードの適正値をより正確に見出す必要

があると思われる。

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)

Hirotooshi Hayashida, Masayasu Takeda, Dai Yamazaki, Ryuji Maruyama, Kazuhiko Soyama, Masato Kubota, Tazuko Mizusawa, Noboru Yoshida, Yoshifumi Sakaguchi,

Design and Demonstration of a Neutron Spin Flipper for a New Neutron Reflectometer SHARAKU at J-PARC,

Physics Procedia, 42 (2013) 130-135.

[学会発表] (計 2 件)

1)

発表者 ; 久保田正人、山田 浩之、澤 彰仁、中尾 裕則、村上 洋一

発表題目 ; 量子ビームを用いた超格子マンガン酸化物薄膜の磁性研究

発表学会 ; 日本物理学会

発表日時 ; 2015 3/21-3/24

発表場所 ; 東京

2)

発表者 ; 久保田正人、山田 浩之、澤 彰仁、中尾 裕則、村上 洋一

発表題目 ; 超格子マンガン酸化物薄膜の表面・界面磁性

発表学会 ; 中性子科学会

発表日時 ; 2014 12/11-12/12

発表場所 ; 札幌

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保田 正人 (KUBOTA Masato)

独立行政法人

日本原子力研究開発機構

原子力科学研究部門

量子ビーム応用研究センター

研究副主幹

研究者番号 : 10370074

(2) 研究分担者

内田 正哉 (UCHIDA Masaya)

埼玉工業大学・付置研究所

准教授

研究者番号 : 80462662