

機関番号：82110

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760711

研究課題名（和文） 超低散漫散乱スーパーミラーのための多層膜界面構造の研究

研究課題名（英文） Study on multilayer interface structure for neutron supermirror with low diffuse intensity

研究代表者

丸山 龍治 (MARUYAMA RYUJI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・研究員

研究者番号：90379008

研究成果の概要（和文）：中性子集光小角散乱法の確立の為に Ni/Ti 中性子スーパーミラーの多層膜界面構造に関する基礎研究を行った。その結果、界面酸化により運動量遷移の高い領域において高次ピークの中性子反射率が1桁程度高くなることがわかり、多層膜界面構造の改善が示唆される結果が得られた。今後、多層膜構造の解析を更に詳細に進めることが課題である。

研究成果の概要（英文）：Study on multilayer interface structure of neutron supermirror has been performed for the realization of neutron focusing small angle scattering measurement. The technique oxidizing Ni and Ti layers showed an increase in neutron reflectivity by one order of magnitude in the momentum transfer region higher than  $3 \text{ nm}^{-1}$ . This implies that the multilayer structure is improved by the oxidation technique. Further studies on the multilayer interface structure are needed to understand the oxidation effect.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：放射線工学・ビーム科学

## 1. 研究開始当初の背景

生体高分子の機能解明には生体を構成する巨大分子の構造解析を行うことが重要である。これらの物質の特徴的な構造は通常の小角散乱では測定が難しい極小角領域に現れる為、上記課題には高性能中性子集光スーパーミラーを用いた中性子集光小角散乱法が有効である。しかし、集光スーパーミラーからの反射ビームには入射角と反射角が等しくない散漫散乱成分が含まれ、これは集光小角散乱法においては試料からのシグナルに

対するノイズとなる為、未だ集光小角散乱法の確立には至っていない。上記のような測定を行う場合には、散乱強度の十分大きな試料を選ぶか、入射中性子ビームの発散角を極端に絞って測定を行うのが現状である。

## 2. 研究の目的

タンパク質の機能発現メカニズムの解明に有効な中性子集光小角散乱法の確立には、集光スーパーミラーからの散漫散乱強度を小さく抑えることが重要である。当該申請者ら

は、多層膜の界面粗さの面内相関長が小さく、面間相関長が大きい多層膜の導入により散漫散乱強度を鏡面反射ピークに対して $10^{-5}$ 以下に抑えられることを実証した。今研究ではこれをさらに発展させ、様々な界面構造の制御法に対して多層膜界面構造を評価することにより、中性子集光小角散乱法の確立に向けた基礎研究を実施することを目的とする。

## 2. 研究の方法

(1)中性子非偏極スーパーミラーはニッケルとチタンを層厚を少しずつ厚くしながら交互に積層させた多層膜である。多層膜成膜の際にニッケル層を1層成膜するごとに成膜室内に少量の酸素（分圧約 $1 \times 10^{-3}$  Pa）を導入することによる界面酸化法に取り組む。この方法では界面近傍層を酸化することにより界面拡散が抑えられる効果が期待される。この成膜方法で成膜されたNi/Ti多層膜に対してX線及び中性子反射率を測定することにより多層膜界面構造の評価を行う。

(2)本研究を進める過程において、Fe/Ge多層膜等の中性子偏極スーパーミラーの高性能化に関する研究を進めた。中性子偏極スーパーミラーを実際の偏極中性子散乱実験で利用するには、低い外部磁場で高い中性子偏極性能が得られることが重要である。Fe/Si、Fe/Ge等の組み合わせの多層膜が中性子偏極ミラーとしてよく用いられるが、Fe/Ge多層膜の界面に薄いSi層を積層させて得られるFe/Si/Ge/Si多層膜では中性子偏極性能を得る為に必要な外部磁場が低く抑えられることが知られている。このメカニズムを解明する為にFe/Si、Fe/Ge、Fe/Si/Ge/Si多層膜に対して中性子偏極反射率、磁化、応力測定を行った。

## 4. 研究成果

(1)中性子スーパーミラーを構成する層厚範囲内である1対層が10 nmのNi/Ti多層膜の

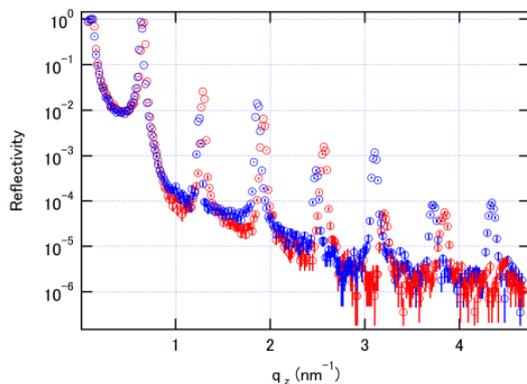


図1：界面酸化を行った試料（青）と行わない試料（赤）の中性子反射率測定結果。運動量遷移の大きい領域で高次ピーク反射率が1桁以上向上する。

成膜を上記の界面酸化法を用いて行った。成膜された多層膜のX線反射率を測定したところ、界面酸化しない多層膜に対して運動量遷移の大きい領域において高反射率化されることがわかった。さらに、これらの多層膜の中性子反射率を測定したところ、 $3 \text{ nm}^{-1}$ 以上の運動量遷移領域において多層膜からの高次ピーク反射率が1桁近く向上することが示された。これらの結果は、平均界面粗さ等の多層膜界面構造が改善されたことを示唆しており、中性子集光小角散乱法のみならず $0.1 \text{ nm}$ 以下の短波長の輸送及び集光等への応用が期待される。今後、X線及び中性子の反射率のみならず中性子散漫散乱測定等と組み合わせて多層膜構造の解析を更に詳細に進めることが課題である。

(2)中性子偏極スーパーミラーの高性能化に関する研究を進めた。Fe/Si、Fe/Ge、Fe/Si/Ge/Si多層膜に対して中性子偏極反射率、磁化、応力測定を行った結果、中性子偏極性能を得る為に必要な外部磁場の大きさは膜応力の大きさに依存し、成膜において膜応力を減少させることの重要性が示された。さらに、これらの多層膜に対してXPS測定を行った結果、Fe/Si/Ge/Si多層膜ではSiが

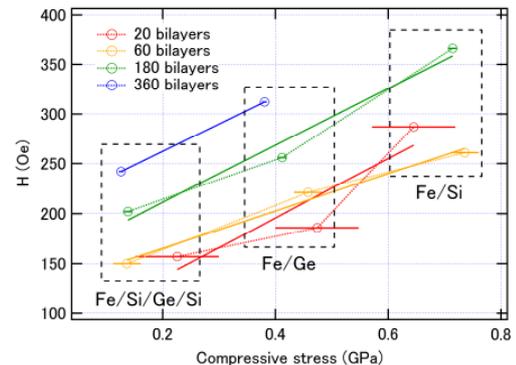


図2：各々の多層膜について中性子偏極性能を得る為に必要な外部磁場と膜応力との関係。膜応力を減少させることにより中性子偏極性能を得る為に必要な外部磁場が小さく抑えられる。

Ge層全体に分布していることがわかった。SiとGeとは比率によらず固溶体を形成することが知られており、これが膜応力の蓄積を妨げているのではないかと考えられる。

## 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0件）

〔学会発表〕（計2件）

- ① R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, and K. Soyama, Effect of interfacial roughness correlation on diffuse intensity in a neutron supermirror, The 10th international conference on the physics of x-ray multilayer optics, Big Sky, Montana, US, Feb. 2010.
- ② 丸山龍治、山崎大、岡安悟、海老澤徹、曾山和彦、イオンビームスパッタ法を用いた中性子偏極スーパーミラーの開発、日本原子力学会 2010 年秋の大会、北海道大、2010 年 9 月

[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]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

丸山 龍治 (MARUYAMA RYUJI)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・  
J-PARC センター・研究員  
研究者番号：9 0 3 7 9 0 0 8

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

山崎 大 (YAMAZAKI DAI)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・  
J-PARC センター・研究副主幹  
研究者番号：8 0 3 9 1 2 5 9

曾山 和彦 (SOYAMA KAZUHIKO)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・  
J-PARC センター・研究主幹  
研究者番号：9 0 3 4 3 4 1 2