文部科学省

「量子ビーム基盤技術開発プログラム」シンポジウム 2012年12月3日 東京秋葉原UDXギャラリーNEXT

軟X線の高速偏光制御による機能性材料の探究と創製

高エネルギー加速器研究機構 雨宮健太

1. プロジェクトの概要 2. これまでの成果 (1) 高速偏光スイッチングの開発 (2) スピントロニクス材料の解析と探索 (3) 表面化学反応のリアルタイム追跡

3. まとめと今後の展開

本プロジェクトで行う技術開発



(2) ロックイン法による極微小な二色性シグナルの検出



 円二色性: 左右円偏光に対するシグナルの差 直流(DC)測定では 1%程度が検出限界
 偏光の交流スイッチング(AC) ⇒ 10⁻⁴-10⁻⁵の円二色性・線二色性の観測
 スイッチング用波数: 40 日本確実に実現

スイッチング周波数: 10 Hzを確実に実現

(3) 偏光依存リアルタイム位置分解分光法の開発 偏光スイッチングを活かした新しいアイディア diffraction grating Exit Slit $f \cap \mathfrak{g}$ Exit Slit $f \cap \mathfrak{g}$ $f \cap \mathfrak{g}$ f

利用研究(1): スピントロニクス材料の解析と探索

強相関電子系物質

多様な物性, 複雑な相の競合 相転移近傍の臨界現象

希薄磁性半導体

室温で強磁性が発現→応用へ 強磁性の起源の解明



トンネル磁気抵抗→デバイスに直結 界面の磁気的・化学的状態



元素選択的なスピン・軌道モーメント 元素・軌道選択性 の定量(異方性も含めて決定) nmオーダーの電荷・磁気秩序 原子層レベルの深さ分解能 界面の磁性を直接観察

強力な実験手法 を駆使した磁気特性の起源の解明 材料開発の豊富な経験と実績を活かした新奇物質の創製

利用研究(2):表面化学反応のリアルタイム追跡

化学反応中の表面は不均一かつダイナミック ⇒ 場所ごとの化学種の種類,量,構造が時々刻々と変化 繰り返しが困難 ⇒ 一度のイベントでリアルタイム測定する必要



NO + N → N₂O 反応の追跡

NO無害化触媒の反応素過程: NO + N \rightarrow N₂O \rightarrow N₂ + O



d)

Rh(111)上における

A. Schaak, J. Chem. Phys. 116 (2002) 9021.

> N の 領 域

NOとH。の反応

1. プロジェクトの概要 2. これまでの成果 (1) 高速偏光スイッチングの開発 (2) スピントロニクス材料の解析と探索 (3) 表面化学反応のリアルタイム追跡

3. まとめと今後の展開

技術開発: 高速偏光スイッチングの開発



K. Tsuchiya et al., J. Phys. Conf. Ser., in press. K. Amemiya et al., J. Phys. Conf. Ser., in press.



10 Hzでの左右円偏光, および 縦横直線偏光のスイッチング を実現

XMCD(円偏光利用),および 波長分散XAFS(直線偏光利用) について利用実験を実施 技術開発: 超高感度XMCD測定法の確立

未発表データ

10 Hz偏光のスイッチングを用いて, 10⁻⁴以下のノイズレベルを実現

1. プロジェクトの概要 2. これまでの成果 (1) 高速偏光スイッチングの開発 (2) スピントロニクス材料の解析と探索 (3) 表面化学反応のリアルタイム追跡

3. まとめと今後の展開

研究成果: 磁気異方性の解明と制御

磁気異方性: どちら向きの磁石になりやすいか



単純に磁気モーメント同士の電磁気学的な相互作用を考えると 長辺方向に向いた方が有利 ⇒ 「形状磁気異方性」

ところが...

原子レベルの材料設計による, 軌道磁気モーメントの異方性の制御 ⇒ 垂直磁化の実現が可能に

L1₀型規則合金の利用



L1₀型規則合金:Fe-Pt

 $K_{\rm u}=3.0\times10^7$ (erg/cm³) 強い垂直磁気異方性

T. Shima et al., Appl. Phys. Lett. 80 (2002) 288.

レアメタル代替材料: Fe-Ni

Fe-Ni多層膜において強い垂直磁気異方性を実現したい

XMCDによる磁性の観察

X-ray Magnetic Circular Dichroism (X線磁気円二色性):

左右の円偏光でX線吸収強度が違う現象



- 1. <mark>元素選択性</mark> どの元素(Fe, Ni, Co…)が 磁化を担っているのか
- 2. スピン, 軌道磁気モーメントが求まる どれだけの磁化を持っているか 異方性がどれほどあるのか

軌道磁気モーメントは磁気異方性に決定的な影響を与える ⇒ 磁気異方性を解明するにはXMCDがきわめて有効

深さ分解XMCDによるFe/Ni界面の観察



M. Sakamaki and K. Amemiya, Appl. Phys. Express 4 (2011) 073002.

未発表データ

格子 歪みと Fe/Ni界面の磁気異方性の関係

M. Sakamaki and K. Amemiya, submitted to Phys. Rev. B.

未発表データ

Feの磁気異方性エネルギーは面内方向の格子定数 a に

大きく依存するが、Niはあまり依存しない

垂直磁気異方性を実現するには,

Felc面内方向に圧縮するような歪みを与えることが有効

- (1) APEX **4** (2011) 073002.
- (2) JMMM **206** (2006) 86.
- (3) PRB **63** (2001) 144409.

格子歪みを利用した磁気異方性の制御

未発表データ

圧縮歪みによって 面直磁気異方性を増強させることに成功!!

1. プロジェクトの概要 2. これまでの成果 (1) 高速偏光スイッチングの開発 (2) スピントロニクス材料の解析と探索 (3) 表面化学反応のリアルタイム追跡

3. まとめと今後の展開





研究成果: Ir(111)表面におけるCO酸化反応のリアルタイム追跡

未発表データ

技術開発:時間分解偏光依存XAFS法の開発

偏光スイッチングの新たな活用法

水平・垂直偏光のスイッチングと波長分散XAFSの組み合わせによって、 分子の配向情報をリアルタイム観察



33 msごとに連続測定

Amemiya et al., Appl. Phys. Lett. **99** (2011) 074104.

吸着に伴う<mark>配向変化</mark> (入射角・偏光固定)



Amemiya et al., J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **124** (2002) 151.

技術開発:時間分解偏光依存XAFS法の開発

波長分散XAFS+水平・垂直偏光スイッチング



NO分子のlr(111)表面 への吸着過程

偏光依存性(分子の配向)を 1 Hzでリアルタイム観察



研究成果: 分子吸着過程における配向変化のリアルタイム追跡

K. Amemiya et al., Appl. Phys. Lett., 101 (2012) 161601.



吸着が進むにつれて分子の傾き(の平均値)が増加

技術開発: リアルタイム位置分解分光法の開発



技術開発: リアルタイム位置分解分光法の開発



時間分解能 <50 msにおいて位置分解能 <500 nmを確認

波長分散モード



X線エネルギー

10 Hz 偏光スイッチング



Ni/Cu(1.1.13)

技術開発: リアルタイム位置分解分光法の開発



1. プロジェクトの概要 2. これまでの成果 (1) 高速偏光スイッチングの開発 (2) スピントロニクス材料の解析と探索 (3) 表面化学反応のリアルタイム追跡

3. まとめと今後の展開

技術開発のまとめ



今後の展開(1) 界面におけるスピンダイナミクスの観察と制御

より高速,低消費電力のメモリを目指して

е



Magnetic Random Access Memory (MRAM) Spin switching by <u>electric current</u>: <u>Spin precession</u> Time scale (at present): ~ ns

Observation and control of spin dynamics especially at the interface -> Time & depth-resolved XMCD

Faster spin switching with lower current

$$\frac{d\vec{M}_2}{dt} = \gamma \vec{M}_2 \times \vec{H} + \vec{m}_2 \times \alpha \frac{d\vec{M}_2}{dt} + I\beta_{ST}\vec{m}_2 \times (\vec{m}_1 \times \vec{m}_2).$$

In future:

Out-of-Plane

Magnetization

Spin switching by electric field

-> faster switching

lower energy consumption First demonstration: ~0.4 ns



今後の展開(2) トンネル磁気抵抗素子の組成制御による高性能化



未発表データ

Y. Miura et al., PRB <u>78</u>, 064416 (2008)

V.R. Singh et al., to be submitted.

- ・ 過剰Coは大きなモーメントを持つが、 E_F付近のスピン分極を減少させる.
- ・ 過剰Mnのスピンは周囲のスピンと逆に向くが、E_F付近のスピン分極は高いまま.
 → トンネル磁気抵抗比を増加させるためには、Mn組成比を大きくすればよい.

※Co₂Mn_βGe_{0.38}についても同様の研究を実施

V.R.Singh et al., Phys. Rev. B 86, 144412 (2012).

今後の展開(3): 排ガス浄化触媒の低コスト・高性能化







CO, NOxといった有害物質を 同時に高速で無害化する 触媒が必須



反応中間体の分子種と量をリアルタイム追跡 ⇒反応素過程における反応機構の解明

