

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008 ～ 2011

課題番号：20710076

研究課題名（和文）電子伝導素子に代わるスピン波束伝播型局在スピン素子の理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical study of localized spin devices with spin-wave-packet propagation to replace electron conduction devices

研究代表者

古門 聡士 (KOKADO SATOSHI)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：50377719

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：スピン緩和、スピン-原子振動相互作用、スピン-フォノン相互作用

1. 研究計画の概要

本研究は、従来の電子伝導素子の問題点^{*}を克服するため、動作原理が異なる「スピン波束伝播型局在スピン素子」を提案し、その物性予測を行うことである。ここでスピン波束とは、磁性体内の連なった磁気モーメントの一部が傾いた励起状態であり、伝播の際、電子の移動は伴わない。

本研究の実施計画として次の項目を考える。

- (1) スピン波束伝播の持続に大きな影響を与え得るスピン緩和について調べる。
- (2) スピン緩和の一因であるスピン-原子振動相互作用 V_{SA} を導出し、実際の材料に対して $|V_{SA}|$ を評価する。
- (3) V_{SA} によるスピン緩和時間を導出する。
- (4) 実験グループと連携を取りながら理論計算の結果を実際の材料開発に繋げる。

^{*} 問題点は、高い消費エネルギー、電流密度増大による素子破壊などである。

2. 研究の進捗状況

上記1の(1), (2), (3)に関する研究を行った。特に基板に吸着した磁性イオンのスピン緩和に注目した。ここでスピン緩和とは、スピン系が励起状態(スピン波束状態)から基底状態へ落ち着く現象であり、スピン緩和によりスピン波束の消滅が起こる。このスピン緩和の一因として原子振動(磁性イオンの振動)の関与が考えられていたが、その理論的研究はあまり進んでいなかった。そこで、結晶場中の単一磁性イオンのモデルに対して、 V_{SA} の表式の導出と実際の材料に対する $|V_{SA}|$ の評価を行った。詳細は次の通りである。

(1) V_{SA} の一般式の導出

磁性イオンに対し、結晶場エネルギー V_c を無摂動項、スピン軌道相互作用 H_{so} および原子振動による V_c の変化 ΔV_c を摂動項として、摂動計算により V_{SA} の一般式を導出した。ここで、 H_{so} と ΔV_c には、結晶場中の磁性イオンの原子核(正電荷)の振動変位と電子(負電荷)のその差 Δr を考慮に入れた。

(2) 実際の材料に対する $|V_{SA}|$ の評価

実際の材料として CuN 基板上の Fe イオン [Hirjibehedin *et al.*, *Science* **317** (2007) 1199.] を考えた。主な結果は次の①, ②の通りである。

① 原子核と電子の振動変位の差 Δr

まず V_{SA} の存在に不可欠な原子核と電子の振動変位の差 ($\Delta r = \eta \Delta r_n$) の表式を、結晶場中の振動原子に対して求めた。ここで、 Δr_n は原子核の振動変位、 η は原子核と電子の振動変位の差の程度を表す無次元量であり、 V_{SA} は η に比例する。得られた表式を用いることで、CuN 基板上の Fe イオンの η を $\eta=0.05$ と評価した。

② V_{SA} の評価

原子の振動数 f が $10^2 \text{ THz} < f < 10^4 \text{ THz}$ のとき、 V_{SA} は $10^{-7} \text{ eV} < |V_{SA}| < 10^{-4} \text{ eV}$ であることが分かった。また、従来のスピン-フォノン(磁性イオンと周囲イオンから成るユニットセルの振動)相互作用 V_{SP} との比較では、 $f < 1 \text{ THz}$ で $|V_{SA}| > |V_{SP}|$ 、 $f > 1 \text{ THz}$ で $|V_{SA}| < |V_{SP}|$ になった。この大小関係は主に次の2点で説明された。

・ V_{SA} 、 V_{SP} はそれぞれ $|V_{SA}| \propto 1/f^{d/2}$ 、 $|V_{SP}| \propto f^{d/2}$ の関係を持ち、 f の減少とともに

$|V_{SA}|$ は増大, $|V_{SP}|$ は減少する.

・ $|V_{SA}|$ と $|V_{SP}|$ は, 振動子の質量が小さいほど大きくなる. これは振動子の質量の減少と共に振動変位が増大することに起因する. ここで, V_{SA} の振動子は磁性イオン, V_{SP} の振動子はユニットセル内の全イオン(磁性イオンと周囲イオンから成る)であり, V_{SA} の方が振動子の質量が小さい.

以上のような f 依存性と振動子の質量の関係を主な理由として, 低 f 領域では $|V_{SA}| > |V_{SP}|$ が得られた.

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している.

(理由)

- (1) 本研究の中心テーマである V_{SA} の導出に成功した.
- (2) 振動数によっては $|V_{SA}|$ が従来相互作用の V_{SP} の大きさより大きくなることが分かった. この結果は, スピン緩和現象を解析する際, V_{SP} だけでなく V_{SA} も考慮に入れる必要があることを示唆しており, 従来解析方法への修正案を示している.

4. 今後の研究の推進方策

上記 V_{SA} に関連した次の課題に取り組む.

- (1) V_{SA} によるスピン緩和時間を求める.
- (2) 結晶場中の単一原子スピン系において, 原子振動により誘発される誘電特性と磁性の間の関連について調べる.

5. 代表的な研究成果

(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 6 件)

- ① Satoshi Kokado, Kikuo Harigaya, and Akimasa Sakuma
Spin-atomic vibration interaction and spin-flip Hamiltonian of a single atomic spin in a crystal field
J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 114721-1 - 114721-24. 査読有り
<http://ir.lib.shizuoka.ac.jp/handle/10297/5404>
- ② Satoshi Kokado, Kikuo Harigaya, and Akimasa Sakuma
Anisotropy energy, spin-atomic vibration interaction, and spin-flip Hamiltonian of a single atomic spin system: application to iron ion
phys. stat. solidi (c) **7** No. 11 - 12 (2010) 2612 - 2615. 査読有り
- ③ Masakiyo Tsunoda, Hirokazu Takahashi, Satoshi Kokado, Yosuke Komasaki, Akimasa Sakuma, and Migaku Takahashi
Anomalous Anisotropic Magnetoresistance in

Pseudo Single Crystal γ' -Fe₄N Films

Appl. Phys. Express **3** (2010) 113003-1 - 113003-3. 査読有り

- ④ Satoshi Kokado, Kikuo Harigaya, and Akimasa Sakuma
Switching of a single atomic spin induced by spin injection: Effect of spin relaxation
phys. stat. solidi (c) **6** No. 10 (2009) 2113 - 2118. 査読有り

- ⑤ Satoshi Kokado, Kikuo Harigaya, and Akimasa Sakuma
Switching of a single atomic spin induced by spin injection: A model calculation
Proc. of the 9th Int. Symp. on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology - ISQM-TOKYO'08 (2009) 142 - 145. 査読有り

- ⑥ Masakiyo Tsunoda, Yosuke Komasaki, Satoshi Kokado, Shinji Isogami, Che-Chin Chen, and Migaku Takahashi
Negative Anisotropic Magnetoresistance in Fe₄N Film
Appl. Phys. Express **2** (2009) 083001-1 - 083001-3. 査読有り

[学会発表] (計 5 件)

- ① Satoshi Kokado, Kikuo Harigaya, and Akimasa Sakuma
Anisotropy Energy, Spin-Atomic Vibration Interaction, and Spin-Flip Hamiltonian of a Single Atomic Spin in a Crystal Field
American Physical Society March Meeting, 2011年3月22日, Dallas, Texas, USA

- ② 古門聡士, 針谷喜久雄, 佐久間昭正
単一原子スピン系のスピナー原子振動相互作用 II
日本物理学会, 2010年9月25日
大阪府立大学中百舌鳥キャンパス

- ③ Satoshi Kokado, Kikuo Harigaya, and Akimasa Sakuma
Spin-atomic vibration interaction and spin-flip Hamiltonian of a single atomic spin
Trends in Nanotechnology Conference, 2009年9月9日, Barcelona, Spain

- ④ 古門聡士, 針谷喜久雄, 佐久間昭正
単一原子スピンのスピナー原子振動相互作用
日本物理学会, 2009年9月25日
熊本大学黒髪キャンパス

- ⑤ Satoshi Kokado, Kikuo Harigaya, and Akimasa Sakuma
A Localized Quantum Spin Reversal by Spin Injection in A Spin Quantum Dot: Effect of Spin Relaxation
Trends in Nanotechnology Conference, 2008年9月3日, Oviedo, Spain

[その他]

ホームページ

<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~tskokad/>