

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420301

研究課題名(和文) 超巨大一軸磁気異方性を有するナノドットの光・マイクロ波伝送への強磁性共鳴効果

研究課題名(英文) Ferromagnetic resonance effects on Microwave to nano-dots with supergiant uniaxial magnetic anisotropy

研究代表者

宗像 誠 (MUNAKATA, Makoto)

崇城大学・情報学部・教授

研究者番号：10183112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：30GHz以上の共鳴周波数を膜面内に巨大一軸磁気異方性を有するFeCoSm薄膜をナノドット化することによって、共鳴周波数をTHz(数百～千GHz)へ引き上げ、マイクロ波や光に対する量子的磁気相互作用を調べることが目的である。ナノドットへの新成膜法として新規カールセルスパッタ法(高成膜レート、スパッタ粒子の直進化実現)を提案開発した結果、数十個を一方向にFeCoSmナノドット整列の製作に成功した。

研究成果の概要(英文)：The first purpose of this scientific research is that of the creation of new type nano-dots using the thin film materials FeCoSm with being spin-operated at over 30 GHz-1 THz. In addition, the second purpose is that of clarifying quantum magnetic interactions between nano-dots as a solitons with spin dynamics over 30 GHz-1 THz, being induced by supergiant uniaxial magnetic anisotropy. We have succeeded in the creation of tens of new type nano-dots by means of new specially developed sputter method. On the other hand, spin-operation at over 30 GHz-1 THz co-with supergiant uniaxial magnetic anisotropy confirmed on the way of measuring for details.

研究分野：電気電子材料

キーワード：巨大一軸磁気異方性 ナノドット マイクロ波・光 共鳴周波数THz 異方性原子配列 高周波磁気特性 量子的磁気相互作用 新規カールセルスパッタ法

## 1. 研究開始当初の背景

前科研費（基盤（C）科学研究費補助金、課題番号 22560310（平成 22-24 年度））により開発した CoFeBSm 電磁界収束薄膜材料は、伝送路の短縮やインダクタ・キャパシタ素子のマイクロ化・集積化・多機能化のために必須で、国際的な研究動向の中で有効なナノ構造磁性薄膜材料として位置づけられている。

本研究で目指すさらに新しいナノドット構造材料は、さらに高い周波数の未踏領域（光・電磁波）の伝送においてキャビティ効果やトランジスタ効果をも発揮・誘導するもので、既開発の CoFeBSm 電磁界収束薄膜材料をナノドット構造化することによって、その強磁性共鳴効果を利用する着想を、海外共同研究の結果から得ている。

さらにまた、従来の大型光学素子の双偏光、変調、同調機能をもマイクロ波・光伝送線路上に組み込み、これまでに無いマイクロ化、集積素子化も新たに実現しようとする意図もある。

これまで、申請者らが報告した薄膜の GHz 帯高周波動作特性が現在まで国内外をリードした最高記録を有しており、独自のスパッタ原子堆積薄膜形成法（カールセルスパッタ法）により、大きなバイアス磁界を発生する強力マイクロ磁石の磁気特性と高周波微小電磁界に反応する軟磁気特性とが両立するナノ構造磁性を世界で唯一具体的に実現している。

本申請者らは、以上の点を根拠にして、特に 5~100 kOe 程度の一軸異方性磁界（超巨大一軸磁気異方性）をナノドットに付与し、その強磁性共鳴効果が光・マイクロ波の伝送に与える影響と効果を解析的に明らかにしようとする着想するまでに至っている。

## 2. 研究の目的

本研究は、前科研費（基盤（C）科学研究費補助金、課題番号 22560310（平成 22-24

年度）により、世界で初めて実現した高周波数 20~30 GHz 動作で働く ナノ構造マイクロ波電磁界収束薄膜材料を、新規にナノドット化し、その 強磁性共鳴効果を用いて、新規に THz 領域（光・電磁波）の特異な伝送機能（キャビティ効果およびトランジスタ効果なども含む）を創出・誘導することを目的としている。現在、ナノドットの量子効果を利用した様々な応用が研究開発段階で注目され、世界的にその研究が活発に行われている。

しかし、その応用への期待が大きい反面、まだ実用化・量産化には様々な問題があり、その製作の手法（量産化・産業化）についても全く検討されていないのが現状の問題である。

本件の研究シーズ（候補）顕在化の最大の目的は、多元合金磁性膜から成る多層ナノドットの試作とその応用を探索するため、量産化・産業化を最前提に、ナノドットの作製技術から開発することにある。

本研究では、自ら見出した知見から、既開発材料の作製方法に新たに 特殊原子堆積法（開発カールセルスパッタ法）への付加的改善を行った上、超巨大一軸磁気異方性を有する構造化ナノドットを創生することを第一目標とした。

## 3. 研究の方法

新成膜技術への可能性を深めるための、以下の技術開発（研究手段の確保）を行った。

### 3-1. カールセル（メリーゴランド）スパッタ手法

図 1 は成膜装置の上面図を示す。基板がローターの側面にセットされ、基板を回転させながら対向したスパッタ源原子の材料（本図の場合は Co、Fe、その他第三元素）から単層・多層・高層膜を製作する方法である。超高速で基板を回転させるため

に、柱状構造にはならないで、原子組成が非常に均一な多元系合金膜の成膜ができることが最大の特徴である。

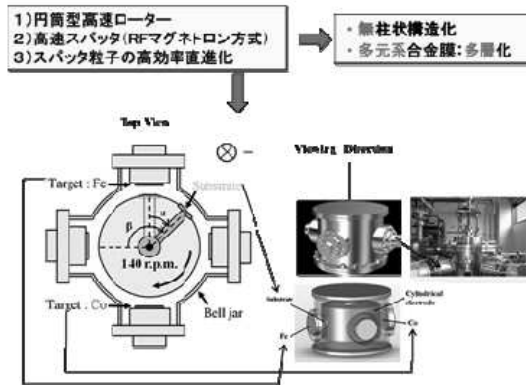


図 1 成膜技術の特徴と新規性

図 2 に、図 1 に示したローター（円筒型電極）を平面に展開して、ローター側面の基板とスパッタ源であるターゲットとの相対的な移動位置関係を示す。

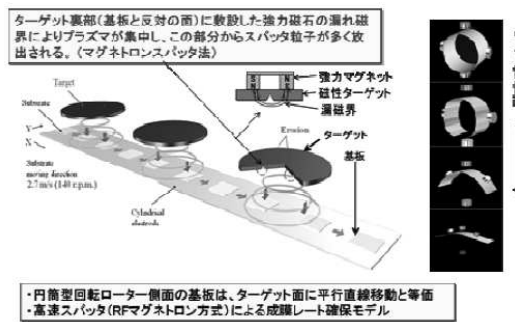


図 2 ローター（円筒電極）上を移動（回転）しながらスパッタ原子を受け基板とスパッタ原子源ターゲット

基板は移動しながら各ターゲットからスパッタ粒子（原子）を受け、多元合金の場合原子組成が非常に均一な成膜ができる。また、ターゲット裏部（基板の反対の面）に敷設した強力磁石の漏れ磁界によりプラズマを集中させ、この部分（Erosion）からスパッタ粒子が多く放出させるマグネトロンスパッタ方式の採用で高速成膜レートが確保されている。

以上を幾何学モデルにまとめると、

- 1) 基板はターゲット面に平行直線移動

- 2) 高速スパッタ（マグネトロン方式）で成膜レート確保となる。

図 3 に、基板に垂直入射する Fe および Co スパッター原子数分布を、上記のモデルから解析計算した結果を示す。X 方向が基板の移動方向、Y 方向が回転方向に垂直方向に当たり、X Y 面に垂直方向にスパッター原子数が示されている。

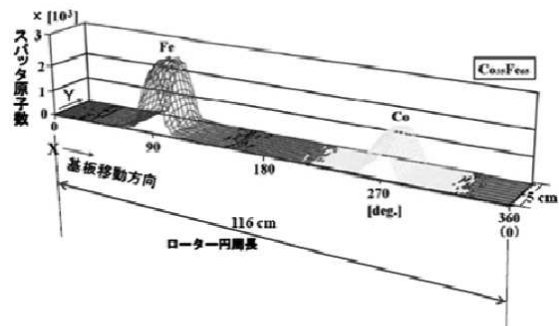


図 3 基板に垂直入射する Fe および Co スパッター原子数分布

この解析から以下の結論が導かれる。

- スパッタ原子の高効率直進化
- 円筒型ローター高速化 (140 rpm 従来は 50rpm 以下)

以下に、上記二点への処方へのあらしを示す。ナノドット形成の要件として、マスクエッジ部の原子の斜め入射影堆積効果を除去することが重要である。スパッタ源の近くに RF（ラジオ周波数 MHz）コイルを敷設すると、スパッター原子を直進化させる。これまでに本件の大型スパッタ源（スパッタ原子数増源）には適用された例はなく、最適設計・仕様調整が肝要である。（図 4）

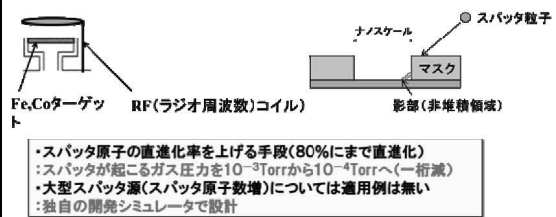


図 4 スパッタ原子の直進化のための RF コイルの設計と敷設

①マグネトロン直進スパッタ原子数の増加  
(スパッターレート2~3倍へ向上)

図5に示すように、スパッタ源のターゲットに回転稼働型マグネトロンマグネットを敷設し、Erosion (スパッタ原子が多数放出する領域 c.f. 図2)を大きくとることによってスパッタ原子数の増加を図ろうとするものである。今の所、成膜技術でこの技術は報告されていない。生産現場の大型のスパッタ装置では、マグネトロンマグネットは固定で、磁性ターゲットを移動する方式になっていることが一般的である。

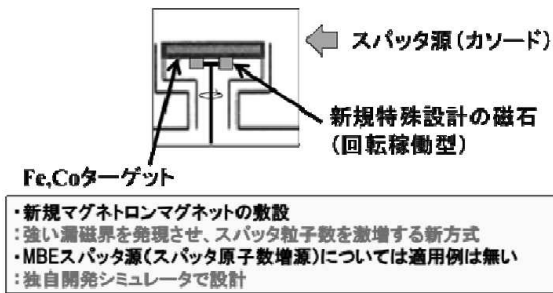


図5 回転稼働型マグネトロンマグネットの構造と設計・試作

②ローター回転の高速制御化 (140 r.p.m. から 600 r.p.m. へ可変制御)  
(柱状構造発生阻止、多元系合金化調整)

ローター回転の高速化によって原子一層の堆積の極調整を行うと、多元合金化調整と無柱状構造が両立できる。今のところ成膜技術において適用の例は無い。

図6に、本新成膜技術とは別用途ではあるが、自作設計開発の高速回転ローターの一例を示す。回転部は水冷導入で、準超高真空対応化・軽量化したもので、高精度の重心の確保で1000 r.p.m.までの高速回転が可能である。上記方式のローターを採用し、インバータ

一駆動モーターを採用すれば、連続可変が高回転数まで制御できる。

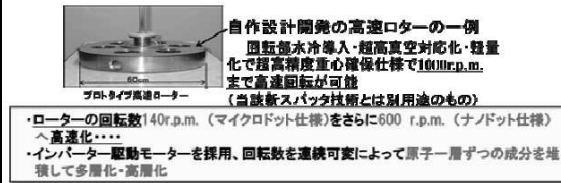


図6 ローター回転の高速制御化と柱状構造発生阻止、多元系合金化調整

4. 研究成果

30 GHz以上の共鳴周波数を膜面内に有するFeCoSmをナノドット化することによって、共鳴周波数をTHz(数百~千GHz)へ引き上げること、およびマイクロ波や電磁波に対する量子的磁気相互作用を調べることに対応して、その具体的な研究方法を案出し、ナノドットへの新成膜手段としては新規カールセルスパッタ法(高速回転基板、高成膜レート、スパッター粒子の直進化実現)を装置手段を構築した。

具体的には、以下研究成果として、①~⑦にまとめた。

- ①MBE(エピキヤシタル分子ビーム堆積法)に酷似したスパッター機構を現出した。従来MBE法には無く、それと全く異なる新しい知見として、高速で厚い膜の生成が容易で、基板上の結晶方位、結晶間隔を調整できることを検証した。
- ②基板は高速移動させても、合金組成の混合原子堆積が①のMBE入射で起こり、ナノドットの生成が可能なマスクにも対応できることを明らかにした。
- ③以上の成膜技術で、数十個を一方向にFeCoSmナノドットに並べた製作に成功した。

④しかし、当該研究期間にナノドットの静磁気特性が堆積量が少ないために側定が間に合わなかったこと、さらにドット中の S m 原子の結晶磁気異方性配列の検証などが間に合わなかった。

⑤現在、上記の測定に掛かる堆積量（ナノドットの個数とその配列）を確保し、本研究の目的である共鳴周波数を TH z（数百～千 GHz）へ引き上げることおよびマイクロ波や電磁波に対する量子的磁気相互作用を検証する予定である。

⑥この実績は、遅延もありながら、特許性も大であるため、タイミングを見て学会・論文発表を遅らせている。

⑦また、JST A-Step などへの展開を企業と協力して実施する予定である。

以上の事項は、他のナノドット研究には無い手法と TH z 共鳴高周波動作デバイスへの道を開いたものと考えている。

詳しい学術発表・論文については、特許申請も含め、震災による測定器半壊のため現在支援研究者と連携途上である。

ナノドット製作設計案を、図 7 に示す。

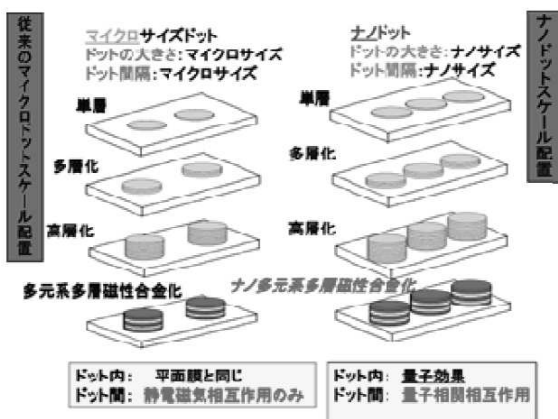


図 7 ナノドットの量子効果配置と多元多層合金化

同図右側縦列にいくつかの種類

のナノドット形態を示している。超巨大一軸磁気異方性を得るためには、最下段の構造が申請の中心的なアイデアであった。

しかし、諸般の事情で上から二段目の二層化ナノドット（数十個の一方向一列配列：未発表）に止まっている。

図 8 は、測定に VSM 高感度積分法を用いた結果である。縦軸の絶対値（ $4\pi Ms$ ）は精度が大幅に低いままであるが、横軸の精度は高い当該静磁気特性を示す。

ナノドットは、熱的な擾乱に弱いとされているが、本件の非常に大きいスピン固定性により超巨大一軸磁気異方性が観測された。

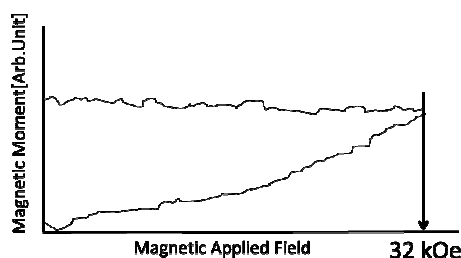


図 8 数十個の一方向一列配列の静磁気特性と超巨大一軸磁気異方性

具体的には、巨大一軸異方性磁界 32 kOe が得られており、少なくとも強磁性共鳴周波数 160 GHz と推定される。

ナノドットへの S m 添加をさらに調整し、図 7 の右最下段に示した高層化・多元合金化した場合、100～200 kOe に至る超巨大一軸異方性磁界が計算から期待できる（未発表）。その場合、640～1000 GHz、すなわち 1 TH z までの共鳴周波数が実現できることになる。

本研究の成果は、二層化ナノドット（数十個の一方向一列配列）について超巨大一軸磁気異方性を見出したことにあるが、一

方、これを独自の研究手法の設計・調整により実現したことにある。

なお、成膜装置の構造、ナノドットの合金原子組成、FeCoSm ナノドットの形状、層構造、サイズ、配置については、繰り返しではあるが、詳しい学術発表・論文に深く関連しているため、特許申請も含め、震災による測定器半壊のため現在支援研究者と連携途上である。

## 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0件)

[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]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宗像 誠

崇城大学・情報学部・教授

研究者番号：10183112

### (2) 研究分担者

友重 竜一

崇城大学・工学部・教授

研究者番号：90258640