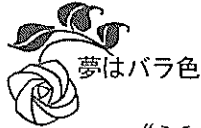


「人工格子・人工物質」, 「超高集積磁性メモリセル」から 「スピン情報の記憶・伝送・演算」へ



山本 雅彦*

“Memory, Transmission and Computation of Spin Information”
from “Superlattice and Artificial Materials” and
“Ultra-High Density Magnetic Memory Cell”

Key Words : Spin information, Magnetic properties, Superlattice, Memory cell,
Self-organization, E-beam lithography, Hydrogenation

1. 人工格子・人工物質¹⁻⁹⁾

ピンポン球を一つずつ積み上げていくように、原子を一つずつ積み上げて、「自然界にない夢の材料を」目指した「人工格子・人工物質」の研究は、分子線蒸着(MBE)法やスパッタリング法などの超高真空を利用した芸術的な作製法により、清浄で欠陥の少ない膜、結晶方位のそろったエピタキシャル膜などの極めて高品位な膜の創製に成功しています。それぞれはさらに高機能化、新機能発現を目指しています。下記に5つの項目について記述します。

1.1 平衡状態図にない構造をもつ薄膜多層膜の創製に関する研究¹⁻³⁾

自然界にある物質の結晶構造は決まっています。しかし、基板とバッファ層との組み合わせにより、例えば、CuはもともとFCC構造なのですが、HCP構造にというように、平衡状態図にない構造をもつ膜の創製に成功しています。図1に、MgO(100)基板上にCoとCuを種々積層した結果を示しますが、膜厚、積層順、基板方位などによって、生成される膜の構造が変わることがわかります。言い換えれば、これらのパラメータを制御すれば新しい構造の薄膜を作ることが出来るわけです。次は、既にわかっ

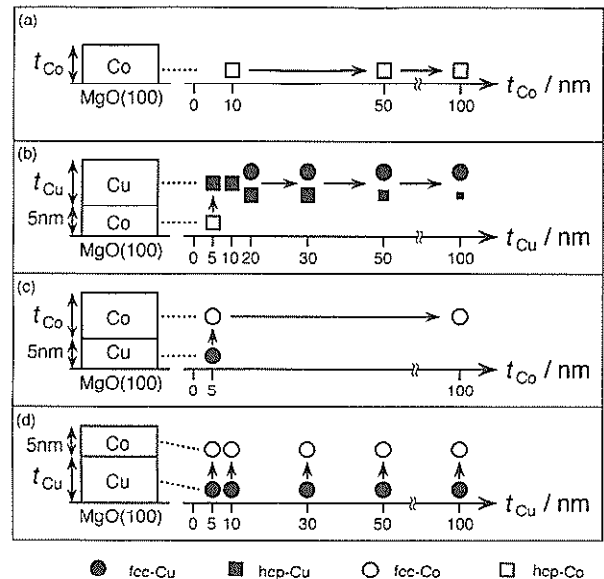


図1 MgO(100)基板上にCo/CuおよびCu/Co二層膜を積層した際のCuおよびCoの結晶構造

ている因子を増加または減少させていくことにより、格段に性能の向上した、平衡状態では達成できない新物質・新材料の創製に、基板拘束を利用して実現させることを目指します。

1.2 金属歪超格子の研究⁴⁾

主として強磁性金属元素と貴金属元素との組み合わせを選んで、異なる格子定数を持つ原子の層間で互いを拘束させて、格子定数を連続的に変化させることによって強磁性層内に歪みを内包させることにより優れた磁気異方性をもつ金属歪超格子の創製に成功しています。図2に、基板上にAu, Co, Cuの順に(Cu/Co/Auと表記)積層した時の面内格子定数をRHEEDにより観測した結果を示しますが、Co層格子定数が連続的に徐々に変化していて、歪みを内包させるこ

* Masahiko YAMAMOTO
1943年8月24日生
1968年大阪大学大学院工学研究科
冶金学専攻修士課程修了
現在、大阪大学・大学院工学研究科・
マテリアル科学専攻、教授、工学博
士、材料物性学
TEL 06-6879-7486
FAX 06-6879-7487
E-Mail yamamoto@mat.eng.
osaka-u.ac.jp



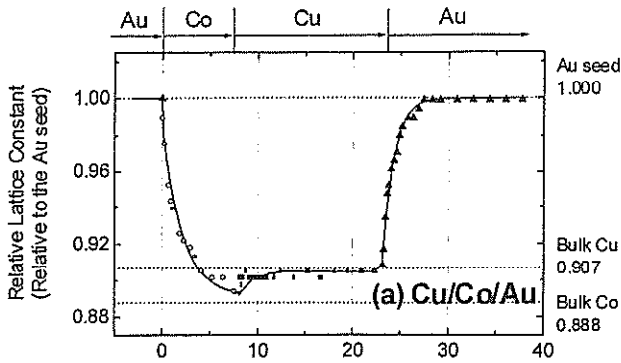


図2 [Cu/Co/Au]人工格子の膜厚に対する面内格子定数の変化

とが来ています。その結果、優れた磁気異方性の発現に成功しました。バルク材では歪みに関与した物理現象には枚挙に暇がなく、薄膜では含ませることの出来る歪み量も極めて多く、その結果、新物理現象発現が大きく期待できます。下地の結晶性を駆使することで歪超格子の更なる発展を目指しています。

1.3 [磁性金属/希土類金属] 複合化多層膜の水素化による高機能化の研究

希土類金属は水素を吸蔵することができ、水素を吸蔵させることにより、金属から半導体に変えたり、強磁性体から非磁性体に、またその逆に変わったりでき、多層膜に新しい機能性を付与することが期待できます。図3では、Fe/Gd多層膜において水素吸蔵前後で磁性が大きく変化することを示しています。この例のように、希土類金属層と強磁性金属層との多層膜を作製して、水素の吸収脱離を制御できれば、スイッチやセンサーにも利用できるわけです。また、水素化によって、強磁性層間の結合様式、例えば強磁性結合や反強磁性結合などの層間結合の詳細などを含む物理の基礎について研究することも出来ます。水素を吸蔵すると光に対する透過性が良くなり、透明になることも見出して、光学特性にも期待がかかります。

1.4 [磁性金属/(半導体・絶縁体)]ハイブリッド多層膜の磁気特性、電気伝導特性、光学特性の研究

強磁性金属層の間に、半導体または絶縁体を挟みますと、磁気的に新奇な現象の発現が期待できます。このようなハイブリッド多層膜の電子状態を制御しますと、層間にトンネル現象が起きる、発光現象が

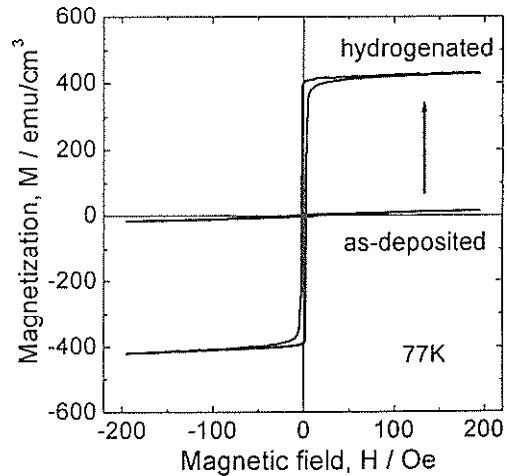


図3 [Fe/Gd]多層膜における水素吸蔵前後の磁性の変化

起こるなど、電気伝導性にも光学特性にも新しい現象の発現に期待がかかります。私たちはシリコン半導体集積回路に組み込むことの出来る磁気デバイスの開発を目指しています。

1.5 多層膜X線分光素子の研究⁵⁻⁹⁾

X線やシンクロトロン放射光では、分光素子を用いて、良質なビームをつくり、構造解析や微細加工に利用しています。この分光素子では、分解能・S/N比向上のために、大入射角が必要で、積層周期を短くしないとイケませんが、界面粗さの影響が顕著となるので、反射率が極度に低下してしまいます。私たちは、原子制御した結晶成長により、原子的に平

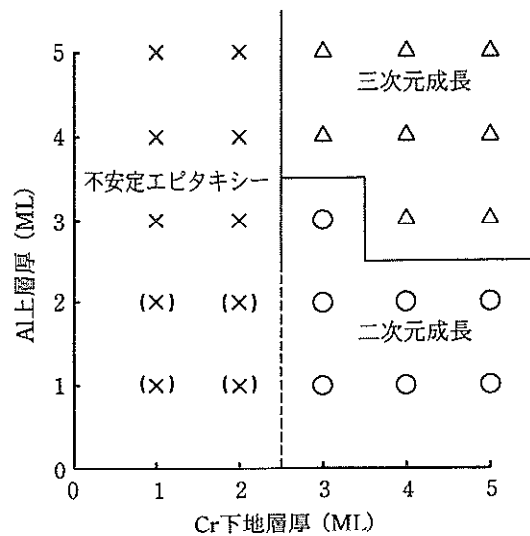


図4 [Al/Cr]人工格子において、Cr上のAlの原子層単位での結晶成長様式を示すダイヤグラム

滑な界面を創り込むことに成功しています。図4にAl/Cr系人工格子で、Cr上のAlの原子層単位での結晶成長の結果を示しますが、例えば、下地のCr層が3原子層だとAlは3原子層までエピタキシャル成長しますが、4原子層ならしない、ことなどを明らかにしています。この成果は、民間会社と共同で出願した特許となって実を結んでいます⁵⁾。次の課題は、放射線に対して耐え得るかの実験をすることです。もしよければ、新しい分光素子の誕生です。

2. 超高集積磁性メモリセル¹⁰⁻¹³⁾

メモリとして、今日、半導体メモリが多くの分野で使われています。半導体メモリは電子の電荷を利用しているのに対して、電子のスピンを利用したメモリが次世代のメモリの重要な役割を担う可能性があります。磁性を利用したメモリは不揮発であり、極めて安定しているからです。既に記録媒体として民生品にも多く利用されています。この項では、上記の「人工格子・人工物質」の研究から歩を進めて、高度に集積させた磁性メモリづくりを目指している研究について述べます。

メモリの単位一つ一つを離散的に創り込んで、ディスクリットメモリにするために、現在2つの方向から研究を進めています。自己組織化現象の利用と電子線微細加工法の利用です。これらの進展から考えて、次世代のメモリとして登場する可能性は十分にあります。

2.1 自己組織化法による磁性ドット・磁性細線の創製と磁気特性制御および超高集積磁性メモリセルの研究^{10, 11)}

自己組織化現象を利用して、基板をあらかじめ熱処理することによって階段状につくり込みます。この基板を磁性ドット・磁性細線のテンプレートに用います。このテンプレートの上に、磁性元素を蒸着して、磁性ドット、磁性細線づくりを目指しています。図5に自己組織化したSrTiO₃基板上でのFe細線の走査型トンネル顕微鏡(STM)像を示します。この研究は、図6に示す材料原子構造磁気機能高度解析システムによっています。

自己組織化法によりますと、一度に大きな領域でディスクリットメモリエレメントを創ることが出来ます。しかし、最適条件を見出すのが課題で、表面物理の基礎研究が必要です。私たちは、微小な磁性体を清浄な状態のまま、その磁化状態を知るため

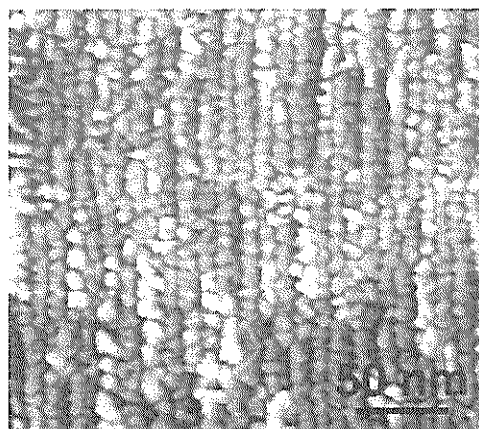


図5 TiSrO₃基板上で自己組織化したFe細線の走査型トンネル顕微鏡(STM)像

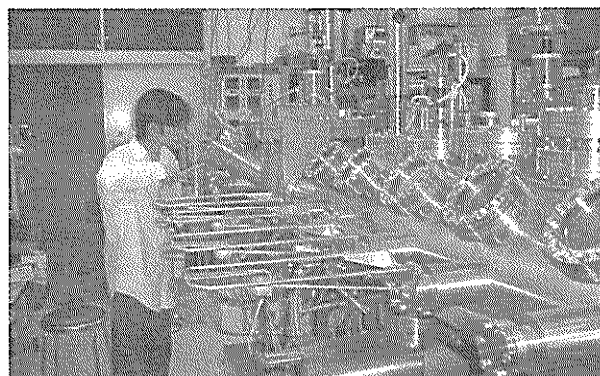


図6 材料原子構造磁気機能高度解析システム

に、超高真空下で青色レーザーによる測定ができる表面磁気光学効果測定装置を開発しました¹⁰⁾。これらを駆使して、超高集積磁性メモリセル創製というゴールを目指しています。

2.2 電子線微細加工法を駆使して創製した配列磁性体の新しい物性発現と超高集積磁性メモリセルの研究¹⁰⁻¹³⁾

上記の自己組織化という自然現象を利用するのに対して、人工的に創りこもうとする方法の一つが電子線微細加工法ですが、磁性メモリの一つとして、私たちが電子線微細加工法を駆使して開発したリングドットを図7に示します。磁化の向きが右回りのとき“0”とし、左回りのとき“1”としますと、メモリに使えるわけです¹³⁾。概算要求によって設置された図8に示す複合雰囲気下原子制御材料創製解析システムなどを駆使して創っています。ドットの最適形状、最適材料などの検討、読み出し書き込みのためのデバイス化などが次の課題です。

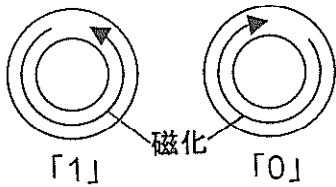
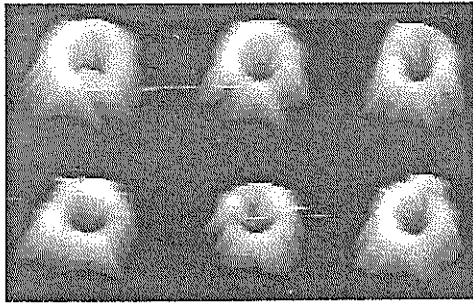


図7 電子線微細加工法を駆使して開発したリングドット

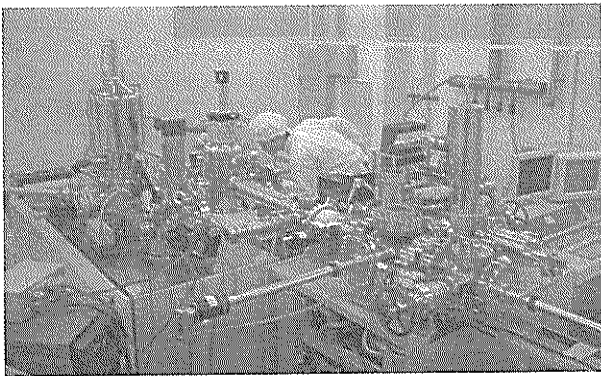


図8 複合真空気下原子制御材料創製解析システム

3. スピン情報の記憶・伝送・演算¹⁴⁾

情報化社会に要求される一つに、多量の情報を如何に管理するか、という課題があります。ハード面での重要な素子の1つにメモリがありますが、単に記憶するだけでは十分な情報の処理とはいえません。

電子には電荷(charge)とスピン(spin)があります。電荷は半導体の超高集積回路に使われるなど極めて有効な使われ方をしています。一方、スピンはといえば、OA機器など的一端としての記録デバイスに使われているに留まっています。スピンはN極とS極が存在し、その存在自体が大変明瞭です。スピンはスピン情報としてもっと多用に使えるはずで、もっと精力的に研究すれば、人間社会に大きく役立つ可能性を秘めています。電子発見百年を経て、もう一度電子を見直し、スピンの有効利用を考える

時ではないでしょうか。

スピンの情報を記憶し、伝送して、また、スピン情報を演算するなどの、スピン情報の新機能の開発をして、情報社会で役立てるようにしたい、と私たちは思っています。スピン情報の伝送、演算の一例を図9に示します¹⁴⁾。この種の基礎研究は将来大変新しい世界を切り開くでしょう。特に放射線を浴びる宇宙での使用では、従来の半導体メモリは不向きであり、磁性メモリセルが将来欠かせないデバイスになることでしょう。

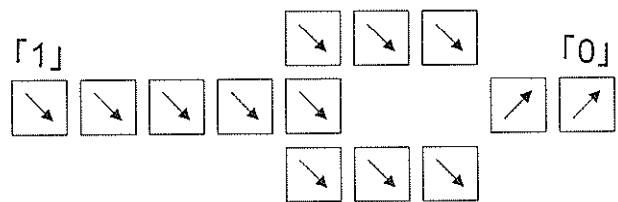


図9 スピン情報の伝送、演算を示す概念図

4. 教育にも夢——終わりにかけて

「人生にロマンを、日々継続を、達成に執念を」、今年2月に修了した大学院生に頼まれて色紙に書いて私が贈った言葉です。研究についてももちろんロマンが必要です。私たち学者は教育と研究を担っていますが、自分でロマンを感じない研究は、他人に感動を与えることが出来ないし、研究リーダーとして他人を導くことも出来ません。リーダーみずからがロマンを抱いてこそ、グループメンバーがいい研究をする可能性が広がる、と思うのです。

物理学者の多くはsingle spin memoryなど出来っこないと言います。その人たちは既存の学問体系から考えて演繹した考察を述べています。ノーベル賞は既存の概念を打ち破るような研究成果に与えられます。絶縁体であるセラミックスに伝導性などあるものか、と考えられていた物質系に、高温超伝導現象が見出されました。サイエンスは、まだまだ太平洋に釣り糸をたれて魚を釣っている状況です。如何に良い場所に釣り糸を垂れるかはとても重要で、科学者の力量が試される点でもあります。よい発想を基にとっても大きな魚を釣り上げることは可能なのです。

1993年にChairmanとして国際会議を開催した時、ノーベル物理学賞を受賞したSTM発明者Rohrer博士をお招きして特別講演をしていただきました。そ

の中で、彼はナノテクノロジーを駆使した将来の新しい学問世界について語りました。質疑応答に移って、世界的に高名な学者が、「そのことはとても実現できるとは思わない」と非難の意をこめて質問しましたとき、彼は「50年前に今日このようなSTMの世界が想像できたでしょうか」と反論して、大きな拍手が沸き起こったことを思い出しています。

「Let's make a single spin memory, and get the Nobel Prize (シングルスピンメモリを創って、ノーベル賞をとろう)」というキャッチフレーズの下に始めた研究は、いつの日にかグループメンバーの誰かがノーベル賞を取ってくれるに違いありません。科学技術第2次5ヵ年計画の目標に「50年間に30人のノーベル賞を」とありますが、私をも含めた我々のグループメンバーが加われれば、と期待しているのです。ロマンを抱きながら、若き人を大切に、励みを送りつづけることにいたしましょう。

参 考 文 献

- 1) 山本雅彦：大阪大学工学部・工学研究科 大阪大学工学部編 三田出版会(1996) p.82.
- 2) 山本雅彦：News of Engineering, Vol.8, (1999) p.5.
- 3) 山本雅彦, 西川恒一, 金月俊樹：まてりあ, 解説, Vol.34 (1995) pp.946-951.
- 4) Yamamoto et al. : Sci. Tech. Adv. Mat. Review article, (2001) pp.669-689.
- 5) 独創的研究成果育成事業(平成10年度).
(a) 特願平10-089902, 特開平11-287900
(b) 特願平11-365303, 特開2001-183499
- 6) 金月俊樹, 山本雅彦：まてりあ, 解説, Vol.38 (1999) pp.865-870.
- 7) 山本雅彦：Inter. Symp. on Surface Physics, Invited Talk, Vol.3 (2001) pp.32-35.
- 8) 金月俊樹, 山本雅彦：応用物理, 解説, Vol.70 (2001) pp.428-432.
- 9) Yamamoto et al.: Surf. Sci. Rept., Review article, Vol. (2001) in press.
- 10) 独創的研究成果育成事業(平成11年度).
- 11) 山本雅彦：第41回日本真空学会, 特別講演 Vol.41 (2000) pp.39-42.
- 12) 中谷亮一, 山本雅彦：News of Engineering, Vol.15, (2001) p.4.
- 13) 中谷亮一, 山本雅彦：特許申請中.
- 14) 中谷亮一, 山本雅彦, 遠藤 恭：特許申請中.

