

微細加工による機能発現と電子デバイスへの応用に関する研究

研究代表者 工学部 松浦 満 (博士研究員 大城和宣)

研究の目的

最近の半導体、金属物質に対する薄膜や薄膜多層構造、超微粒子薄膜など多様な作製技術の上に、電子描画や電子操作技術など微細加工技術が発展し、これらによる物性の制御と電子デバイスへの応用が可能となってきた。本研究では、これら微細加工技術に着目し、新しいスパッタや焼結のプラズマ材料プロセスも用いて、半導体および磁性体>の新規物質系の作製および物性測定を行い、光学的、磁気的特性の優れた機能発現を目指し、さらに光・電子素子、磁気素子、熱電変換素子への電子デバイス応用を目指し研究を行うことを目的としている。また、これらの素子の設計指針を得るために、これらの物質系の電子物性、及び材料設計に対する理論的研究も行う。

具体的には以下の研究テーマで研究を実施した。

- 電子構造計算と材料・デバイス設計
- 携帯機器用磁気デバイスの開発
- 新規真空装置の開発と光共振器の光機能発現

研究成果

- 電子構造計算と材料・デバイス設計

1. 金属/絶縁体Ti/MgO超格子と電子特性

1-1 研究の背景と目的

金属/絶縁体超格子は、 $\text{CoSi}_2/\text{CaF}_2$ や Ti/MgO の共鳴トンネルダイオードやホットエレクトロントランジスタなどのデバイス応用に向けて実験的な研究がなされている程度で、基礎物性を含めまだほとんど研究がなされていない。金属/絶縁体超格子では、金属層の電子は絶縁体による高いポテンシャルに閉じ込められるため、2次元性の強い電子系となり、金属層の厚みを変化させ電子構造が制御可能である。

今後の展開に向けては金属/絶縁体超格子の電子特性に重要な影響を持つバンド不連続や接合面近くの電子状態などこの系の基礎的な理解を深めることが必要である。本研究では、我々のグループと共同研究している門等により分子線エピタキシー法 (MBE) によって作製されている金属/絶

縁体超格子 Ti/MgO に着目し、電子構造、X-ray吸収及び放出スペクトルの計算を行うと共にバンド不連続について議論した。

1-2 Ti/MgO超格子の構造

Ti/MgO 超格子の構造は、X線構造回折により、Ti層の結晶構造では $a_0=b_0=4.17\text{ \AA}$ 、 $c_0=4.06\text{ \AA}$ の格子定数を持つface centered tetragonal (fct)、MgO層では $a_0=b_0=4.17\text{ \AA}$ 、 $c_0=4.29\text{ \AA}$ の格子定数を持つ正方晶のNaCl構造である。超格子の結晶構造はfct-MgO層の上にfct-Tiを乗せた周期構造となる。MgO層とTi層の界面での接し方の実験の情報は無い。そこで系の全エネルギーを種々の原子面の接し方で計算し、全エネルギーが最少の条件の結果は、O原子の上にTi原子を配置した場合となる。以下の電子状態の計算ではこの原子配置を用いた。

1-3 電子構造の計算

電子構造の計算には密度汎関数法に基づくFLAPW法 (Full - Potential Linearized Augumented Plane Wave method)を用いて計算した。

図1-1にTi層9分子層、MgO層5分子層である

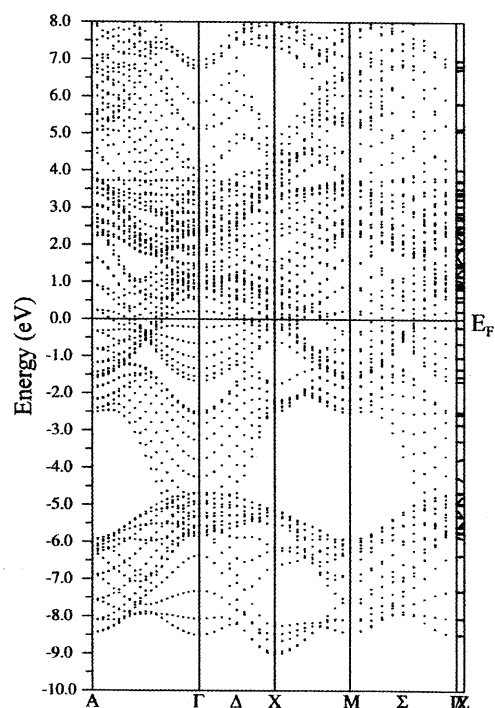


図1-1 Ti/MgO超格子のバンド構造

(Ti)₉/(MgO)₅超格子の電子構造を示している。図1において、フェルミ面を横切るバンドが存在しており、Ti/MgO超格子が金属状態になっていることを示している。 Δ 軸方向に対応し、 $-4 \leq \epsilon_k \leq 0.5$ 、 $-9 \leq \epsilon_k \leq -6$ (eV)付近でフラットなバンドが現れている。これは、MgO層、Ti層に状態が閉じ込められているを示している。sp-like状態はフェルミ面以下の $-4 \leq \epsilon_k \leq 0$ (eV)付近にあり、またTiのsp-like状態とd-like状態が混ざった状態がフェルミエネルギーより上 $0 \leq \epsilon_k \leq 4$ (eV)付近にある。 Δ 軸方向でフラットなバンドとは対照的に分散のあるバンドがあり、TiとMgO層の電子が共存し、積層方向に運動できることを示している。

電子構造計算に基づきTi K端、L_{III}端のX線発光及び吸収スペクトルを計算した。これらのスペクトルでは量子閉じ込め効果による2次元自由電子系を反映した階段状のスペクトルが得られることを示した。

1-4 バンド不連続

超格子の物性を知る上で、バンド不連続を決定することは必要不可欠である。図1-2に、(Ti)₉/(MgO)₅超格子のバンドダイヤグラムの作成結果を示している。ここでは、第一原理計算により得られたバンド構造と密度汎関数法で過小評価されるバンドギャップをMgOの実験値7.76eVを用いることでの補正を考慮しバンドダイヤグラムを求めた。Tiの伝導帯の底とMgOの価電子帯の頂点間のエネルギー差は、 $\Delta E_{VC} = 1.14$ (eV)であり、Tiの伝導帯の底とMgOの伝導帯の底間のエネルギー差は、 $\Delta E_{CC} = 8.90$ (eV)が得られた。

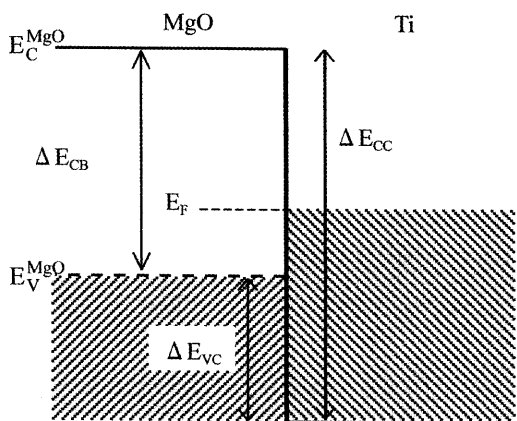


図1-2 Ti/MgO超格子のバンドダイヤグラム

1-5 今後の予定

今後、XPSを測定し、Ti/MgO超格子の価電子帯の電子構造をもとに解析を行い基礎物性を明ら

かにすると共に、トンネリングなどデバイス応用に着目して研究を進める予定である。

2. 新規熱電材料スクッテルダイト系熱電材料

2-1 研究背景と目的

熱電変換技術は、半導体素子により排熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換する、長寿命、小型軽量、保守簡易なシステムであり、分散型のエネルギー回収システムとして期待されている。新しい高機能熱電材料として、新しい展開への芽が出始めているスクッテルダイト系は、単位胞に32個の原子という多くの原子を含み複雑な電子構造を持ち、実験の研究が盛んに行われているが、熱電特性の理論的解明はあまり進んでない。本研究ではスクッテルダイト系の一つであるCoSb₃に着目し、電子構造と基礎的な電子物性について研究を行った。

2-2 CoSb₃の構造

計算では、原子の種類と位置だけを入力し密度汎関数法を用いて理論的に電子に対するポテンシャルを求め電子状態を計算する、いわゆる第一原理計算の手法で行った。計算方法としてはFLAPW (Full - Potential Linearized Augmented Plane Wave method)を用いて計算した。

これまでのCoSb₃の電子構造の計算ではスピン軌道相互作用の効果は無視されている。本研究ではスピン軌道相互作用を考慮し、格子パラメータ(格子定数、Sbの原子位置)を電子の状態により求めた全エネルギーが最小になるように決定した。表1のように格子パラメータの計算結果は、実験値とその差は約0.5%程度で非常に良い一致を示している。

2-3 電子構造とX線吸収、発光スペクトル

計算により決定した格子パラメータを用いて計算した電子構造を図2-1に示した。スピン軌道相互作用を考慮すると伝導帯の底は2重縮退と1重にスピン軌道分裂し、2重縮退した状態が低エネルギー側に位置する。当計算のバンドギャップは110meVである。これはスピン軌道相互作用を無視したSingh等の50meVとSofa等の170meVの中間値となった。

電子構造の計算を用いてX線吸収、発光スペクトルを計算し実験と比較した。最近、Lefebvre-Devos等がCoSb₃のCo K、Sb L_I、L_{II}端のX線吸収スペクトルの測定を行っている。また、Kevan

表1 CoSb₃の格子パラメータ

| | a(Å) | u | v |
|-----------------------|--------|---------|---------|
| CoSb ₃ | | | |
| Exp. (Schmidt et al.) | 9.0385 | 0.33537 | 0.15788 |
| Theor. (This work) | 9.0807 | 0.3337 | 0.1587 |

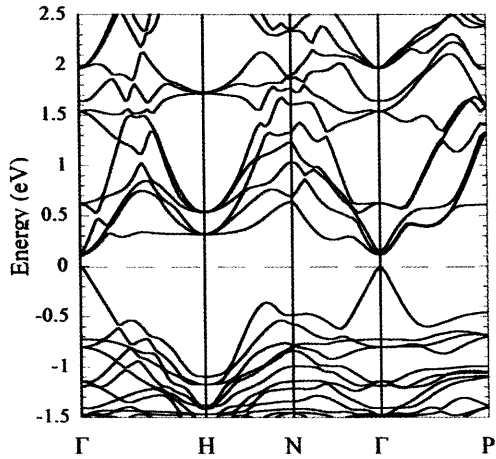


図2-1 CoSb₃の電子構造

等によってL_{III}端のX線発光スペクトルが測定されている。図2-2はCo K端、Sb L_I、L_{II}端のX線吸収スペクトルを示している。実線はX線吸収スペクトルの計算結果であり、点線はX線吸収スペクトルの実験結果を表している。Co K端X-ray吸収スペクトルは1sから伝導帯のp-like状態への遷移過程を持っている。実験結果と計算結果は形状、ピーク位置共に良く一致している。主に7710eV付近にブロードな肩ピークと7717eV付近に非対称的なピークの2つのピークを持っていることがわかる。Sb L_I端のX-ray吸収スペクトルは2sか

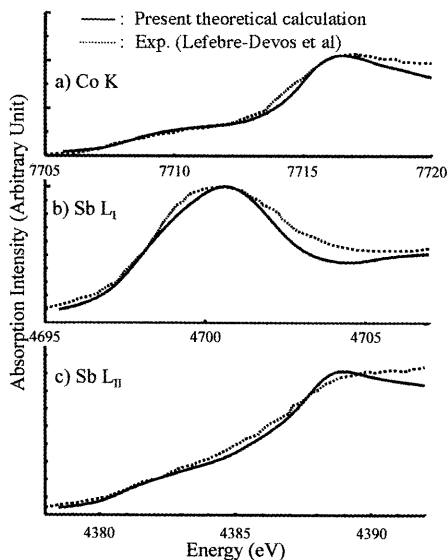


図2-2 CoSb₃のX線吸収スペクトル

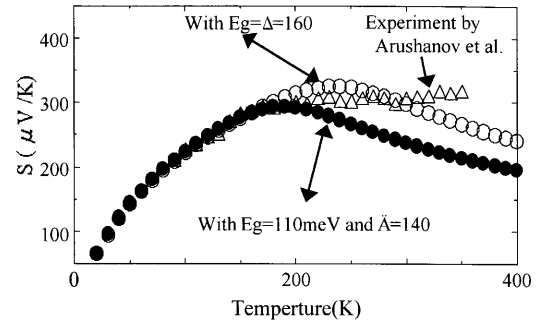


図2-3 CoSb₃の熱電特性

ら伝導帯のp-like状態への遷移過程を持っている。また、Sb L_{II}端のX-rayの吸収スペクトルは2pから伝導帯のs, d-like状態への遷移過程を持っている。両者ともCo K端の場合と同様に、実験結果と計算結果は形状、ピーク位置共に良く一致している。またKevan等により実験がなされているL_{III}端のX線発光スペクトルに関しても計算結果と実験結果は良く一致する。以上より、計算された価電子帯、伝導帯の状態の信頼性が確認できた。

2-4 CoSb₃の熱電特性

熱電変換材料の熱電性能を示す量の一つにゼーベック係数がある。図2-1のバンド構造のバンド端は、4バンドモデル(伝導帯の2つの放物線バンドと伝導帯、価電子帯の1対の非放物線バンド)で良く記述できる。これをベースに緩和時間近似を用いて線形化されたBoltzmann方程式に基づきゼーベック係数の計算を行った。価電子帯に正孔がある濃度で存在していると仮定し、正孔の濃度を100Kでのゼーベック係数Sの実験値を再現するように選んだ。電子、正孔の緩和時間τのエネルギー依存性を無視した場合にはゼーベック係数Sの計算値は温度が200K付近から上で実験値より大きくずれる。そこで、フォノン散乱などミクロな散乱プロセスを考慮して計算を行うと、図2-3の黒丸で示したように実験との一致状況はかなり改善される。ゼーベック係数SはバンドギャップE_gに強く依存する量であることと、良く知られているように密度汎関数法ではバンドギャップE_gの計算値が実験値の1/2~2/3程度の大きさしか与えないことを考慮し、E_gを約1.5倍大きくしE_g=160meV程度とする計算(図5の白丸)と実験との一致はさらに良くなる。

2-5 今後の予定

今後、CoSb₃の他の輸送現象全体の議論を進め、更に、この系にある大きなvoidに原子が入ること

による熱伝導率の低減、従って熱電性能指数の増大という大きな改善がなされフィロドスクッテルダイト系の研究を進める。これにより、これらの系の熱電材料としての設計指針のベースを確立する。

●携帯機器用磁気デバイスの開発

3. 通信用高周波磁気デバイスの開発

3-1 研究の背景と目的

携帯電話端末や無線LANなど、準マイクロ波帯を利用した移動体通信機器においては、フェライトの非可逆特性を利用した磁気デバイス（サーキュレータ／アイソレータなど）が不可欠である。他の部品の低背化が進行する中で、現在この部品は最も背丈が高い部品の一つである。移動体通信機器の薄型化を実現するには、この部品自体を薄くすることが強く望まれる。現行製品のサーキュレータ／アイソレータでは、通常の焼結法で製造したバルクの焼結体から0.6mm程度の厚みに切り出した軟磁性および硬磁性のフェライト小板が主要材料として使用されている。このデバイスのさらなる低背化を実現するには、厚みが0.6mm以下の極薄い板状のフェライトや、 μm オーダーの厚みのフェライト薄膜を製造する技術を開発する必要がある。

低背型のアイソレータ／サーキュレータの実現を目指し、本年度は、硬磁性および軟磁性フェライトを薄く製造する技術の開発に取り組んだ。

3-2 極薄の軟磁性フェライト焼結体の作製

原材料粉をそのまま焼結する方法でサブ μm からサブサブ μm 厚みの極薄フェライト焼結体を直接製造することは困難である。そこで筆者らは、原材料粉をペースト状にし、これを基板上に薄く塗布した後に、焼結する方法を提案した。

具体的には、原材料として低温で焼結可能なNi-Zn-Cuフェライト粉末を選択し、フェライト粉末と有機溶媒および結合材をポットミルで混合し、フェライトペーストを作製した。これを基板上に滴下し、フェライト塗膜を作製した。乾燥させた後、フェライト塗膜の上からも基板で押さえ、一軸加圧のもとで温度900℃で放電プラズマ焼結を行った。この新手法によって、焼結後の厚みが10 μm までの極薄フェライト焼結体を作製できるようになった。

放電プラズマ焼結時に、基板の構成元素がフェライト部に拡散すると、フェライトの磁気特性が

大きく劣化するので、拡散の少ない基板を選択することが良好な軟磁気特性のフェライト焼結体を得るためのポイントであることがわかった。

マイカ、Ti、Mo、Ta、W薄帯を基板として用いて得られた厚みが10 μm のNi-Zn-Cu焼結体の磁気特性について調べた結果を表1に示す。TiとMoを基板として用いた場合について、界面の元素分布状態をEDSで調べた例を図3-1に示す。分かりやすいように、図中、基板とフェライトの界面は白線で示してある。Tiを基板として用いた場合は、図3-1(a)に示されるように、Tiからフェライトへ大きく拡散していた。しかし、融点の高いMoを基板として用いた場合には、図3-1(b)に示すように、拡散はほとんど起きていなかった。さらに融点の高いTaやWを基板として用いた場合についても同様に基板からフェライトへの元素の拡散は小さかった。

このように、基板材料として融点の高い材料を用いれば基板からフェライト層への元素の拡散を抑制できて、バルク値に近い大きなBsと小さなHc（4 Oe程度）が得られることがわかった

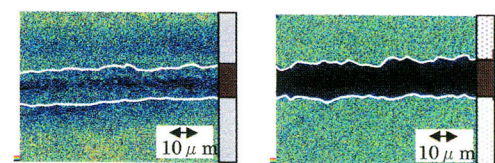
3-3 極薄の硬磁性フェライト焼結体の作製

硬磁性フェライト焼結体の原料としては、Baフェライト粉末を用いた。Baフェライトはマグネトプラムバイト型六方晶フェライトであり、板面に対して垂直方向(c軸)に磁化容易軸があるため、成形時に磁場によって配向させて、硬磁気特性の向上を計った。

厚みが0.5mmの焼結体において、Br=2.5kG、Hc=2.1kOeという良好な硬磁気特性が得られること、前述したのと同じ方法を用いることによって、20 μm 厚程度の極薄フェライトを作製できることを確認している。

表1 基盤材料を変えたときのNi-Zn-Cuフェライトの磁気特性

| 特性 | 基盤材料 | マイカ | Ti | Mo | Ta | W | 基盤無し |
|--------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|
| フェライト厚 (μm) | | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 1000 |
| 融点 (°C) | | ~1400 | 1800 | 2620 | 2850 | 3370 | |
| Bs (kG) | | 0.4 | 1.0 | 1.9 | 2.2 | 2.6 | 3.2 |



(a) 基板としてTi薄帯を使用 (b) 基板としてMo薄帯を使用

□ Ti □ Mo ■ Ni-Zn-Cu フェライト

図3-1 基盤元素の拡散状況

3-3 軟磁性フェライト薄膜の作製

スパッタ法による薄膜形成と大気中アニールによる酸化処理を組合わせて、厚みがサブ μm のMn-Zn軟磁性フェライト薄膜の製造を試みた。Mn-Znフェライト薄膜の形成には、高周波マグネトロンスパッタ装置を用い、ターゲットにはMn-Znフェライト焼結体を用いた。プロセスガスはArのみを導入した。成膜時の基板温度は室温とした。

アニール処理前の薄膜では面内方向抗磁力が130 Oe程度であったのに対して、350 $^{\circ}\text{C}$ の大気中アニールを施すことによって、抗磁力は79 Oeまで減少し、良好な軟磁気特性が得られた。

作製した薄膜は、スピネル構造で(111)面が配向しており、他の面からの回折ピークは観察されなかった。アニール温度が上昇するに従って、(111)面からの回折線ピーク強度が増大しており、結晶性改善の面からもアニールを施すことが効果的であることがわかった。

次年度においては、マイクロ波帯においてさらにいっそう損失の少ないフェライト薄板あるいはフェライト薄膜の開発を行うとともに、電磁界解析シミュレーション技術を用いて、薄いフェライト材料を用いたアイソレータ/サーキュレータの設計を行い、低背型アイソレータ/サーキュレータの試作に取り組みたい。

4. 単磁極型垂直磁気ヘッドの開発

4-1 研究の背景と目的

最近、ハードディスク装置 (HDD: Hard Disk Drive) の応用分野は、旧来のPCのみならず、ビデオレコーダなどの家電製品やデジタルカメラなどモバイル機器へと急速に広まりつつある。磁気を用いた次世代の情報記録方式として研究開発が進められてきた垂直記録方式は、実用化の機運が高まってきている。

筆者らが研究開発中の酸化鉄薄膜を用いた垂直磁気記録用メディアにおいても、いっそう高密度記録性能の向上が期待されている。このメディアの性能改善を行う際の具体的な課題は、記録層の下に軟磁性の裏打ち層を設けた2層膜構造のメディアとすること、および垂直方向に強く、かつ急峻な分布の磁界を発生できる垂直磁気記録方式専用の単磁極型磁気ヘッドと組み合わせることである。本年度は単磁極型磁気ヘッドの試作を行った。

4-2 磁界解析による単磁極型磁気ヘッドの設計

試作に先立って、有限要素法 (FEM: Finite

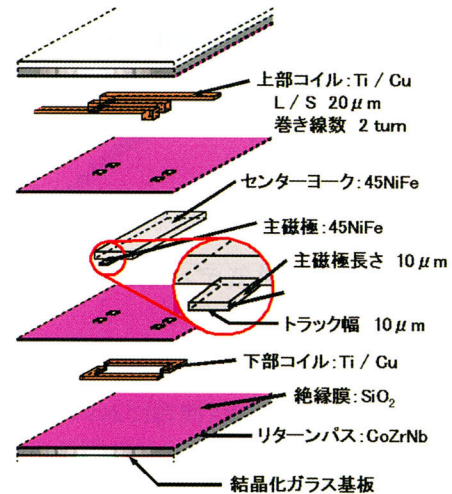


図4-1 単磁極型磁気ヘッドの構造

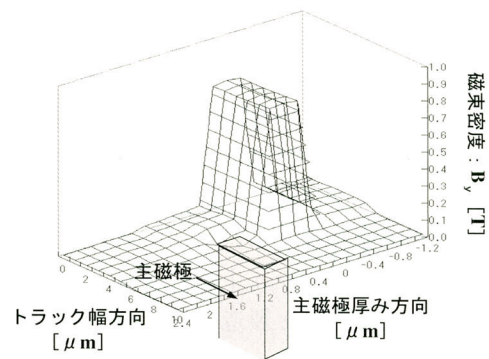


図4-2 記録磁界分布 (三次元)

Element Method) を用いた三次元の非線形磁界解析シミュレーションによって、単磁極型磁気ヘッドの構造の設計および使用する材料の選択を行った。重視した点は、(1)強い磁界の発生、(2)シャープな磁界分布の実現、(3)高周波で使用できるようにインダクタンスの低減、である。

決定した単磁極型磁気ヘッドの基本構造を図4-1に示す。薄膜コイルで生み出された磁束は、センターヨークを通過して主磁極先端に集中する。主磁極先端から出た磁束線は記録層を垂直方向に通過し、メディア裏打ち層を通り、磁気ヘッドのリターンパスへと戻っていく。主磁極は断面積が小さく主磁極途中で飽和しやすいため、高Bs材料を選択する必要がある。主磁極材料としてCoZrNb薄膜を用いれば、記録起磁力0.1 AT以上において、酸化鉄薄膜メディアを飽和記録可能な強度の磁界を発生できることがわかった。

主磁極先端の記録磁界分布を図4-2に示す。急峻で垂直方向に強くシャープな磁界が得られることがわかる。

4-3 単磁極ヘッドの試作

山口大学VBLのクリーンルーム内においてフォトリソグラフィ技術を用いて、設計した単磁極型ヘッドを製作した。パターンングはリフトオフ法により行なった。

単磁極ヘッドの完成写真を図4-3に示す。単磁極型垂直磁気ヘッドの主要部（コイルおよび主磁極）の大きさは、 $0.2\text{ mm} \times 0.6\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ である。インダクタンスは11 nHと小さく、高周波での書き込みに適した特性となった。

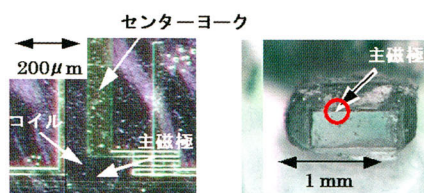


図4-3 試作した単磁極完成写真

●新規真空装置の開発と光共振器の光機能発現

5. 新規真空装置の開発

5-1 研究の背景と目的

次世代の半導体LSIのさらなる高集積化や新しい電子素子を創製するためには、非常に清浄化された 10^{-10} Pa 以下の極高真空環境を安定に維持できる真空成膜装置が是非とも必要である。本研究では、新たな真空材料として注目されているチタンの表面処理技術を確認し、ガス放出量の極めて少ないチタン材料を作り、極高真空に安定に到達できる省エネルギー型の真空装置を開発することを目的とする。

これまでの研究により、研磨を施されたチタン合金のガス放出量は既存の研磨を施されたステンレス鋼のそれと比較して1桁程度少ないことがわかっている。今年度は、チタン合金及びステンレス鋼を用いて同一サイズの真空容器を作製し、真空排気性能を調べ、チタン合金の真空排気性能の良好さを調べた。

5-2 実験方法

作製した真空容器（写真）は体積 $18 \times 10^{-3}\text{ m}^3$ （18リットル）、内表面積 $400 \times 10^{-3}\text{ m}^2$ であり、小規模装置の真空容器に相当する。ステンレス製真空容器は、ガス放出量を少なくするために、精密化学研磨が施されたものを採用した。一方、チタン合金製真空容器は、鏡面研磨を施されたものを採用した。

これら真空容器を主排気に小型のターボ分子ポンプ（排気速度： $70 \times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{sec}$ 、到達能力： $1 \times 10^{-7}\text{ Pa}$ ）と、粗排気にロータリーポンプを用いて、真空排気を行った。圧力測定はヌード型電離真空計を用いた。実験手順として、まず 130°C 、20時間の真空ベーキングを行い、その後の排気特性を調べた。次に30分間大気開放を行い、ベーキングを施さない場合の排気特性を調べた。

5-3 結果と考察

図5-1に 200°C 、20時間ベーキング後のチタン合金とステンレス製真空容器の圧力排気曲線を示す。チタン合金製真空容器では、ベーキング後、急激に圧力が減少し、5分以内に 10^{-7} Pa 台に到達する。一方、ステンレス製真空容器では、約2時間後 10^{-7} Pa 台に到達する。また、15時間後の圧力を比較すると、ステンレスでは $3 \times 10^{-7}\text{ Pa}$ までしか到達しないのに対して、チタン合金では

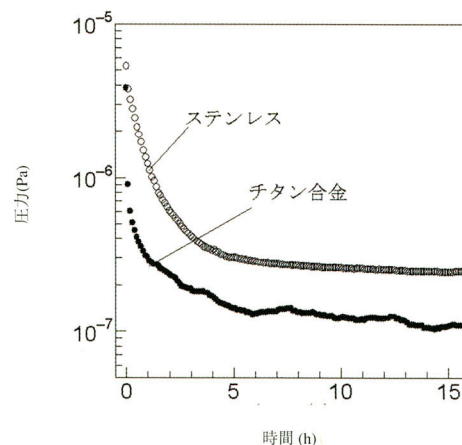


図5-1 130°C 、20時間ベーキング後のチタン合金及びステンレス真空容器の圧力排気曲線

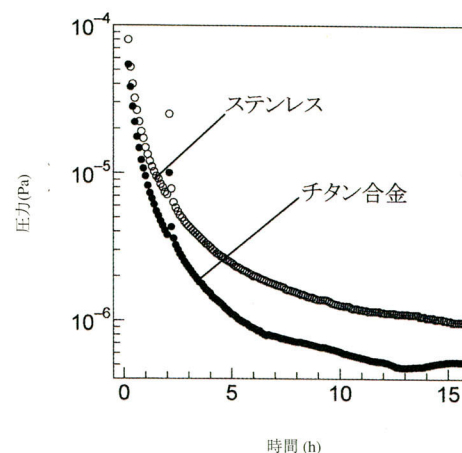


図5-2 ベーキングを施さない場合のチタン合金及びステンレス真空容器の圧力排気曲線

1×10^{-7} Paまで到達することがわかる。なお、この到達圧力 1×10^{-7} Paは排気に用いたターボ分子ポンプの排気性能に一致する。これらのことから、チタン合金は、ベーキング後のガス放出量がステンレスよりも格段に少ないことを反映して、1)短時間での圧力低下及び、2)到達圧力の向上を示すことがわかった。

図5-2に大気解放後ベーキングを施さない場合のチタン及びステンレス鋼製真空容器の圧力排気曲線を示す。 1×10^{-6} Paに到達する時間を比較すると、ステンレスの場合16時間、チタン合金の場合約4時間となり、チタン合金では排気時間を約1/4短縮できることがわかる。一方到達圧力を比較すると、ステンレスでは 1×10^{-6} Paであるのに対し、チタン合金は 5×10^{-7} Paと 10^{-7} Pa台に到達する。この 5×10^{-7} Paという値はベーキングを施したステンレスの場合に得られる到達圧力 3×10^{-7} Paと同等である。すなわち、チタン合金の方が1)短時間での圧力低下と2)到達圧力の低減が実現されていることがわかる。

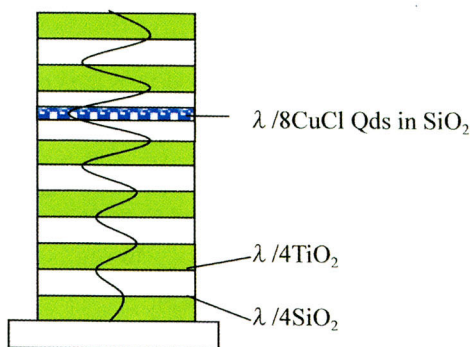


図6-1 作製した垂直型微小光共振器の模式図

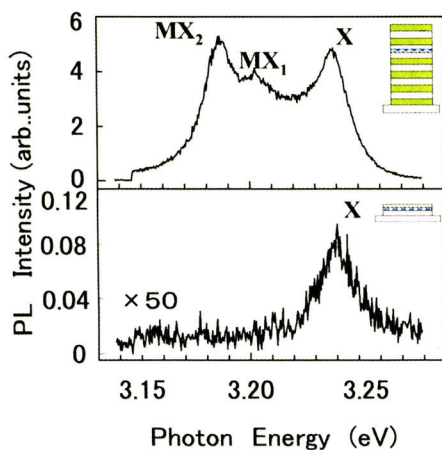


図6-2 微小光共振器と単なるCuCl量子ドットの発光スペクトル

5-4 結論

チタン合金及びステンレス鋼製真空容器の排気特性を測定した結果、チタン合金は1)短時間で圧力排気が可能で、2)到達圧力が向上することがわかった。特に、ベーキングを施さない場合のチタン合金の真空排気性能はベーキングを施した場合のステンレスに匹敵することがわかった。

6. 光共振器の試作と光機能発現

6-1 研究の背景と目的

半導体多層膜や超微粒子を担持させた薄膜の作製および微細加工による回折格子の作成などにより、種々の光閉じこめ構造、光共振器構造を作成できる。これらの物質系では、量子効果による電子状態の状態密度の集中や弱励起による励起状態の飽和が起こり、光非線形性の増大や発光の超放射現象が発現する可能性がある。これらの新現象は次世代の光・電子素子に利用することが期待されている。

本研究では、半導体超微粒子を光活性層とする微小光共振器を作製し、光学実験による評価を行い、共振器の光閉じ込めによる発光の増強を見出すことを目的とした。

6-2 結果と考察

図6-1に作製した微小光共振器の模式図を示す。作製した微小光共振器は光活性層としてSiO₂マトリックスに担持させた半導体CuCl量子ドット、光閉じ込め構造として $(\lambda/4)$ TiO₂/ $(\lambda/4)$ SiO₂誘電体多層膜鏡から構成される。発光の増強を発現させるために、誘電体多層膜が形成する光定在波の腹位置に、 $\lambda/8$ 膜厚の光活性層を配置させた。ここで、 λ はCuCl量子ドットの励起子波長383nm(3.24eV)である。

図6-2に作製した微小光共振器と単なるCuCl量子ドットの同一励起条件下10Kにおける発光スペクトルを示す。ここでX発光はCuClの自由励起子発光、MX₁及びMX₂は励起子分子の崩壊による発光であり、いずれもCuCl量子ドットに固有の発光である。

単なるCuCl量子ドットでは、X発光だけが弱い強度で観測されるのに対して、微小光共振器では、励起子分子発光MX₁及びMX₂も強い強度で観測された。X発光の発光強度を比較すると、微小光共振器のX発光の発光強度は単なるCuCl量子ドットのそれと比較して、約70倍に増大していることがわかる。一方、励起子分子発光において極めて

大きな発光増大が発現していることがわかる。これら微小光共振器における発光特性は、微小光共振器の光閉じ込め効果により、励起子と光子との結合が強められ、発光が増大させられていると考えられる。すなわち、このCuCl量子ドットを活性層とする微小光共振器では自然放出確率が増大させられている可能性がある。

次に、微小光共振器の発光の放射角度依存性を測定した。その結果、励起子分子発光において、ある角度で発光強度が大きくなるという、明瞭な指向性が現れた。この結果は共振器中の励起子分子が位相を揃えていることを示唆するものである。

6-3 結論

今回、CuCl量子ドットを光活性層とする垂直型微小光共振器の発光特性を調べた。微小光共振器の発光は共振器による光閉じ込め効果により、発光が顕著に増強できることがわかった。また、その発光は指向性があり、励起子状態の位相が揃っている可能性があることが示唆された。

産業技術への貢献

本研究で行った理論的解析の研究成果は、半導体超格子・超微粒子の光学的性質の解明や熱電材料に対する物質設計に寄与する。

開発した薄いフェライト材料の製造法によって、アイソレータやサーキュレータなどの磁気デバイスの背丈を低くできることが期待され、携帯電話端末などの小型化・薄型化・高機能化に結びつく。

単磁極型垂直磁気ヘッドを設計・試作したことによって、筆者らが研究開発中の酸化鉄磁気メディアと組み合わせ、いっそうの高密度記録の実現が期待される。

チタン合金は極めて少ないガス放出性能を示し、既存のステンレスと比較して真空排気性能が優れていることがわかったので、種々の真空部品・真空容器に適用できる。実際、地元企業との共同研究により、チタン合金製真空装置を開発中である。

研究発表

【特許】

①EU Patent 01308739.0-2210

Magnetic recording medium and process for producing the same
Santoki, Teruaki/ Kakihara, Yasuo / Matsuura, Mitsuru / Yamamoto, Setsuo / 2001年

②特願2000-317222 磁気記録媒体

山時照章, 柿原康男, 松浦 満, 山本節夫, 戸田俊行 /

2001年

③国際特許出願準備中

Vacuum equipment made by titanium alloy

Kurusu, Hiroki/ Matsuura, Mitsuru / Yamamoto, Setsuo/ Hesaka Masaki

【論文】 21報

1. H. Anno, K. Ashida, K. Matsubara, G. S. Nolas, K. Akai, M. Matsuura, and J. Nagao: "Electronic Structure and Thermoelectric Properties of Ytterbium-Filled Skutterudites", Proc. Materials Research Society Symposium Fall Meeting, Boston, USA (2001) (in press)
2. K. Koga, K. Akai, K. Oshiro, and M. Matsuura: "Electronic Structure and Thermoelectric Property of Skutterudite CoSb₃", Proc. Materials Research Society Symposium Fall Meeting, Boston, USA (2001) (in press)
3. H. Anno, G. S. Nolas, K. Akai, K. Ashida, M. Matsuura, K. Matsubara: "Electronic Structure of Yb-filled CoSb₃ Skutterudite Studied by X-ray Photoelectron Spectroscopy", Proc. 20-th Int. Conf. on Thermoelectrics, Beijing, China, pp.61-64 (2001).
4. K. Akai, K. Koga, K. Oshiro, and M. Matsuura: "Electronic Structure and Thermoelectric Properties on Skutterudites", Proc. 20-th Int. Conf. on Thermoelectrics, Beijing, China, pp.93-96 (2001).
5. K. Koga, K. Akai, K. Oshiro, and M. Matsuura: "X-ray Spectra of Skutterudite and Filled Skutterudite" Proc. 20-th Int. Conf. on Thermoelectrics, Beijing, China, pp.105-108 (2001).
6. H. Anno, K. Akai, J. Nagao, K. Ashida, M. Matsuura, K. Matsubara: "Electronic Structure of Skutterudite Properties of Co_{1-x}M_xSb₃ (M=Fe, Ni, Pd, Pt) Skutterudites", Proc. 20-th Int. Conf. on Thermoelectrics, Beijing, China, pp.101-104 (2001)
7. 山本節夫, 西村和則, 小嶋勇介, 栗巢.普揮, 松浦 満: "平坦化したフェライト基板に作製した薄膜インダクタ", 粉体および粉末冶金, Vol.48, No.2, pp.150-154 (2001).
8. Setsuo Yamamoto: " Development of small height inductors for DC-DC converter", Proceedings of the Eighth International Conference on Ferrites, 2000, FERRITES, (ICF 8), The Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, ISBN4-9900214-7-9, pp.1135-1137 2001). [招待論文]
9. Setsuo Yamamoto, Yusuke Ojima, Kazunori Nishimura, Hiroki Kurisu, Mitsuru Matsuura, Koichi Ishida and Isamu Okano: " Small height inductor for DC-DC converter", Proceedings of the Eighth International Conference on Ferrites, 2000, FERRITES, (ICF 8), The Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, ISBN4-9900214-7-9, pp.1105-1107 (2001).
10. Setsuo Yamamoto, Shinji Horie, Nobutsugu Tanamachi, Hiroki Kurisu, Mitsuru Matsuura and Koichi Isida: "Fabrication of Ferrite/Permalloy Laminated Core by Spark Plasma Sintering", Proceedings of the Eighth International Conference on Ferrites, 2000, FERRITES, (ICF 8), The Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, ISBN4-9900214-7-9, pp.491-493 (2001).
11. Setsuo Yamamoto, Nobutsugu Tanamachi, Hiroki Kurisu, Mitsuru Matsuura, and Koichi Ishida: " Mn-Zn Ferrite Fabricated by Spark Plasma Sintering", Proceedings of the Eighth International Conference on Ferrites, 2000, FERRITES, (ICF 8), The Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, ISBN4-9900214-7-9, pp.551-553 (2001).
12. S. Yamamoto, K. Hirata, H. Kurisu and M. Matsuura, T.Doi and K. Tamari: "Preparation and magnetic properties of ferrite thin

- film media", IEICE TRANSACTIONS on Electronics, Vol.E84-C, No.9, pp.1142-1146 (2001).
13. S. Yamamoto, K. Hirata, H. Kurisu, M. Matsuura, T. Doi and K. Tamari: "High Coercivity Ferrite Thin-Film Tape Media for Perpendicular Recording", Special Issue of Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.235, pp.342-346, ISSN 0304-8853 (2001).
14. S. Yamamoto, S. Horie, N. Tanamachi, H. Kurisu, M. Matsuura: "Fabrication of High-Permeability Ferrite by Spark-Plasma-Sintering Method", Special Issue of Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.235, pp.218-222, ISSN 0304-8853 (2001).
15. S. Yamamoto, H. Wada, H. Kurisu, M. Matsuura: "High Rate Deposition of Co-Cr Perpendicular Magnetic Anisotropy Films by ECR Sputtering", Special Issue of Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.235, pp.133-137, ISSN 0304-8853 (2001).
16. 平田 京, 山本節夫, 栗巢普揮, 松浦 満, 土井孝紀, 田万里耕作: "反応性スパッタリング法で作製したCo含有酸化鉄薄膜ディスク", 粉体粉末冶金, Vol.48, No.8, pp.742-747 (2001).
17. 平田 京, 山本節夫, 栗巢普揮, 松浦 満, 土井孝紀, 田万里耕作: "有機可塑基板上に堆積させたCo含有酸化鉄薄膜", 粉体粉末冶金, Vol.48, No.8, pp.748-752 (2001).
18. 山本節夫, 平田 京, 栗巢普揮, 松浦 満, 土井孝紀, 田万里耕作: "反応性ECRスパッタ法で作製したCo含有酸化鉄薄膜のプラズマ酸化処理効果," 日本応用磁気学会誌, Vol.26, No.4 (2002). (印刷中)
19. S. Yamamoto, K. Hirata, Takayoshi Kangawa, H. Kurisu and M. Matsuura, T. Doi and K. Tamari: "Magnetic Properties and Recording Characteristics of Co-Containing Ferrite Thin-Film Media Prepared by ECR Sputtering", IEICE TRANSACTIONS on Electronics, (submitted).
20. H. Kurisu, A. Yahata, E. Koba, S. Yamamoto and M. Matsuura: "Enhanced Spontaneous Emission from Distributed Feedback Cavity with CuCl Quantum Dots.", The proceedings of 25th International Conference of the Physics of Semiconductors. Part II p1295
21. H. Kurisu, J. Horie, S. Yamamoto and M. Matsuura: "Enhancement of exciton and biexciton luminescence in CuCl QDs on dielectric multilayers." International J. Modern Physics B 15 (2001) 3841

【口頭発表】国際会議10件、国内会議35件

1. K. Koga, K. Akai, K. Oshiro, and M. Matsuura: "ELECTRONIC STRUCTURE AND THERMOELECTRIC PROPERTY OF SKUTTERUDITE CoSb₃", Materials Research Society Symposium Fall Meeting, G9.3 (2001.11).
2. K. Koga, K. Akai, K. Oshiro, and M. Matsuura: "ELECTRONIC STRUCTURE OF METAL Ti/INSULATOR MgO SUPERLATTICE", Materials Research Society Symposium Fall Meeting, O4.3 (2001.11).
3. H. Anno, K. Ashida, K. Matsubara, G. S. Nolas, K. Akai, M. Matsuura, and J. Nagao: "ELECTRONIC STRUCTURE AND THERMOELECTRIC PROPERTY OF YTTERBIUM-FILLED SKUTTERUDITES", Materials Research Society Symposium Fall Meeting, G2.4 (2001.11).
4. H. Anno, G. S. Nolas, K. Akai, K. Ashida, M. Matsuura, K. Matsubara: "Electronic Structure of Yb-filled CoSb₃ Skutterudite

- Studied by X-ray Photoelectron Spectroscopy", 20-th Int. Conf. on Thermoelectrics, Beijing, China, (2001.6).
5. K. Akai, K. Koga, K. Oshiro, and M. Matsuura: "Electronic Structure and Thermoelectric Properties on Skutterudites", 20-th Int. Conf. on Thermoelectrics, Beijing, China, (2001.6).
6. K. Koga, K. Akai, K. Oshiro, and M. Matsuura: "X-ray Spectra of Skutterudite and Filled Skutterudite" 20-th Int. Conf. on Thermoelectrics, Beijing, China, (2001.6).
7. H. Anno, K. Akai, J. Nagao, K. Ashida, M. Matsuura, K. Matsubara: "Electronic Structure of Skutterudite Properties of Co_{1-x}M_xSb₃ (M=Fe, Ni, Pd, Pt) Skutterudites", 20-th Int. Conf. on Thermoelectrics, Beijing, China, (2001.6).
8. S. Yamamoto, S. Horie, H. Kurisu and M. Matsuura: "Ferrite/Permalloy Laminated Core Fabricated by Spark Plasma Sintering", International Symposium on Physics of Magnetic Materials / International Symposium on Advanced Magnetic Technologies, ISPM/ISAMT2001, PB-26, p.280, Taipei, Taiwan (May 15, 2001).
9. S. Yamamoto, K. Hirata, Takayoshi Kangawa, H. Kurisu and M. Matsuura, T. Doi and K. Tamari: "Magnetic Properties and Recording Characteristics of Co-Containing Ferrite Thin-Film Media Prepared by ECR Sputtering," The 6th Asian Symposium on Information Storage Technology (ASIST-6), MR2001-41, pp.19-24, Shanghai Jiao-Tong University, Shanghai, China (Nov. 7, 2001).
10. H. Kurisu, M. Hesaka, T. Muranaka, S. Yamamoto and M. Matsuura: "Outgassing property of newly titanium alloy material", AVS 48th International Symposium, IUVESTA 15th Int'l Vacuum Congress, & 11th Int'l Congress on Solid Surfaces. Sanfransisco Convention Center (Oct. 27-Dec.1).

グループメンバー

| 氏名 | 所属 | 職 (学年) |
|-------|---------|--------|
| 松浦 満 | 工 機能材料 | 教授 |
| 山本 節夫 | 工 機能材料 | 助教授 |
| 栗巢 普揮 | 工 機能材料 | 助手 |
| 大城 和宣 | yu-vbl | 研究員 |
| 寒川 賢義 | 理工・機能材料 | M2 |
| 古川 健治 | 理工・機能材料 | M2 |
| 木庭 英治 | 理工・機能材料 | M2 |
| 平田 京 | 理工・機能材料 | M2 |
| 堀江 真司 | 理工・機能材料 | M2 |
| 山田 尚子 | 理工・機能材料 | M2 |
| 斉藤 和也 | 理工・機能材料 | M1 |
| 櫻井 俊爾 | 理工・機能材料 | M1 |
| 永富 陽一 | 理工・機能材料 | M1 |
| 仲摩 和浩 | 理工・機能材料 | M1 |
| 二井手 亮 | 理工・機能材料 | M1 |

連絡先

TEL & FAX: 0836-85-9620

E-mail: matsuura@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp