

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

研究目的

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。

研究成果

1. 電子物性の理論的解明と材料・デバイス設計

(1) 超微粒子（量子ドット）での電子、励起子に対するLOフォノン効果

ガラス中の超微粒子系（量子ドット系）の励起子状態に対するLOフォノンの効果を研究した。電子、正孔がまわりの物質にしみ出す有限な閉じこめの場合について、閉じ込めの強弱や電子-LOフォノン相互作用の強弱などで生ずる多くの状況を適切に取り扱えるよう電子（正孔）-LOフォノン相互作用の効果を中間結合と断熱近似法を組み合わせた変分法を用いた。これにより、励起子エネルギーに対するLOフォノン効果を計算し、量子ドットのサイズが大きくなるとバルクの結果と一致する。また、サイズが小さくなるにつれ、バルクの値より小さくなり極限では0になる完全閉じこめ場合と異なり、ポーラロン効果が大きくなることを示した、また、極性物質中の超微粒子系（量子ドット系）での電子や励起子状態に対する電子-LOフォノン相互作用を導き、この系の理論的な取り扱いを開始した。

(2) スクッテルダイト構造物質の電子構造と熱電特性

CoSb₃に代表されるスクッテルダイト物質は立方晶系に属するが、その構造に原子のない大きなVOID空間を含むという特異な特徴を持つ。このこともあり異種原子を添加する微細構造制御により、n型、p型制御や格子熱伝導率の低下などによる熱電特性の高性能化がなされ、高機能熱電材料として注目され研究が活発に進められている。そこで、原子の種類、位置のみの入力で、フィッティングパラメータを含まないで電子状態や物性を計算する第一原理計算手法を用いて、スクッテルダイト構造物質やフィルドの電子構造と熱電特性を研究した。具体的には、電子間の多体相互作用を密度汎関数法で考慮し、FLAPW法（フルポテンシャル線形化APW法）を用いて、CoSb₃やYbFe₄Sb₁₂などのスクッテルダイト、フィルドスクッテルダイトの電子構造、状態密度などを求めると共に、全エネルギー最小の原子位置、X線放出スペクトルを計算した、格子定数など原子位置やX線放出スペクトルは実験と良く一致している。緩和定数の波数（エネルギー）依存性を無視できるとすると、電子構造のみで熱電特性が計算できる、これをもとに熱電特性を計算し実験と比較すると、温度変化など実験を定性的にある程度説明するものの、定量的には差がある。ミクロな散乱機構を考慮すべきであり、計算を進めている。

2. 携帯機器用磁気デバイスの開発

(1) 電源用低背型インダクタの開発

携帯電話端末、デジタルカメラ、ノートパソコンなど、携帯用電子機器においては小型化・薄型化の要求が非常に強い。これらの機器に内蔵される電源回路（DC-DCコンバータ）では、現状ではバルクのフェライト製ドラムコアにウレタン線を巻いた構造のインダクタ（コイル）が使用されており、薄型化を阻害している主要な要因となっている。そこで本研究においては、コイルを薄膜化した低背型のインダクタを2種類、開発した。薄膜コイルはフォトリソグラフィとフレームめっき技術を用いて形成した。

＜試作インダクタ-1＞

ポリイミド基板上に薄膜コイルを形成し、上下をフェライト板ではさみこんだ構造のインダクタについて検討した。サイズが $7\text{mm} \times 8\text{mm} \times 1.26\text{mm}^{\text{t}}$ で、許容電流値 1100mA 以上、インダクタンスが $4.25\mu\text{H}$ 、直流抵抗値が $78\text{m}\Omega$ という、昨年度に試作したものよりもさらなる大インダクタンスと低抵抗化を実現したインダクタを開発した。DC-DCコンバータ回路への実装試験の結果、この試作インダクタでは変換効率が 80% 以上という市販品と同レベルの結果が確認されるとともに、各種の環境（温度・湿度）試験もクリアした。よって、たとえばデジタルカメラ用の電源回路に直ちに現行製品を代替え可能な実用的レベルのインダクタを開発できたといえる。

＜試作インダクタ-2＞

マイクロヘンリー級のインダクタの低背化を追求する研究開発も実施した。安価な焼結フェライト基板に独自の平坦化処理を実施し、その上に微細加工によって薄膜コイルを形成し、さらにその上にフェライト板を置いた構造のインダクタについて検討した。サイズが $5\text{mm} \times 0.85\text{mm}^{\text{t}}$ で、許容電流値 1200mA 、インダクタンスが $2.3\mu\text{H}$ 、直流抵抗が $202\text{m}\Omega$ のものを試作することに成功した。この試作インダクタは、現在実用化されているどのマイクロヘンリー級の市販製品よりも低背（現行製品の約 $1/2$ の背丈）である。

これらの研究成果については、フェライト国際会議をはじめとする国内外の会議で招待講演も含む口頭発表を行うとともに、学術誌への論文発表を行った。

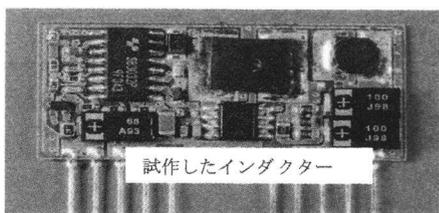


図1 試作したインダクタを実験のDC-DCコンバータ回路に搭載した写真

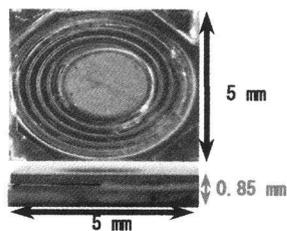


図2 低背型インダクター（現行の $1/2$ ）

（2）通信用高周波磁気デバイスの開発

携帯電話やPHSなどの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（サーキュレータやアイソレータなど）が不可欠である。しかしながらこの磁気デバイスも他部品に比べて薄型化が遅れており、従来製品で使用されているバルクのフェライトに代えてフェライト薄膜や極薄のフェライト板を使用するなど、技術的なブレークスルーが望まれている。ところがこれまでは、酸化物であるフェライトを薄型化するにあたっては組成を精密に制御することが困難であるため、良好な電気的・磁気特性を示すフェライト薄膜やフェライト薄板は得られていなかった。本研究においては、従来製品よりもはるかに低背のサーキュレータやアイソレータなど磁気デバイスへの応用を視野に入れて、薄膜状や極薄板状のフェライトの製造技術の開発に取り組んだ。

＜放電プラズマ焼結法によるフェライト極薄板の製造＞

サブミリ～ミリメートル厚の軟磁性フェライト薄板の製造については、放電プラズマ焼結法を用いて製造することを試みた。造粒したNi-Zn-Cu磁性粉を原料として用いることによって、従来の焼結法よりも低い温度（ 900°C ）、短時間（従来法の $1/7$ の時間）で、従来技術で製造したものよりも非常に緻密（ $5.5\text{g}/\text{cm}^3$ ）で、飽和磁化が大きく（ $624\text{emu}/\text{g}$ ）、軟磁気特性、周波数特性に優れたフェライト薄板を製造できることを見出した。

＜反応性ECRスパッタ法によるフェライト薄膜の製造＞

スピネル構造のフェライト薄膜の製造については、電子サイクロトロン共鳴マイクロ波を利用したスパッタ法（ECRスパッタ法）によって製造することを試みた。従来、一般のスパッタ法によるフェライト薄膜の製造においては、反応性スパッタ成膜のプロセスにおいて 200°C 以上のプロセス温度を必要とし、しかも作製したまま薄膜では酸素が不足しているため、成膜後に大気中で 250°C 以上の高温で2～3時間程度保持して酸化処理を行うことが不可欠であった。これに対して筆者らは、反応性のECRスパッタ法を導入することによって、室温～ 150°C という低いプロセス温度で、しかも酸化後処理工程を設けなくても、酸化が大幅に進み、超平

滑（平均表面粗さが0.4nm以下）な表面性をもつ硬質フェライト（抗磁力3000Oe以上）薄膜を製造できることを初めて見出した。本製造法は軟磁性フェライト薄膜の製造にも有効であると思われる。これら新しいフェライト製造法に関する研究成果については国際会議や学会誌等で発表した。

電源回路用インダクタの開発に関しては、本年度の研究によって技術的にはほぼ実用化レベルのものを開発できたと考えている。企業化にあたっては、設備投資、製造コストの低減、歩留まり率の向上などについての具体的な検討が必要である。

通信用高周波磁気デバイスの開発については、本年度の研究によってフェライトの低温製造法の目処がついたことから、今後はサーキュレータやアイソレータなど具体的な磁気デバイスへの応用を検討していきたい。

3. 半導体微粒子を活性層とした微小光共振器の作製

我々は、光活性層に半導体CuCl微粒子を用いた種々の微小光共振器を作製し、励起子-光子強結合系に対する光閉じ込め効果及び光制御の研究を行っている。平成12年度は、誘電体多層膜鏡($\lambda/4$)TiO₂/ $(\lambda/4)$ SiO₂の上に堆積させたCuCl量子ドットや回折格子に光活性層を堆積させた分布帰還型共振器において自然放光の増強が観測されることを明らかにした。以上の成果については、今年度の国際会議で発表し論文とした。さらに最近は、誘電体多層膜鏡($\lambda/4$)TiO₂/ $(\lambda/4)$ SiO₂の上に形成される光の定在波の腹或いは節位置に($\lambda/8$)膜厚のCuCl量子ドットを堆積させた系において、通常のCuClドットと比較して、腹に配置させた試料では自然放光の増強が、節に配置させた試料においては自然放光の抑制が観測でき、自然放光が制御可能であることを見出した。この成果については春の物理学会で発表を行う予定である。

また活性層を誘電体多層膜で挟んだ分布ブラッグ反射型共振器を精度良く作製するために、光透過及び反射の良好な($\lambda/4$)TiO₂/ $(\lambda/4)$ SiO₂誘電体多層膜鏡の作製条件を確立し、誘電体多層膜鏡の中央を $\lambda/2$ 膜厚とした共振器構造(光フィルター)を作製した。その結果、Q値(共振器の鋭さを示す指数)が150という理想値(300)に近い共振器構造が作製できた。今後、この共振器構造の中央に光活性層を挟んだ分布ブラッグ反射型共振器を作

製し、自然放出・誘導放出の制御の実験を行うとともに、励起子-光子強結合系において位相の揃った励起子による協同現象である励起子超放射の発現を目指す。

4. チタンを用いた超高真空成膜装置の開発

今後の半導体ICの高集積化や新しい電子デバイスの開発に対応するためには、超高真空が容易に得られる省エネルギー型の超高真空成膜装置を開発することが要請されている。これまでに、新光産業(株)との共同研究により、純チタンのガス放出特性を調べる研究を行ってきたが、研磨により表面層が変化してしまい、必ずしもガス放出特性に優れた真空材料とはなっていなかった。そこで今年度は、新たなチタン材料に着目し、そのガス放出特性を調べた。

新しいチタン材料を用いて、ガス放出速度測定装置を試作し、新チタン材料と既存材料であるステンレスのガス放出速度を測定した。その結果、研磨を施された新チタン材料のガス放出速度は 1.5×10^{-11} Pam/secが得られた。この値は、研磨を施されたステンレスのガス放出速度 1.5×10^{-10} Pam/secよりも1桁低減されている。また、種々の既存材料で研磨処理や皮膜・コーティング処理さらには400℃数10時間以上の高温ベーキングなど特殊な前処理を施された場合に得られる値の下限値にほぼ匹敵する値となった。今回、前処理は比較的単純な機械研磨とアルコール洗浄及び90℃大気アニーングを行っただけで、極めて低いガス放出速度が得られたことより、新チタン材料は優れた真空材料であることがわかった。

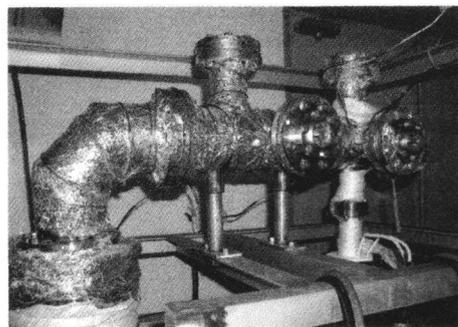


図3 チタン合金製ガス放出速度測定装置

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。磁気記録メディアおよび磁気ヘッドの開発に関する研究成果は、次世代の超高密度記録の実現に寄与する。また、薄膜インダクタの開発についての研究成果は、各種の小型電子機器類の小型化・薄型化・軽量化に寄与する。

研究発表

1. 特許

- 1) 山時照章, 柿原康男, 松浦 満, 山本節夫
特願2000-317222磁気記録媒体 / 2001年
- 2) 栗巢普揮, 山本節夫, 松浦 満, 部坂正樹, 武村厚, "真空容器及び真空部品" (特許出願準備中)

2. 論文 合計18報

- 1) Oshiro, K., and Matsuura, M.: Exciton-LO phonon interaction in a quantum dot, J. Luminescence, 87-89, 451-453, 2000.
- 2) Zheng, R. and Matsuura, M.: Optical phonons and electron-phonon interaction in quantum wells consisting of mixed crystals, J. Luminescence 87-89, 626-628, 2000.
- 3) Zheng, R. and Matsuura, M.: Well-width dependence of electron-phonon interaction energies in quantum wells due to confined LO mode, Phys. Rev. B 61, 12624-12627, 2000.
- 4) Zheng, R. Matsuura, M. and Taguchi, T: Properties of exciton-LO-phonon interaction systems in zinc-compound quantum wells, Phys. Rev. B61, 9960-9963, 2000.
- 5) Zheng, R., Taguchi, T. and Matsuura, M.: Properties of $Ga_{1-x}In_xN$ mixed crystals and $Ga_{1-x}In_xN/GaN$ quantum wells, J. Applied Phys. 87, 2526-2532, 2000.
- 6) 山本節夫, 棚町信次, 堀江真司, 栗巢普揮, 松浦 満, 石田浩一: "放電プラズマ焼結法による軟磁性コア材の作製", 粉体および粉末冶金, Vol.47, No.7, pp.757-762 (2000).
- 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 8th International Conference on Ferrite. (印刷中)
- 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 8th International Conference on Ferrite. (印刷中)
- 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 8th International Conference on Ferrite. (印刷中)
- 11) Setsuo Yamamoto, Nobutsugu Tanamachi, Hiroki Kurisu, Mitsuru Matsuura, and Koichi Ishida: "Mn-Zn Ferrite Fabricated by Spark Plasma Sintering", Proceedings of the 8th International Conference on Ferrite. (印刷中)

- 12) S. Yamamoto, H. Kurisu and M. Matsuura: "Preparation of ferrite thin-film media by ECR sputtering", The 5th Asian Symposium on Information Storage Technology (ASIST-5), MR2000-39, pp.27-32, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China (Nov. 14-16, 2000).
 - 13) S. Yamamoto, H. Kurisu, M. Matsuura, T. Doi and K. Tamari: "High Coercivity Ferrite Thin-Film Tape Media for Perpendicular Recording", Proceedings of PMRC 2000, The fifth Perpendicular Magnetic Recording Conference 2000, JMMM (2001) [Invited] (印刷中)
 - 14) S. Yamamoto, H. Kurisu, M. Matsuura: "Fabrication of High-Permeability Ferrite by Spark-Plasma-Sintering Method", Proceedings of PMRC 2000, The fifth Perpendicular Magnetic Recording Conference 2000, JMMM (2001). (印刷中)
 - 15) S. Yamamoto, H. Kurisu, M. Matsuura: "High Rate Deposition of Co-Cr Perpendicular Magnetic Anisotropy Films by ECR Sputtering", Proceedings of PMRC 2000, The fifth Perpendicular Magnetic Recording Conference 2000, JMMM (2001). (印刷中)
 - 16) H. Kurisu, K. Nagoya, S. Yamamoto and M Matsuura: "Exciton and biexciton properties CuCl microcrystals embedded in an SiO_2 matrix.", J. Luminescence, 87-89, 390-392, 2000.
 - 17) 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. (in press)
 - 18) H. Kurisu, J. Horie, S. Yamamoto and M. Matsuura: "Enhancement of exciton and biexciton luminescence in CuCl QDs on dielectric multilayers." J. Modern Physics B (in press)
3. 口頭発表: 国際会議、国内会議等、合計51件

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	工・機能材料	V B L 研究員
小嶋 勇介	工・機能材料	M 2
棚町 信次	工・機能材料	M 2
西村 和則	工・機能材料	M 2
濱田 晃一	工・機能材料	M 2
堀江 淳一	工・機能材料	M 2
森田 潤也	工・機能材料	M 2
寒川 賢義	工・機能材料	M 1
古賀 健治	工・機能材料	M 1
木庭 英治	工・機能材料	M 1
平田 京	工・機能材料	M 1
堀江 真司	工・機能材料	M 1
山田 尚子	工・機能材料	M 1

連絡先

TEL & FAX: 0836-85-9620

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