

博士論文概要

【課程博士一覧】

高橋 和生	「Solid Particle Formation and Strongly Coupled Phenomena in Non-equilibrium Plasmas」 (非平衡プラズマにおける微粒子の形成及び強結合現象に関する研究)	平成13年1月23日
Alongkarn Chutinan	「Theoretical Analysis of Fundamental Waveguide Structures for Ultrasmall Integrated Optical Circuits Using Photonic Crystals」 (フォトリック結晶を用いた超小型光集積回路の基本導波路構造の理論解析)	平成13年1月23日
内藤 出	「衛星通信用反射鏡アンテナの多機能化に関する研究」	平成13年1月23日
後藤 幸夫	「自律型走行モデルによる道路交通シミュレーションとその交通制御問題への応用」	平成13年3月23日
Boonchai Techaumnat	「Application of the Boundary Element Method in Electric Power Engineering」(電力工学における境界要素法の応用)	平成13年3月23日
中村 和広	「Heteroepitaxial Growth of InGaP and GaAsP on Si and their Doping Characteristics for the Application to Tandem Solar Cells」 (タンデム太陽電池用InGaPおよびGaAsPのSi上へのヘテロエピタキシャル成長とドーピング特性)	平成13年3月23日 平成13年3月23日
矢野 裕司	「Control of Electronic Characteristics at SiO ₂ /SiC Interface for Power Metal-Oxide-Semiconductor Devices」 (SiCパワーMOSデバイスに向けたSiO ₂ /SiC界面電子物性の制御)	平成13年3月23日
山本 伸一	「磁気力制御型原子間力顕微鏡の開発および薄膜材料のナノスケール評価に関する研究」	平成13年3月23日
櫻井啓一郎	「MBE Growth and Properties of ZnO and ZnCdO Thin Films」 (ZnOおよびZnCdO薄膜のMBE成長と物性に関する研究)	平成13年3月23日
神原 弘之	「ハードウェア記述言語を用いたシステム設計手法の研究」	平成13年3月23日

藤田 智弘	「集積回路の統計的階層化設計手法に関する研究」	平成13年3月23日
橋本 昌宜	「A Study on Performance Optimization for Digital CMOS Circuits in Physical Design」 (物理設計段階におけるデジタルCMOS回路の性能最適化に関する研究)	平成13年3月23日
河野 宜幸	「Study of Spatial Domain Interferometry Technique with Atmospheric Radars」 (大気レーダーを用いた空間領域干渉計技術に関する研究)	平成13年3月23日
安田 岳雄	「Circuit Technologies for High Performance Hard Disk Drive Data Channel LSI」 (高性能ハードディスクドライブデータチャンネルLSIを実現するための回路技術)	平成13年3月23日
藤川 一洋	「Basic Studies on Characteristics of Superconducting Fault Current Limiter with Adjustable Trigger Current Level」 (動作開始電流値の調整可能な超電導故障電流限流器の特性に関する基礎研究)	平成13年3月23日
董 志偉	「Simulation Study on Mode-medium Interaction in a Free Electron Laser Oscillator」 (自由電子レーザー生成における光モードと電子ビームの相互作用に関する数値的研究)	平成13年3月23日
浮田 宗伯	「Real-Time Cooperative Multi-Target Tracking by Communicating Active Vision Agents」 (能動視覚エージェント群による複数対象の実時間協調追跡)	平成13年9月25日

高橋 和 生 (橋教授)

「Solid Particle Formation and Strongly Coupled Phenomena in Non-equilibrium Plasmas」

(非平衡プラズマにおける微粒子の形成及び強結合現象に関する研究)

平成13年1月23日授与

この論文は、微粒子（塵）を含んだプラズマ（微粒子プラズマ）に関する諸現象についてまとめられたものです。論文では、私が京都工芸繊維大学の西野茂弘教授、林康明助教授の研究室に所属し修士課程を経て、本大学大学院電子物性工学専攻の橋邦英教授のもとで博士課程を過ごした中で行った微粒子プラズマに関する全ての実験が網羅されています。

非平衡プラズマは身近には蛍光灯内などに見られ、エッチングや薄膜堆積などの半導体プロセスに頻りに使用されるものです。微粒子は半導体プラズマプロセスにおいては、デバイスの損傷や歩留まりの低下、膜質の劣化をもたらすので、有害であり排除されるものです。その一方で、彗星のダストテールや土星の環の一部などにも見られる微粒子プラズマにおいては、その系の特異性から微粒子自身が科学的に興味深い研究対象となります。特に、プラズマ中で帯電した微粒子間に働くクーロン相互作用により、微粒子の系が固体結晶中の原子配列と同じような構造を形成する現象（クーロン結晶の形成）を解析することは、固体結晶構造中の原子間相互作用やプラズマ中の波動現象などを理解するために非常に有意義です。これらのことをふまえて、本研究では反応性プラズマ中で発生する微粒子やその挙動に注目して実験が進められました。

クーロン結晶の構造には、面心立方や体心立方構造に加えて単純六方構造があります。この構造では、水平に配置された平板電極と平行に六方格子が形成され、鉛直方向にはその格子が粒子位置を変えずに積み重なっています（図1）。この構造から、その背景にある複雑な形成機構が推測されます。クーロン反発力により相互作用する微粒子群が何らかの外力により閉じこめられれば、その相互作用のみで面心立方や体心立方構造が形成されることは容易に理解できます。これに対し、鉛直方向に伸びる微粒子の直線配列がその反発力のみによって形成されることには多くの疑問がわいてきます。この疑問が発端となり、微粒子間相互作用を解析する実験が始まりました。実験では、光の放射圧を利用して微粒子を非接触で操作するレーザーマニピュレーションが行われました。この解析の結果、微粒子は自身よりも下方に位置する微粒子に対しては引力（束縛力）を作用させるが、上方の微粒子に対しては引力を及ぼさないということがわかりました（図2）。先の疑問に対しては、この異方的な力とも言うべき引力がその答えを示しました。この答えを得て、新たな疑問が浮かびます。なぜ負帯電微粒子間に引力が働くのでしょうか？これには諸説紛々があり、さらなる理解のために、今後のこの解析の進捗が望まれます。最後に、お世話になった多くの先生方に感謝の意を表し、論文紹介の締めくくりと致します。

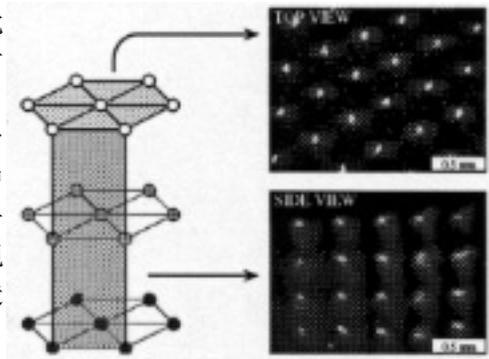


図1 単純六方構造のクーロン結晶

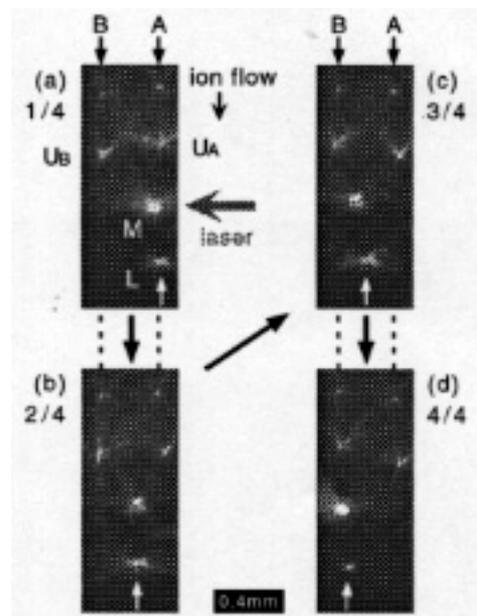


図2 微粒子間相互作用の解析 (0.75秒間の挙動)

Alongkarn Chutinan (野田教授)

「Theoretical Analysis of Fundamental Waveguide Structures for Ultrasmall Integrated Optical Circuits Using Photonic Crystals」

(フォトリソグラフィを用いた超小型光集積回路の基本導波路構造の理論解析)

平成13年1月23日授与

近年、高度情報化社会において我々の生活に大きな変化をもたらしている情報技術は、より高速・大容量という要求に答えるため、「電子」(Electronics)から「光」(Photonics)に移り変わろうとしている。現在の光情報処理技術は主にプレーナー光波回路(PLC)が用いられ、最近市販されるようにな～1テラビット/秒の容量をもつ波長分割多重方式(WDM)の通信ネットワークもこのPLCで作られている。しかしながら、PLCは高価で、サイズが大きく、また、消費電力も大きいという欠点があり、安価でコンパクトな全光集積回路が強く求められている。それを実現するための鍵を握っているといわれているのがフォトリソグラフィと呼ばれる光材料である。フォトリソグラフィは、周期的屈折率変化を持つ材料であり、半導体中の電子のバンド構造と同様に光子のエネルギーに対するバンド構造・バンドギャップを形成する。このフォトリソグラフィバンドギャップを用いることによって、フォトリソグラフィ結晶内部における光の発生・伝播を自在に制御することが可能になるため、フォトリソグラフィ結晶の中に様々な光機能デバイスを組み込んだ超小型光回路の実現が期待される。しかしながら現在、フォトリソグラフィ結晶を用いた光回路の実現のために、具体的に実現可能な構造の設計が全く行われていない。

このような背景の中で本研究は、2次元および3次元フォトリソグラフィ結晶構造においてそれぞれ、基本構造や光回路の基本要素である導波路の理論解析・設計を行い、光回路の媒質としての可能性を最大限に引き出すことを目的として研究を行ってきた。まずは、2次元フォトリソグラフィ結晶スラブ構造について光が構造から漏れやすいという問題を扱い、漏れが生じないような2次元フォトリソグラフィ結晶スラブ構造を設計し、問題を回避し得ることを明らかにした。さらに、設計したスラブ構造において導波路および曲がり導波路を設計・解析し、その透過・反射特性を明らかにした。また、3次元フォトリソグラフィ結晶については、まず構造揺らぎの影響を検討し、構造の正確な位置合わせが最も重要であることを明らかにした。その上で、3次元フォトリソグラフィ結晶における導波路の設計を行い、結晶を構成するストライプ一本を除去するだけで単一モードの導波路が形成できることを見出した。さらに、2本の導波路を交差することにより直角曲がり導波路(図1)が形成でき、広い周波数範囲(波長 $1.55\mu\text{m}$ を中心に 110nm)に渡って95%以上の高い透過率が得られることを明らかにした(図2)。今後は、レーザー光源や結晶欠陥を使った波長分波器など、様々な素子を解析・設計し、それらを組み込んだ超小型光回路への展開などが考えられます。

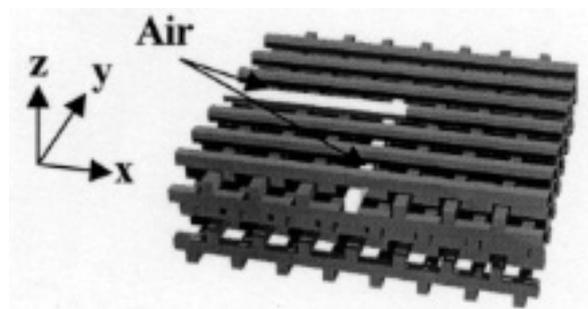


図1：3次元フォトリソグラフィ結晶における急峻な曲がり導波路のモデル。ストライプを除去することにより作製される直線導波路2本を交差させることにより実現できる。

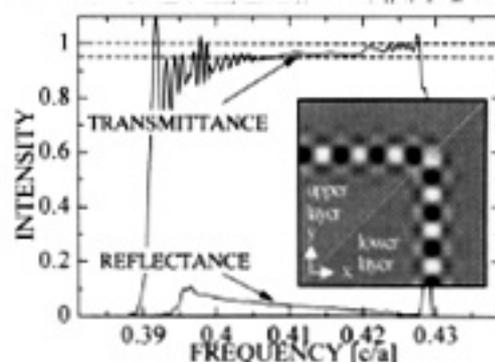


図2：曲がり導波路の透過・反射特性および曲がり部分付近の電界分布。電界分布図内の右下・左上の部分はそれぞれ下・上の層の導波路での電界を示している。

内 藤 出 (佐藤教授)

「衛星通信用反射鏡アンテナの多機能化に関する研究」

平成13年1月23日授与

本論文は、衛星通信用反射鏡アンテナの多機能化に関して行った研究成果をまとめたものである。衛星通信用反射鏡アンテナの多機能化は、マルチビーム化、直交偏波共用化、多周波数帯共用化といった複数機能の共用化、およびビーム成形/再成形といった機能の高度化に代表され、衛星通信の発展・展開・普及に対応した効率的な衛星通信システムの構築に寄与する。本論文は、これらの技術項目に対して行った研究成果をまとめたものである。

まず、マルチビーム化に関して、単一反射鏡形式大ビーム分離角マルチビームアンテナに関する研究成果について論じている。地上から見て大きく離れた複数の衛星からの放送を同時に受信するには、大ビーム分離角マルチビームアンテナが必要となる。また、一般家庭への設置のためには、簡易な構成の単一反射鏡アンテナが望ましい。本論文では、単一反射鏡形式大ビーム分離角マルチビームアンテナの特性を解析的に論じることにより、単一反射鏡形式大ビーム分離角2ビームアンテナの最適構成を解析的に導出している。

次に、ビーム成形/再成形に関して、アレー給電反射鏡形式ビーム再成形アンテナの給電アレー励振係数設計法に関する研究成果について論じている。周波数と衛星電力の有効利用、通信需要の変化に対する柔軟性等の観点から、ビーム再成形アンテナは衛星搭載用アンテナとして有効である。本論文では、アレー給電反射鏡形式ビーム再成形アンテナで、給電アレーをサブアレーに分割し、サブアレー間の振幅比のみを制御する方式における給電アレー励振係数の設計法に関して、手順を踏んだ見通しの良い設計法を提案している。

また、ビーム成形に関して、出力位相分布の周波数依存性の小さいビーム形成回路 (BFN: beam forming network) の設計法に関する研究成果について論じている。アレーアンテナやアレー給電反射鏡アンテナでは、アレーを構成する各素子アンテナを所望の振幅・位相で励振するために、BFNが用いられる。ところが、アレー励振係数は帯域にわたって一定である条件で設計される場合が多く、このとき、周波数の変化に伴うBFN出力の変化はアンテナ特性の劣化原因となる。本論文では、TEM線路を用いた、出力位相分布の周波数に対する1次の依存性が小さいBFNの体系的設計法を提案している。

また、直交偏波共用化に関して、展開面貼り付け法によるグリッド反射鏡アンテナの偏波グリッド作成法に関する研究成果について論じている。グリッド反射鏡アンテナは、その反射面を多数の細い導電性グリッド (偏波グリッド) で構成したアンテナで、低交差偏波特性を実現する。本論文では、従来の平面パターンのエッチング技術を用いて、曲面で構成された鏡面上に容易に偏波グリッドを作成できる、展開面貼り付け法の具体的手順を明らかにしている。

また、多周波数帯共用化に関して、曲面状周波数選択鏡面 (FSS: frequency selective surface) の共振素子配列法に関する研究成果について論じている。曲面FSSは、オフセット鏡面系における交差偏波消去系の構成や鏡面修整技術の適用を可能とする、多周波数帯共用反射鏡アンテナにおける空間での分波器として有効である。FSSの周波数選択特性は共振素子の2次元的な周期配列により実現されるが、一般に、曲面上では完全な周期配列を実現できない。本論文では、曲面上に近似的な周期配列を実現する、新しい曲面FSSの共振素子配列法を提案している。

これらの研究成果は、製品設計に適用されて実用に供されている。また、本研究は、最適で一意的な設計結果を与える一般的な設計法の確立を目指したのもでもあり、反射鏡アンテナの多機能化と性能限界を実現する最適設計技術の確立に寄与するとともに、効率的な衛星通信システム構築に貢献するものと確信する。

後 藤 幸 夫 (荒木教授)

「自律型走行モデルによる道路交通シミュレーションとその交通制御問題への応用」

平成13年3月23日授与

本論文では、まず、道路交通制御問題の評価検証に使用するマイクロモデルを使った道路交通シミュレータを開発している。次に、このシミュレータを使って、道路交通制御に関する3つの問題を扱っている。第1の問題は、交通信号制御の最適化問題である。この問題は、交通需要に応じて交通信号制御変数を最適化する問題である。次の2つの問題は、高速道路におけるAHS交通制御問題である。この問題は、AHS交通全体の安全性と輸送効率に関する問題であり、具体的には交通速度制御問題と合流制御問題の2つである。それぞれの問題についての研究内容はつぎのとおりである。

道路交通シミュレータに使ったマイクロモデルは、自立型走行モデルである。自立型走行モデルでは、仮想障害物という概念を導入している。これによって、通常の道路走行で現れる様々な車両走行パターンを追従走行の一種として統一的に扱うことが出来る。その結果、シミュレータの全体的な構成が単純になり、拡張性も確保されている。開発したシミュレータは、オブジェクト指向モデリング手法を用いており、道路、車両、交通管理システムが独立にモデル化されている。これにより、シミュレータの基本的な枠組みに変更を加えることなしに、様々な道路交通のシステム・制御問題の評価・検証が可能となっている。作成したシミュレータを使って、簡単な道路交通状況をシミュレーションした結果、平均的な特性は従来のマクロモデルと一致する結果となるが、その細部においては現実の交通流により合致した結果が得られることを明らかになっている。

交通信号制御の最適化問題に対しては、自立型走行モデルによるシミュレーション結果に基づいて遺伝的アルゴリズムを適用する新しい近似解法を提案している。この解法は、マイクロシミュレーションにより細部にわたる交通状況をも考慮すること、および遺伝的アルゴリズムにより大域的な程良い解を効率的に求めることを可能としたことに特徴がある。この手法を小規模な道路網に適用した結果、つぎの点が明らかとなった。すなわち、従来の最適化手法ではマクロモデルに伴う仮定のため、極限的状況で現実にはありえないような結果が与えられるのにたいし、提案手法では実用的条件を満足する準最適解が得られる。

高速道路におけるAHS交通速度制御問題に対しては、移動閉塞による制御方式を提案している。この方式は、従来の車間距離一定もしくは車間時間一定制御ではなく、移動閉塞の考え方により安全性を確保しつつ効率的な運行を可能とすることに特徴がある。また、個別車両の速度制御については、目標値のステップ応答にオーバーシュートしないという形で安全性を保證する自動制御則を構成している。自立型走行モデルを使った道路交通シミュレーションによって、提案方式が安全性を確保しつつ、高速度領域で交通流率を大きく出来ることを明らかにしている。

高速道路におけるAHS合流制御問題に対しては、速度制御に用いた移動閉塞という同じ考え方を応用することが可能であることを示し、その具体的方式を提案している。この方式は、従来の車両追従方式と移動閉塞による交通速度制御方式を統合し、さらに従来研究では考慮されていなかった合流加速車線での車線変更をも考慮した合流問題の解法となっている。自立型走行モデルによる道路交通シミュレーションによって、合流制御が交通流に与える影響を評価し、提案方式が合流部の安全性と輸送効率を共に高めることを明らかにしている。

Boonchai Techaumnat（宅間教授）

「Application of the Boundary Element Method in Electric Power Engineering」

（電力工学における境界要素法の応用）

平成13年3月23日授与

この博士論文は電磁界の数値的な計算法の一つである境界要素法を三種類の問題に適用して得られた成果をまとめたものである。境界要素法には色々な手法があるが、対象とする表面を曲面で模擬し、境界量の表現方法や積分法を工夫するなどの改良によって計算精度の向上をはかっている。

a. 接触点の電界（三重点効果）

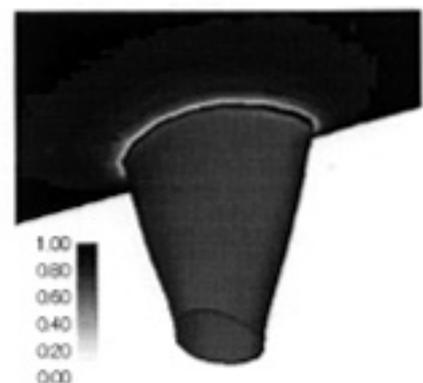
固体絶縁物が導体と接触する点は二種類の絶縁物と導体とが共存する三重点となり、三重点効果と呼ぶ電界異常が生じる。この問題は乾燥したガス絶縁、真空絶縁で特に重要である。これまでの報告は導電性のない完全な絶縁物（誘電体）を対象にして行われているが、本論文では体積導電性ならびに表面導電性の作用を明らかにしている。接触角（あるいは絶縁物表面が導体表面となす角）が0から90度の間にある場合と接触角が0度の場合のそれぞれについて導電性の効果を定量的に解明した。一様な体積導電性は接触角のどちらのケースでも接触点付近の電界を高くする。一方、一様な表面導電性は、接触角が0から90度の間のときは電界を緩和するが、0度のときは逆に電界を高める。

b. 低周波電磁界の人体誘導電流

人の健康に対する商用周波電磁界の影響は国際的にも関心の高い問題である。最近のガイドラインは人体内の誘導電流密度を電磁界曝露量の制限値を決めるベースとしている。人体内誘導電流の計算は、空間（領域）全体を規則的に細かく分割する領域分割の方法で行われているが、人体や臓器の表面は凹凸の形状で模擬している。本論文は初めて滑らかな表面形状の境界要素法を適用し、一様電界（静電誘導）、一様磁界、ヘアドライヤのような局所磁界のそれぞれを対象に計算している。5種類の臓器を含めた人体モデルによって種々のパラメータの効果を調べた。たとえば他の臓器から比較的離れている臓器の誘導電流は、その臓器の導電率と他の個所（部位）の導電率の比で決まることなどを明らかにしている。

c. 固体絶縁物の最適形状

ガス絶縁機器の絶縁性能は最大電界で決定されるので、最大電界を減少させれば機器をよりコンパクトにすることができる。本論文は同軸円筒配置で中心導体を直交方向から支持する柱状（ポスト形）固体絶縁物表面の電界をできるだけ一様にする最適形状を求めている。このような複合誘電体（2種類の絶縁物）で三次元配置の最適化計算は初めてである。製造面を考慮して、完全円柱形（半径一定）、円断面、楕円断面の三種類の条件で最適化計算を行った。円軸円筒の半径比、固体絶縁物の誘電率に依存するが、最大電界を10-35%減少させることができた。図に楕円断面の最適形状を示す。上部が中心導体、中央が形状を最適化した固体絶縁物で、外側の円筒容量（シース）は略している。色の濃さが電界の大きさを示す。



中 村 和 広 (松波教授)

「Heteroepitaxial Growth of InGaP and GaAsP on Si and their Doping Characteristics for the Application to Tandem Solar Cells」

(タンデム太陽電池用InGaPおよびGaAsPのSi上へのヘテロエピタキシャル成長とドーピング特性)

平成13年3月23日授与

太陽電池は、半導体における光起電力効果を活用して、太陽光エネルギーを電気エネルギーに直接変換する半導体素子であり、すでに実用されている。現用の太陽電池は、単一の材料によるpn接合で作られているので、利用できる太陽光スペクトル範囲が限られ、エネルギー変換効率に限界がある。タンデム（縦接続）太陽電池は、異なる禁制帯幅をもつ2種類の半導体を用い、それぞれのpn接合で広い範囲の太陽光のスペクトルを利用して、変換効率を向上させることを目指すものである。本論文は、シリコン(Si)pn接合を下層太陽電池とし、上層太陽電池をIII-V族半導体である $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ および $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ のpn接合で形成して、高効率太陽電池として期待されるタンデム太陽電池の実現を目指している。Si基板上への結晶成長と導電性制御、および低抵抗トンネル接合実現のための高濃度不純物添加などの基礎技術に関して研究した成果をまとめたもので、主な成果は以下のとおりである。

1. 有機金属気相成長法を用いてSi基板上に格子定数が大きく異なる $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ をヘテロエピタキシャル成長する際、緩衝層としてSiと格子定数の近いGaPを活用することを検討し、成長後、両者の間に存在する歪みについて、高分解能X線回折法およびラマン分光測定法で測定して詳細に解析した。この上に $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ を低温・高温の2段階で成長し、この方法で結晶性の改善が図れることを明らかにした。
2. タンデム太陽電池の上層部と下層部を接続するトンネル接合形成について理論的に解析し、必要な添加不純物量を理論的に検討した。これを基に、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ に錫 (Sn) を添加して $1.3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ というこれまでに報告のない高いキャリア濃度を得た。また、高濃度p型形成のための不純物について考察した。
3. 有機金属分子線エピタキシー法を用いてGaPを緩衝層とし、Si上への $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ のヘテロエピタキシャル成長を試みた。成長層の縦方向と横方向の格子定数を高分解能X線回折法を用いて精密に測定して、引っ張り歪みの存在を明らかにし、歪みの原因が熱膨張の差であることを定量的に示した。Si基板上に成長した $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ のほうがGaP基板上に成長したものよりも歪みが大きいことを見だし、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ とSiの熱膨張係数の差が $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ とGaPの差より大きいためであるとした。
4. 有機金属分子線エピタキシー法を用いて $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ への不純物添加を試み、p型用の亜鉛 (Zn) 添加で $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、n型用のSn添加で $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の高いキャリア濃度を得た。また、Si基板上に太陽電池の本体となる $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ のpnダイオードを作製し、整流性を確認した。タンデム太陽電池の上層部と下層部を接続するための低抵抗接合として高濃度ドーピングを試みている。電極の接触抵抗などの影響を除去して接合自体の抵抗を詳しく調べ、タンデム太陽電池への応用可能性について検討する必要があるとしている。

要するに、本論文は、Siを下層部太陽電池とし、その上層部にIII-V族半導体太陽電池を組み合わせ高効率のタンデム型を実現するための基礎研究であり、今後は、実験面での精度を上げた研究を展開することによって所期に掲げた目的が達成されるものと思われる。

矢野 裕 司 (松波教授)

「Control of Electronic Characteristics at SiO₂/SiC Interface for Power Metal-Oxide-Semiconductor Devices」

(SiCパワーMOSデバイスに向けたSiO₂/SiC界面電子物性の制御)

平成13年3月23日授与

本論文は、次世代の超高効率電力変換デバイス、高周波デバイス用材料として期待されている半導体シリコンカーバイド (SiC) のMOS (金属-酸化膜-半導体) デバイス物理と応用に関する研究成果をまとめたものである。SiCは多くの優れた物性を有する広禁制帯幅半導体であり、これを用いることでシリコン (Si) などの既存の材料を用いた半導体デバイスの性能限界を大きく打破する高性能電子デバイスが実現できる半導体材料である。SiCが他の広禁制帯幅半導体 (窒化ガリウムなど) と大きく異なる点は、熱酸化によりSiと同様に良質な絶縁膜であるSiO₂が形成できることである。この熱酸化膜を利用したSiCパワーMOSFET (MOS型電界効果トランジスタ) は、低損失かつ高速スイッチング動作が可能のため、次世代パワーデバイスの最有力として期待されている。しかし、これまでに試作されたSiCパワーMOSFETは、SiCの優れた物性から期待される性能にはほど遠いものしか得られていない。これは、SiO₂/SiC界面における欠陥 (界面準位) 密度が多く、そのためにデバイスに流れる電流がSiO₂/SiC界面に形成されるチャネルで制限されてしまうからである。そして、この界面準位の低減は困難であった。

本研究では、上述のように工学的に大きな問題となっていたSiO₂/SiC界面準位の低減を行うとともに、学術的観点からSiO₂/SiC界面電子物性を明らかにすることを試みた。本研究の主な成果を以下に示す。

[熱酸化条件とSiO₂/SiC界面電子物性の相関の解明]

熱酸化やその後の熱処理条件と界面準位のエネルギー分布や固定電荷の発生の相関について明らかにした。p型MOSキャパシタの容量-電圧特性は熱酸化条件に大きく依存するものの、nチャネルMOSFETの特性にはあまり影響しないことを明らかにし、この現象をドナー型界面準位で説明できることを示した。MOSFETのチャネル移動度を抑制する原因として、界面における実効的な負の固定電荷によることを見いだした。

[MOSFET特性のポリタイプ (結晶多形) 依存性の解明]

SiCには多数のポリタイプが存在するが、結晶作製技術が進んでいるのは4H型と6H型である。これらに加え、15R型ポリタイプを用いてMOSFETを作製し、特性を評価した。MOSFET特性や界面準位の分布とポリタイプの関係について説明し、(0001) 面では15R型がパワーMOSFET用材料として有望であることを示した。

[従来とは異なる新しい面方位を用いることでMOSFETの高性能化を実現]

従来研究されてきた面方位とは異なる (1120) 面を用いることで、大幅なMOSFET特性の向上を達成した。パワーデバイス用材料として最も有望な4H型では、(0001) 面に比べて17倍ものチャネル移動度の改善を実現した。またMOSFET特性の温度依存性が面方位によって大きく異なることを示し、(1120) 面において温度上昇とともにチャネル移動度が減少する結果を初めて得た。

[SiO₂/SiC界面電子物性の面方位依存性の解明]

MOSキャパシタを (1120) 面と (0001) 面上に作製し、評価した。面方位が異なると界面準位の分布も異なり、(1120) 面では導電帯付近で界面準位が少ないことを室温および低温での測定より明らかにした。このことが (1120) 面上MOSFETのチャネル移動度向上に寄与していることを示した。超高効率SiCパワーMOSFETを実現することで、電力変換時のエネルギー損失が大幅に低減できる。電気エネルギーの有効利用は、電気の源である化石燃料や原子力の使用を抑えることにつながり、地球環境改善にも貢献できる。これらのことに、本研究が少しでも貢献できれば幸いである。

山本伸一（松重教授）

「磁気力制御型原子間力顕微鏡の開発および薄膜材料のナノスケール評価に関する研究」
平成13年3月23日授与

走査型プローブ顕微鏡（Scanning Probe Microscopy: SPM）は、ナノスケールでの構造観察法として既にさまざまな分野での材料評価に用いられており、さらに高分解能表面分析法としての応用も期待されているが、材料識別のための分析装置として確立された手法とはまだなっていない。SPMによる材料識別の研究としては、チオール系自己組織化単分子膜により化学修飾したAFM探針を用い、シリコン基板上に堆積された有機分子膜の表面官能基（カルボキシル基、メチル基）を識別する研究が報告されている。しかし、この方法では探針先端に化学的に分子が吸着するものに限られる。

本研究では、有機／無機電子材料のナノメートルレベルでの構造・分析評価を目的として、新たに磁気力制御型原子間力顕微鏡法（MFC-AFM）を開発し（図1参照）、有機および無機薄膜材料のナノスケール構造・物性評価に関する研究を行った。

MFC-AFMは、探針－試料間にはたらく種々の相互作用力を制御するために、探針（カンチレバー）の変位を外部の磁気力によって制御する。従来、高精度かつ十分に大きい外部磁気力を探針－試料間に発生させることが困難であったが、本研究では、コア付きのコイルをスキャナー内部に設置することにより、低電流で大きな力をカンチレバーに供給できるようにした。また、カンチレバー先端につける磁性材料の薄膜化を行い、直流成分の磁気力フィードバック法の開発することにより、外部磁気力を利用してカンチレバーを試料表面にアプローチする際に起こる探針－試料表面間の凝着現象（jump-in-contact）を取り除くことに成功した。

次に、サブミクロン精度のプローバーを用いて、微小なダイヤモンドを探針としてMFC-AFMカンチレバーに取り付け、このMFC-AFMによって硬い金属材料のstiffnessわずかな差が、測定可能であることが分かった。Ni薄膜上にAuメッキし、その後アニール処理するとNi原子が熱拡散によってAu表面上に析出することが、MFC-AFMを用いたstiffnessマッピングにより新たに示された。

また、MFC-AFMを用いた表面力変調法により有機薄膜材料の局所力学特性を評価した。表面力変調法では、探針の振動応答差が画像化される。これによって相分離構造をもつ有機高分子薄膜の粘弾性が、はっきりとマッピングされた。とりわけ、非常に近いヤング率の値をもつ高分子材料（PS/PMMA）においても、MFC-AFMを用いることで材料間の差が検出できることを実証した。さらに、CH₃/CF₃相分離構造では、硬い下地のヤング率の影響を受けることなく、単分子膜自体の力学物性測定が可能であることを示した。

以上のことから、比較的柔らかいカンチレバーを用いて、感度を十分向上させた状態で相互作用力制御することにより、ナノメートルスケールで無機・有機分子材料の構造および基礎物性を明らかにすることができた。さらにMFC-AFMが、新規デバイスの開発のツールとして用いることが可能であることも確認された。

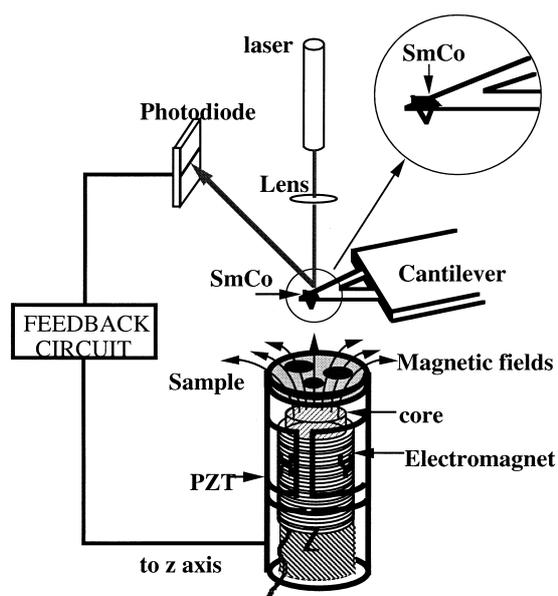


図1 MFC-AFMの構成図

櫻井 啓一郎（藤田教授）

「MBE Growth and Properties of ZnO and ZnCdO Thin Films」

（ZnOおよびZnCdO薄膜のMBE成長と物性に関する研究）

平成13年3月23日授与

酸化亜鉛（ZnO）系材料は、古くから透明電極材料、バリスタ材料、光導波材料、圧電材料など多様な機能材料として利用されてきた。他方3.4eVという紫外域に対応する大きなバンドギャップを持つとともに、電子と正孔がクーロン相互作用によって電子と陽子からなる水素原子類似の状態、すなわち励起子状態が室温でも安定であるという光物性上の大きな特長を持っている。このため、近年可視から紫外域で動作する短波長励起子光機能デバイス材料として有望視されるようになってきた。しかしながら、レーザや発光ダイオードをはじめとする発光デバイスや受光デバイスに励起子の寄与を積極的に取り込んだ光機能デバイス、電子・光複合機能デバイスの実現には高品質薄膜単結晶の成長技術の確立およびその技術を踏まえた物性制御技術の確立が不可欠である。本研究では、ZnO系材料に対する単結晶成長技術や物性制御技術がまだまだ未熟である点に着目して、ZnOやZnCdOの薄膜単結晶成長に対して高品質化に大きな可能性を有する分子線エピタキシャル成長（MBE）技術を採用し、その成長条件の最適化と構造評価や物性評価に関する実験的研究を行った。ZnO薄膜単結晶の高品質化が達成されればp-n接合構造など半導体光機能デバイスに必須の技術構築が可能となる。その意味で本研究は、ZnO系材料の高品質化結晶成長技術に対する新たな基礎的知見を提供するという意義を持つものである。

ZnOのMBE成長においては、Zn蒸気と酸素ガスとの反応を利用するが、酸素分子はそのままの状態では反応には寄与しないので酸素はプラズマ化して供給するのが一般的である。しかし本研究ではまず、酸素原料に酸化窒素（ N_2O および NO_2 ）を用い、熱によるクラッキングやプラズマ化などを行うことなくZnO薄膜が成長可能かどうかに関して詳細な実験を試み、比較的良好な結晶性をもつ単結晶薄膜の成長に初めて成功した。次に反応性を高めるために酸素ラジカルを用いたZnOのMBE成長の成長条件について実験した。ラジカル発生用セルはイオンが基板に飛来しないようにその構造に工夫を加えた。サファイアを基板とした場合の基板面方位や基板温度をパラメータとして、成長層の結晶性に与える影響について検討を加えた結果、成長温度は550℃以上、サファイア基板のa面がc面よりもZnOの品質において優れていることを明らかにした。光機能デバイスへの応用を視野に入れると、ZnCdO混晶などによるバンドギャップ変調を応用したヘテロ構造、量子構造構築が必要になる。このような視点からZnCdO薄膜のMBE成長を行った。その結果、Cd組成の不均一な混和が発生することを示すとともに、特定の成長条件によって初めて強い青色発光を呈するZnCdO薄膜の作製に成功した。この青色発光の起源について、走査型電子顕微鏡、微少領域エネルギー分散X線分析や光物性測定などの結果と併せて考察を行い、励起子の局在により発光の高効率化がもたらされている可能性を示した。

神原 弘 之 (小野寺教授)

「ハードウェア記述言語を用いたシステム設計手法の研究」

平成13年3月23日授与

本研究では、システムLSIのハードウェアの動作仕様とソフトウェアについて、設計資産の再利用性を高めるような言語の仕様とその設計手法について検討し、言語の処理系を実装し、その処理系を用いてシステムLSIを設計することでその有効性を確認しました。

今日のシステムLSIのハードウェア設計は、その動作仕様をハードウェア記述言語を用いて記述し、動作シミュレーションで記述の正しさを確認した後、論理合成系により動作仕様を満たすような論理回路を自動生成することで行われています。論理合成技術の実用化により、ハードウェアの設計効率は大きく改善されましたが、設計対象の回路規模が1,000万トランジスタを越えるまで巨大になったため、過去のあるいは他者により作成された設計資産を再利用することが必須となっています。

本論文では、ハードウェア設計資産の再利用性を高めるためには、論理合成とシミュレーションの間で矛盾が起らず、かつLSI設計者あるいは言語処理系の作成を行う人がその意味解釈について誤解が発生しないように、ハードウェア記述言語の意味定義を行なうことが必要である事を明らかにしました。この考え方にに基づき設計されたハードウェア記述言語UDL/Iについて、その言語処理系の開発を行い、意味定義を含む言語仕様と言語仕様の設計手法が有効であることを確かめました。さらに、UDL/Iとその他の主だった3つのハードウェア記述言語の言語仕様を比較してUDL/Iの特徴を明らかにするとともに、実在する回路を各ハードウェア記述言語で記述してみて、言語仕様の相違が実際の記述でどのように現れるかを示しました。作成された記述は、LSICADの評価あるいはハードウェア記述言語を用いた回路設計の教育に幅広く用いられています。

さらに、ハードウェア記述言語で記述された動作仕様を書き換えることで、ハードウェアの仕様を容易に変更できることは、「ハードウェアとソフトウェア」を同時協調的に設計する「ハードウェア/ソフトウェア協調設計」を行なうことを可能にしました。この設計手法を用いれば、システムLSIで実現すべき機能を、内蔵プロセッサにより処理される「ソフトウェア」で実現するか、それともその機能を効率良く実行できる「ハードウェア」で実現するかを、性能、消費電力、コストといった制約条件に合わせて変更することが可能になり、システムLSIの価格性能比を高めることができます。

本論文では、プロセッサのデータ語長を変化させた場合でもソフトウェアの演算精度を保証できるようにC言語を拡張したValen C言語と、アーキテクチャの変更に柔軟に対応できるリターゲッタブルなValen C言語のコンパイラを開発し、アプリケーションに合わせてプロセッサのハードウェアをカスタマイズするハードウェア/ソフトウェア協調設計手法を実現しています。携帯機器用音声処理向けシステムLSIの実際の設計にUDL/IとValen Cの言語と処理系を適用しました。命令セットや汎用レジスタの本数、データバスの幅を最適化することで、演算性能をもとのプロセッサの約2.5倍に高めながら、回路規模はもとの70%まで縮小することが可能であることが確認されました。またC言語では計算精度に問題が生じるようなアーキテクチャの変更に対しても、Valen C言語で記述されたソフトウェアの再利用性に問題が生じないことが明らかになりました。これにより、本研究の成果が、価格性能比の高いシステムLSIを実現すること、再利用性の高いハードウェアとソフトウェアの設計資産を作成することに有効であることが確かめられました。

藤田 智 弘 (小野寺教授)

「集積回路の統計的階層化設計手法に関する研究」

平成13年3月23日授与

本論文は、大規模集積回路の歩留まりを考慮した設計手法を提案している。集積回路の設計を階層的にとらえ、そこに統計解析と歩留まり最適化の手法を採り入れ、計算コストをかけることなく大規模回路の統計設計を可能としたところに特徴がある。本論文はアナログ回路とデジタル回路の両面から手法の提案を行なっている。

はじめにアナログ回路における取り組みを述べる。まず、階層構造の下層に位置付けられる小規模な回路に対する、統計的歩留まり最適化手法を提案している。特徴的な点は、最適化アルゴリズムに確率過程モデルを使った大域最適化手法を用いているところである。ここで、確率過程モデルを統計的な目的関数に適用できるよう新たに拡張している。オペアンプに適用し歩留まり93.8%を得ている。最適化に要した時間はおよそ100分である。

次に階層的な統計解析を行なっている。この目的のために、MOSFETの物理パラメータからシステム特性までの設計階層構造を利用している。提案手法により、プロセスの物理特性のばらつきモデルをシステム特性のばらつきに結びつけることができ、物理特性のばらつきがシステム特性へどのような影響を与えるか知ることができる。この章ではPLLを題材に階層的な解析手法の実用性の検証を行なっている。回路シミュレーションによる解析との比較実験を行い、提案手法が精度良く解析できることを確認している。また、この手法の応用例として、モンテカルロ解析、ワーストケース解析、感度解析を行ない、本手法の有効性を確認している。

以上の技術成果を受けて、階層的歩留まり最適化手法を提案している。提案手法は、トップダウンによる設計とボトムアップによる解析を繰り返すことで最適化を行なう。歩留まりを考慮するには、トップダウン設計時の仕様生成において、回路特性のばらつきを考慮した余裕が必要である。そこで、余裕を表す指標としてマハラノビスの距離を取りあげ、これを仕様生成問題に採り入れた。実験では、PLLに対して提案手法を適用して、低コストで歩留まり100%の回路を生成することができた。

次にデジタル回路における取り組みを述べる。ここでは、いかにトランジスタの物理特性のばらつきモデルを遅延時間に結びつけるかに重点を置き解析手法を提案している。遅延量とプロセスの物理特性を結びつけるモデルとして、1次係数ベクトルによるモデルを提案している。このモデルを用いると、経路の遅延時間のばらつきをこれらのベクトルの合成で表すことができる。ベクトルの合成には5回の回路シミュレーションのみ必要で、格段に少ないシミュレーション回数で解析が可能となる。実験により解析手法の高精度さを確認している。

次に、上の成果をふまえて、さらにテーブル参照による統計的遅延解析を高速に実現する手法を提案した。この手法は回路シミュレーションの代わりにテーブル参照を行なうため、高速な解析が可能である。1次係数ベクトルを用いることで、モデルを簡略できテーブル量の削減とシミュレーション速度の向上を確認している。また、解析精度も提案手法による解析はSPICEとの誤差が2~5%程度と実用に十分なレベルであることを確認している。

橋本昌宜 (小野寺教授)

「A Study on Performance Optimization for Digital CMOS Circuits in Physical Design」
(物理設計段階におけるデジタルCMOS回路の性能最適化に関する研究)

平成13年3月23日授与

近年のLSIの微細化にともない、物理設計段階では配線抵抗の増大による配線遅延の増加や、集積度の向上による消費電力の増加、プロセス変動による遅延変動、配線間の結合容量によるクロストークノイズなどの問題が深刻化している。LSIの物理設計段階では、セルと呼ばれる基本ゲートやトランジスタの配置、配線が行われる。この設計段階では、ゲートの配置配線情報をもとに回路を部分的に修正し、回路性能の向上をはかる最適化を行う。高性能で信頼性の高いLSIの設計には、遅延変動やクロストークノイズなどを考慮して、回路の遅延時間や消費電力、面積などを最適化する手法が不可欠となっている。

本論文では、消費電力、遅延変動、クロストークノイズの問題に注目し、それぞれの問題に対する物理設計段階での一解決手法を提案した。また、提案手法の有効性を実験的に評価した。

- ・消費電力の削減を行う手法として、次の3つの手法の提案を行った。入力端子の接続最適化手法、グリッチの削減を考慮したゲート寸法最適化手法、セル内トランジスタ寸法最適化手法である。いずれの手法も与えられた遅延制約下で消費電力を最小化することを目的としている。最適化の際には、実設計で用いられている他の設計制約も考慮し、実用性の高い手法となるよう心掛けた。
- ・遅延変動を考慮した回路性能最適化手法として、静的統計遅延解析に基づく遅延時間、消費電力の最適化手法の提案を行った。従来のマージンを設定して行っていた回路設計と比較し、高性能かつ必要十分な回路設計を実現した。
- ・クロストークノイズの低減手法として、攻撃配線の駆動能力を低下させることによりノイズ電圧を削減する手法を提案した。詳細配線後に配線を変更させることなく最適化を行うことが可能であり、実用性が非常に高い。また、提案ノイズモデルは他のノイズ最適化手法にも広く適用可能である。

本論文では、セル内のトランジスタサイズを連続的に変化させることにより、セルベース設計の枠組みの中でフルカスタム設計に近い品質の回路設計を実現する設計手法を提案している。上記のセル内トランジスタ寸法最適化による消費電力削減手法や、クロストークノイズ低減手法はこの設計手法を利用したものである。この設計手法の研究は、半導体理工学センター (STARC) との共同研究で行われた。設計手法の有効性は多くの人に学会発表などで認めていただけたが、実用性の面から多くの厳しい意見もいただいた。大学の研究だけでは得難い設計の現場の状況を聞くことができ、自分の研究にフィードバックできたことは非常に有意義であった。今後、私自身が大学で研究を続けていく上で、常に実際のLSI設計を意識する必要性を身にしみて感じる事ができた。今後は、博士課程での研究の進展はもちろん、微細化に伴うさまざまなLSI設計の問題点に取り組んでいくつもりである。

最後になりましたが、熱心なご指導いただいた小野寺秀俊先生、多くの有益なアドバイスをいただいた小林和淑先生、活発に議論していただいた研究グループのメンバーに深く感謝致します。

河野 宜 幸 (深尾教授)

「Study of Spatial Domain Interferometry Technique with Atmospheric Radars」

(大気レーダーを用いた空間領域干渉計技術に関する研究)

平成13年3月23日授与

気象現象やそれに起因する自然災害の予測、航空機の安全な離発着などに加え、地球規模で問題となっている様々な環境問題を解決するために物質輸送に係わる大気運動の理解が求められており、地球大気における正確な風速測定や微細構造の解明が求められている。本研究では大気レーダーを用いた空間領域干渉計法観測に関してコンピューターシミュレーションとMUレーダー (図1：滋賀県信楽町) を用いた観測結果に基づき、風速推定精度と大気の微細構造がレーダー観測に及ぼす影響について研究を行った。

大気レーダーを用いた大気観測技術としては、現在、ドップラー法が主流である。一方、空間的に離れた複数の受信アンテナを用いる空間領域干渉計法観測は主としてSpaced Antenna (SA) 法とSpatial Interferometry (SI) 法に大別され、前者は水平風速推定に、後者は受信電波到来角の推定に用いられる。

本研究では、まずSA法についてコンピューターシミュレーションを用いて水平風速推定に関するランダム誤差の研究を行った。このSA法を用いた風速推定法では、信号の相関関数全体を計算に用いるFull Correlation Analysis (FCA) 法が実用化されている。それに対して相関関数の一部を用いる簡易手法が示され、本研究ではこれをPartial Correlation Analysis (PCA) 法と呼び、この二つの手法について風速推定精度に関する比較を行った。

その結果、白色雑音成分の信号への付加の有無に関わらず、全体としてFCA法とPCA法はほぼ同程度の推定精度を示した。信号に白色雑音を加えた場合、雑音無しの場合に比べ風速推定誤差が大きくなることも分かった。また、相関関数の一部しか用いないPCA法よりも相関関数全体を用いるFCA法の方がその影響を強く受けることも示された。さらに、風速が大きくなる、アンテナ間隔が狭くなる、という条件のもとではFCAの推定精度は悪化するが、PCAは良い推定精度を保っている。即ち、相互相関関数が自己相関関数に近い領域ではその僅かなズレが引き起こす影響が大きいものと考えられる。従って、実際の観測に応用する際にその領域に相当しないよう設定に注意が必要であることが明らかになった。

次に、揺らぎによる散乱が不均質な乱流層の周辺について、MUレーダーを用いた観測を行った。このような乱流層の周辺ではレーダーのビーム照射中心方向とは異なる方向からの散乱が主体となりうることが報告されていて、ドップラー法による風速推定に誤差を生じる要因となり得ることが報告されている。

観測の結果、境界面が平坦な層と荒れている層が確認され、それぞれ受信電波到来方向は大きく偏移しており、ドップラー法による風速推定に誤差を含んでいることが明らかになり、SI法における補正やSA法による風速推定が有効であることが示された。また、平坦な層の周辺で確認された大気重力波について調べた結果、大気重力波の波面はこの乱流層に並行で、その鉛直方向の移動速度もほぼ等しいことが分かった。これより、この乱流層は大気重力波の破碎によって生じたものと考えられる。このような乱流層の詳細な構造が明らかになった意義は大きい。

以上により、空間領域干渉計法観測を大気レーダーに適用する場合の水平風速推定精度とその有効性、乱流層の微細構造とそのレーダー観測への影響を示すことができた。

今後は、2001年3月にインドネシアに完成した赤道大気レーダー (図2：プキティンギ郊外) にこの研究成果の応用を目指す。



図1：MUレーダー



図2：赤道大気レーダー

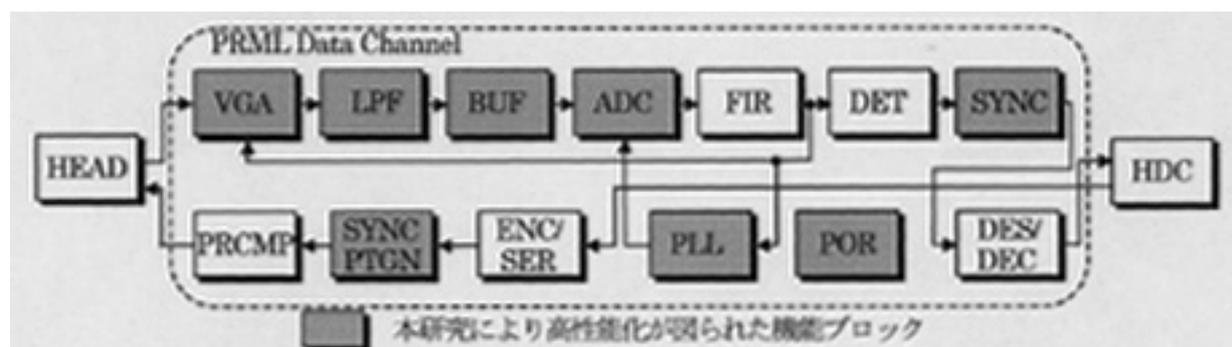
安田 岳雄 (小野寺教授)

「Circuit Technologies for High Performance Hard Disk Drive Data Channel LSI」
(高性能ハードディスクドライブデータチャンネルLSIを実現するための回路技術)

平成13年3月23日授与

本論文は、筆者が京都大学大学院情報学研究科通信情報システム専攻集積システム工学講座および、日本アイ・ビー・エム株式会社野洲研究所、米IBM Corp.アルマデン研究所において研究開発を行った、ハードディスクドライブ (HDD) 用のデータチャンネルLSIの高性能化回路技術についてのものである。ハードディスクシステムへの入力は、デジタルデータであるのに対し、ディスクから直接信号をやりとりするヘッドでは、記録情報は磁界の変化に応じたアナログ信号として扱われる。このアナログ信号は、書き込みヘッドにより磁界信号に変換され、ディスク上に磁化パターンを生成する。一方読み出しヘッドは、磁化パターンが作り出す磁界に応じた、アナログ信号を生成する。データチャンネルとは、デジタルデータと磁気ヘッドで処理されるアナログ信号との変換を行う機能ブロックを指し、高性能化を図る要求項目として、以下の3つがあげられる。(1)磁気ヘッドからデータチャンネルまでは、信号をシリアルでしか処理できないため、データ転送速度の向上を考えた場合、データチャンネルがボトルネックとなる部分であり、HDD全体の中でも最も高速で動作する必要がある。(2)データチャンネルは、アナログ波形からデジタルデータを取り出すため、データエラーレート (誤り率) を大きく左右する。つまりオフセットやノイズに対する影響を最小限に抑える必要がある。(3)HDDの小型化、モバイル (バッテリー動作) 製品化に対応するために、データチャンネルの複雑な機能は低消費電力化が必須となる。

本論文ではこれらの性能改善を達成するために、下図で示されたブロックに対し、いくつかの要素回路技術を提案し、ハードウェア測定あるいは数値計算による検証により、非常に大きな効果が得られることを示している。具体的には、まず始めにアナログ信号処理において問題となるオフセットを、システム全体として効率的かつ自動的にキャンセルする手法を考案した。これにより個々のブロックのオフセット特性要求を緩和できることを、試作測定により検証している。次にアナログ波形の標本化に用いるサンプリングクロックを生成するPLLの、VCO自動キャリブレーションによる広帯域化手法、さらには可変遅延素子を用いた、高速ロックアップを可能とする手法を提案し、それぞれ試作測定により検証している。さらにデジタル信号処理として、データのバイトブロック同期を効率的に行う手法を提案している。ヘッド、データチャンネルでは、データはシリアルで処理されているが、パラレルインターフェースを持つホストサイドでデータを処理するには、バイトブロックの区切りや、PLLの同期データとユーザデータの区切りを認識する必要がある。ノイズによりデータビットの多くが破壊されたとしても、従来の手法に比べ、十分低いエラーレートでこの認識が行えることを数値計算により検証している。最後に低消費電力化をおこなう上で必須となる、低電源電圧化に対応した、リセット信号発生手法についての提案を行い、試作測定によりその動作を検証している。



藤川 一 洋 (塩津教授)

「Basic Studies on Characteristics of Superconducting Fault Current Limiter with Adjustable Trigger Current Level」

(動作開始電流値の調整可能な超電導故障電流限流器の特性に関する基礎研究)

平成13年3月23日授与

電力系統においては供給信頼度を高めるため系統連係を行うが、これは事故時の短絡電流の増大につながることになる。電力系統の直面しているこの相反する安定度と短絡容量の問題を解決する機器として、超電導故障電流限流器が期待されている。本論文は、電力系統に導入された故障電流限流器の特性検討という視点から、限流動作開始電流値の調整可能な超電導限流器を提案・小型モデルを試作し、その限流動作・復帰動作について実験的・解析的に論じた結果をまとめたものである。

序論では、研究の背景を示し限流器の必要性・有用性を述べ、さらに超電導現象を利用した限流器の特長を示している。超電導限流器を系統内の機器として見た研究の重要性を指摘し、これを研究の目的としている。つづいて、対称座標法を用いた限流器を含んだ故障計算により、電力系統の条件から限流器に要求される基本的仕様である限流動作開始電流値と限流インピーダンスを決定する方法を示している。特に、動作開始電流値に要求される精度について言及している。

この検討結果に基づき、言及した精度を実現するため、動作開始電流値の調整可能な超電導故障電流限流器の提案を行っている。その基本動作原理・設計方法を示し、実現可能性を実証するために小型限流器を設計・製作している。この限流器は、2つのコイルを持つ変圧器型で、2次側コイルが可動・脱着可能となっており、2つのコイルの相対的位置を低温容器外から微調整できる構造としている。動作開始電流値は2次側コイル、限流インピーダンスは1次側コイルによってそれぞれ独立に設計できることを指摘している。これによって2次コイルの超電導・常電導転移電流値を変更することなく調整することを提案している。さらに、この限流器を用いて、提案した限流器の動作原理、動作開始電流調整の検証実験を行っている。準定常的に電流を増加させた際の電流限流特性試験、系統事故を模擬した過電流限流試験を行い、その結果、提案原理通りに動作開始電流値が微調整あるいは変更ができることを確認している。待機時・限流時のインピーダンスを測定し、ほぼ設計通りであることを確認している。限流器電流が動作開始電流を越えると、速やかに限流動作を開始し限流インピーダンスが得られることが示されている。動作開始電流値の劣化について、交流損失の算定・測定を行い、その原因として試作限流器の構造の問題点を指摘し、この議論をもとに改良した3相一括限流器を試作し、各相の限流器の動作開始電流値が設計値の5%以内に収まることを実験によって確認している。

また、限流器限流動作後の遮断器動作(遮断・再閉路)による限流器の待機状態への復帰特性について、実験的に検討している。限流器が待機状態に復帰するために要するゼロ電流となる遮断時間は、現在系統で設定されている遮断器動作時間に対して十分短く良好な復帰特性を示すことを明らかにしている。復帰特性に関連して、限流動作中の提案限流器の2次側コイルは、その線の一部のみが常電導化しており、熱的準定常状態においては2次側コイル電流が1次コイル電流によらず一定の最小伝搬電流となることを指摘し、実験によって確認している。2次側コイルの抵抗値は、1次側コイル電流にほぼ比例することを示している。

並行して、提案限流器の動作解析手法として、電気回路方程式と熱伝導方程式をあわせた計算機シミュレーションを提案している。これは超電導線材の材料定数や液体ヘリウムの冷却特性などを考慮した限流動作・復帰動作の検討を行うことを目的としており、実験結果と比較してその有用性を示している。また、限流動作中の2次側コイル温度の線方向分布を解析によって推定し、実験結果から指摘したとおり、限流時の熱的平衡状態では2次コイル電流が最小伝搬電流となることを確認している。

以上、本論文では超電導故障電流限流器を系統機器としてとらえ、限流器に必要とされる限流インピーダンス、動作開始電流値の基礎設計指針を示し、これを元にして動作開始電流値の調整可能な限流器の必要性を指摘して、これを実現する一つの超電導限流器を提案・試作し特性解析を行ったものである。

董 志 偉 (吉川潔教授)

「Simulation Study on Mode-medium Interaction in a Free Electron Laser Oscillator」
 (自由電子レーザ生成における光モードと電子ビームの相互作用に関する数値的研究)
 平成13年3月23日授与

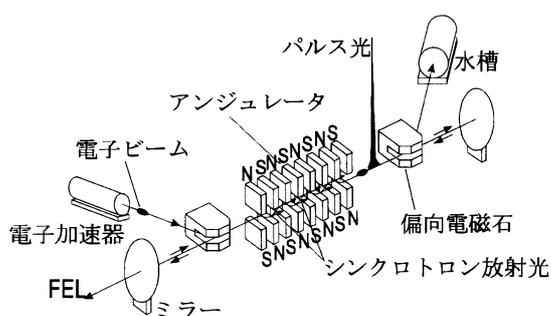
自由電子レーザ (Free Electron Laser; FEL) とは、アンジュレータと呼ばれる周期的な磁場中に光速近くまで加速された電子ビームを入射して蛇行させることにより、蛇行の際に発生するシンクロトロン放射光を重ね合わせて、さらに光共振器を用いてその放射光と電子ビームとを共鳴的に相互作用させることによりコヒーレント光を得るものです (左下図参照)。

FELはその発振波長がアンジュレータの磁場強度、周期長、電子ビームのエネルギーに依存するため、原理的にはマイクロ波領域からX線領域まで連続的に変化させることが可能で、固体レーザや気体レーザのように発振波長が原子、分子、及び固体の電子のエネルギー準位に束縛されないという特徴を持っています。またFELは高真空中で電子ビームエネルギーを光エネルギーに直接変換するためレーザ利得媒質などでの熱損失がなく、高効率で、高いピーク出力が得られます。

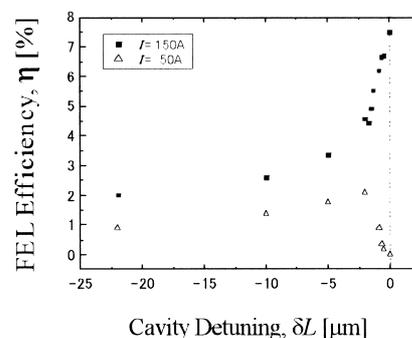
世界初のFEL発振が達成されて約20年たった現在では、アメリカ、ヨーロッパ、日本、韓国などでFEL施設が建設され、電子加速器、電子蓄積リングを用いた多くのFEL発振が報告されており、生医学、生物物理、物性研究などに利用されています。

さらに応用分野を広げるためのFELの高性能化、例えば短波長化、狭帯域化や大出力化などに直ちに繋がる電子ビームの高輝度化 (大電流密度化) が近年の加速器技術の大幅な進展により可能となり、そのような高輝度電子ビームによるFEL発振実験が国内外で盛んに行われています。ところが、この電子ビームの高輝度化に伴って、従来のFELの理論や数値シミュレーションでは説明できない様々な現象が実験で見出されてきました。

例えば、大阪大学では電子ビームの高輝度化による発振波長のシフト、日本原子力研究所では低輝度電子ビームでは発振の得られなかった実験条件での発振が見られています。本研究では、光と電子の速度差によるスリップ効果や、光共振器内の複数モードの競合過程など、光モードと電子ビームとの相互作用の評価が可能な時間・空間依存三次元FELシミュレーションコードの開発を行い、それを用いてこれら新たに見いだされた実験結果を定量的に説明して、その現象の妥当性を明らかにするとともに、それらの効果とFELパラメータとの相関を明らかにしました。右下図は、電子からFELパワーへの変換効率 η の光共振器張Lに対する依存性を、異なる電子ビーム電流Iについてシミュレーションした結果です。従来理論では説明されなかった、大電流時には $\delta L = 0$ でもFEL発振が可能 ($\eta > 0$) であるという実験結果が、上述の光モード・電子相互作用を考慮した本研究のシミュレーションで再現されました。



FELの概念図



電子ビーム大電流化によるFEL発振条件の変化

浮田宗伯（松山教授）

「Real-Time Cooperative Multi-Target Tracking by Communicating Active Vision Agents」
(能動視覚エージェント群による複数対象の実時間協調追跡)

平成13年9月25日授与

実世界の複雑な状況下において自律的に動作する計算機システムにとって、実世界における動的状況の理解は不可欠な機能である。動的状況理解を実現するために、対象追跡は最も重要且つ基盤となる技術の一つである。そこで本論文は、動的且つ多様な状況に適応可能な実時間対象追跡システムを提案した。

広範囲における複数対象の実時間追跡を実現するために、我々は分散協調視覚の考えに基づいてシステムを設計した。分散協調視覚システムは、複数の能動視覚エージェントにより構成されており、能動視覚エージェント間の協調動作によりシステム全体として与えられたタスクを実現する。能動視覚エージェントとは、シーンの観測を行う観測ステーション（アクティブカメラを備えた画像処理システム）の論理モデルである。

まず、広範囲における能動的観測を行うために、我々は視点固定型パン・チルト・ズームカメラを開発した。このカメラは、カメラの投影中心と回転中心が常に一致するように較正されており、パン・チルト・ズームパラメータを変化させながら画像を撮影しても、画像間に視差が存在しないという性質を持つ。この性質により、(1) 撮影画像集合から1枚のパノラマ画像を生成可能である、(2) 生成されたパノラマ画像から任意のパン・チルト・ズームで撮影される画像を抽出可能である。こうした特性を利用することによって、任意のパン・チルト・ズームで観測された入力画像と生成背景画像との比較（背景差分）により対象物体の検出を行うアクティブカメラシステムが実現可能となる。

次に、単一のアクティブカメラによる実時間対象検出・追跡のために、視点固定型パン・チルト・ズームカメラを用いた能動的背景差分法を提案した。このシステムでは、システムの持つ視覚機能とカメラ制御機能をそれぞれ並行に動作するモジュールによって実現し、ダイナミックメモリを介した両機能間の実時間相互作用により、シーン中を移動する追跡対象の継続的追跡を実現している。ダイナミックメモリとは、並列プロセス間の情報交換のための共有メモリである。ダイナミックメモリを介するにより、各プロセスは非同期且つ任意のタイミングで、任意の時刻に観測された情報を獲得することが可能となる。

最後に、能動視覚エージェント群の実時間協調動作を実現するために、我々は三層構成のインタラクションシステムを提案した：

第1層（intra-AVA層）：一つの能動視覚エージェント（Active Vision Agent, 略してAVA）を構成する視覚・行動・通信モジュールと、これらのモジュール間の情報交換を行うダイナミックメモリが存在する層である。これらのモジュール群は、相互に必要な情報を交換しながら動作することにより、一つのAVAとして機能する。

第2層（intra-Agency層）：特定の対象を協調追跡しているAVAのグループをエージェンシと呼ぶ。この層は、一つのエージェンシに所属するAVAによって構成される。同一エージェンシ内のAVA群は、互いの対象検出結果を交換・統合することにより、追跡対象の協調追跡を実現している。

第3層（inter-Agency層）：システム内の全エージェンシにより構成される層である。各エージェンシは、相互に追跡対象とエージェンシの構成に関する情報を交換する。この情報に基づいてエージェンシ間で所属するAVAを交換することにより、追跡対象の移動に応じた適切なエージェンシ構成を実現する。

本システムでは、各層における動的相互作用によって、システム全体として複雑な動的状況下における複数の移動対象の実時間追跡を可能としている。

【論文博士一覧】

森 貞雄	「全反射を利用した磁気ディスク装置のスライダ浮上量計測に関する研究」	平成13年 1 月23日
嶋田 勝	「ECRプラズマを応用した半導体加工装置の研究」	平成13年 3 月23日
山田 昇	「相変化光メモリ材料とその応用に関する研究」	平成13年 3 月23日
澤田 宏	「二分決定グラフを用いた論理合成手法に関する研究」	平成13年 3 月23日
山足 公也	「背景認知処理を利用したアウェアネス指向ヒューマンインタフェースの構築に関する研究」	平成13年 3 月23日
築地 浩	「磁束ポンプ励磁形ブラシレス超電導発電機に関する研究」	平成13年 5 月23日
岩井 誠人	「移動通信環境における電波伝搬モデルとフェージング対策技術」	平成13年 5 月23日
木戸口 勲	「AlGaInP系赤色半導体レーザの高性能化に関する研究」	平成13年 7 月23日