

博士論文概要

【課程博士一覧】

李 明 華	「レドックスフロー電池の化学反応に基づく動的モデルに関する基礎研究」	平成 21 年 3 月 23 日
神 納 祐一郎	「Development of Electron LINAC system for Image Guided Real-time Tracking Radiation Therapy system」 (動体追尾画像誘導放射線治療装置用 電子加速器システムの開発)	平成 21 年 3 月 23 日
三 宅 洋 平	「Computer Experiments on Electric Antenna Characteristics in Space Plasma Environment」 (宇宙プラズマ環境における電界アンテナ特性の計算機実験)	平成 21 年 3 月 23 日
木 村 真 之	「Studies on the Manipulation of Intrinsic Localized Modes in Coupled Cantilever Arrays」 (カンチレバーアレイにおける空間局在モードの操作に関する研究)	平成 21 年 3 月 23 日
西 中 浩 之	「ミストデポジション法による薄膜形成技術に関する研究」	平成 21 年 3 月 23 日
上 田 雅 也	「半極性 GaN バルク基板上への InGaN 量子構造の成長と偏光物性」	平成 21 年 3 月 23 日
Ryan Ganipan Banal	「MOVPE Growth of AlN and AlGaN/AlN Quantum Wells and their Optical Polarization Properties」 (AlN および AlGaN/AlN 量子井戸の有機金属気相エピタキシャル成長とそれらの光学偏光特性)	平成 21 年 3 月 23 日
登 尾 正 人	「Fundamental Study on SiC Metal-Insulator-Semiconductor Devices for High-Voltage Power Integrated Circuits」 (高耐圧パワー集積回路を目指した SiC 金属 - 絶縁膜 - 半導体素子の基礎研究)	平成 21 年 3 月 23 日
高 橋 重 樹	「2 方向斜めエッチングによる 3 次元フォトニック結晶に関する研究」	平成 21 年 3 月 23 日

黒坂剛幸	「フォトニック結晶レーザにおけるビーム出射方向制御に関する研究」	平成21年3月23日
Stumpf Wolfgang Constantin	「Studies on Fundamental Technologies for Fabrication and Evaluation of Combined Photonic Crystal Nanocavity-Quantum Dot Devices」 (フォトニック結晶ナノ共振器と量子ドットの融合系の作製および評価法の確立)	平成21年3月23日
堀田昌宏	「4H-SiC 無極性面基板上への同一ポリタイプを有する4H-AlN 成長とデバイス応用」	平成21年3月23日
増崎隆彦	「JPEG2000 処理システムの構成法に関する研究」	平成21年3月23日
李大成	「A study on the Application of Microplasmas to Novel Optical Devices」 (マイクロプラズマの新規光デバイスへの応用に関する研究)	平成21年5月25日
全炳俊	「Generation of High Quality Electron Beam Using a Thermionic RF Gun for Mid-Infrared Electron Lasers」 (熱陰極高周波電子銃による中赤外自由電子レーザ用高品質電子ビーム生成)	平成21年5月25日
川添雄彦	「Highly Efficient Data Transmission Schemes for Integrated-Media Systems」 (統合メディアシステムにおける高能率データ伝送方式に関する研究)	平成21年9月24日
兼村厚範	「Inversive and Synthetical Bayesian Methods for Image Estimation」 (画像推定のための逆転・合成ベイズ的方法)	平成21年9月24日

【論文博士一覧】

松永高治	「III-V 族化合物半導体 FET を用いたマイクロ波高出力増幅器の高性能化に関する研究」	平成21年7月23日
------	--	------------

李 明 華 (引原教授)

「レドックスフロー電池の化学反応に基づく動的モデルに関する基礎研究」

2009年3月23日授与

1. 研究背景および概要

レドックスフロー (RF) 電池は、酸化還元反応を利用し、電解液を循環させることで充放電する二次電池である。電気再生型燃料電池とも呼ばれる。RF 電池は負荷平準化や出力平均化、瞬時電圧低下対策に適していることが知られている。RF 電池に関するこれまでの研究では、Kazacos 氏らがイオン交換膜における水の移動に関して定量的検討を行っている。また、本間氏と大澤氏は、主に電極反応論に基づいて、電池セル内の電解液イオンの濃度分布に関する偏微分方程式を線形化できる範囲において解析し、理論上の知見を得ている。さらに、榎本氏はある特定の電池に対して、充放電時のステップ電流入力による電圧の出力特性からモデル化を行い、電池の等価回路定数を求めると同時に、定電流充放電を数値的に模擬する結果を得ている。本研究の目的は、物理現象、反応速度論、電気回路による外的制約を考慮した電池モデルを構築し、電池の内部状態と出力特性を把握した上、電池の設計・評価に示唆を与えることである。本論文では、電気系、化学系、流体系の連成を考慮した RF 電池のモデルを構築し、電池の内部状態、出力特性、組電池システムのユニット間の相互作用を把握することで最終的に電池システムの設計・制御に有用な示唆を与えることを目標に研究した成果をまとめたものである。

2. 研究成果

本論文において得られた成果を以下にまとめる。

(1) 供試 RF 電池システムを用いて、充放電電流の広い範囲における出力電圧の実験結果に基づいてその応答特性を表わす実験式を導出し、実験式の電気化学的、物理的意味を検討した。モニタセル電圧に関しては、電気化学的な観点から考察し、Nernst の式を用いた評価値を得た。この値を実験結果と比較し、妥当性を確認した。そして、モニタセル電圧と主セル電圧の差に関しては、近似式を求め、実験値と比較検討した。特に、過渡時の電池の電氣的応答特性に注目し、充放電セル内の過渡状態に関して時定数を考察し、過渡状態を支配する主因は充放電切換え時の平均濃度 (分布) の変化によるものであることを明らかにし、充放電切換え時の過渡状態を表現可能な実験式を得た。

(2) RF 電池の充放電セル内における電解液の濃度変化に注目し、化学反応論に基づいて電池の内部状態を表す電解液の濃度に関するモデル式を導出した。そして、導出したモデル式を用いて数値計算を行ない、実験結果との比較によりモデル式の妥当性を確認した。さらに、このモデル式を用いて RF 電池の過負荷運転特性と実験では困難とされる低周波数応答特性に関して検討した。この検討より、前述の実験における RF 電池の過渡特性で得られた時定数とモデルより得られた濃度変化の減衰項における時定数が同程度であることを明らかにした。

(3) RF 電池の組電池システムにおける電解液濃度のモデル式を導出し、直列、並列、直並列運転時に関して数値計算を行った。これらの検討より、組電池システムの充電深度を高めるためには、ユニットの体積及び流量の均一化が最も重要であることを示した。また、過渡時において、高い出力電圧を得るためには電池ユニット内の電解液の初期濃度によって流量を制御する必要があることも明らかにした。RF 電池の化学反応速度論モデルを用いた解析手法は、実験では困難な様々な運転状態におけるセル間の相互作用の把握を可能とした。

神 納 祐一郎 (石川教授)

「Development of Electron LINAC system for Image Guided Real-time Tracking Radiation Therapy system」

(動体追尾画像誘導放射線治療装置用 電子加速器システムの開発)

平成 21 年 3 月 23 日授与

現在の放射線治療の主流である医療用電子リニアックは、1980 年代初頭には、加速器技術としてはほぼ完成の域に達しているが、高精度放射線治療の観点からは、自由度の高い線量分布の形成、高精度照準という問題を解決する必要があり、IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy)、IGRT (Image Guided Radiation Therapy) 及び動体追尾照射治療が将来技術として開発されつつある。将来の普及型放射線治療装置としては、これらを高度に統合化し、高精度の放射線治療が容易に施行できるようにする必要があるが、これを実現するために、その心臓部である超小型の電子加速器システムの開発を行い、臨床用の実用機として纏め上げた。

全体システム

治療線を体動に追尾させて高速に移動するために、図-1 に示す「ジンバル支持 X 線ヘッド方式」を考案し導入した。X 線ヘッドは、その重心位置で Pan 軸及び Tilt 軸の 2 軸のジンバル上に支持されている。ジンバルは、図-2 に示すように高剛性の O-Ring 構造で支持されている。O-Ring 上には、2 組の kV X 線管球とアイソセンターを挟んでこれと対向するように置かれた FPD (Flat Panel Detector) から構成されるイメージング・サブシステムが装備されている。X 線ヘッドには、アイソセンターにおいて 5 mm のリーフ幅の 30 リーフ対を持つ MLC (Multi Leaf Collimator) を装備して IMRT を可能としている。

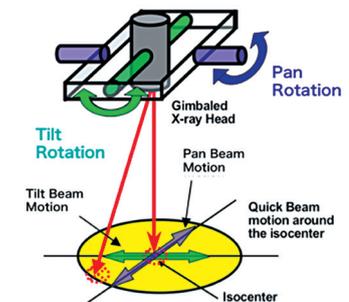


図-1 ジンバル支持 X 線ヘッド方式

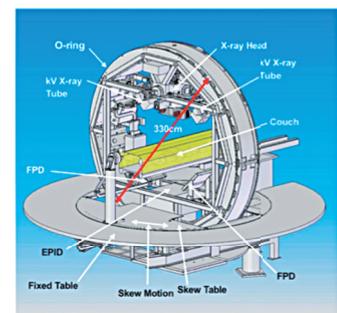


図-2 装置全体の構成図

電子加速器システム

X 線のエネルギーとしては、脳、頭頸部、肺野及び IMRT による体幹部治療を前提として 6 MV を選定した。図-3 に電子加速器システムの主要部分である X 線ヘッドの概要図を示す。電子加速管の全長は、電子銃まで含めて約 40 cm に制約される。動体追尾照射治療に必要なジンバル角速度を実現するため、X 線ヘッドの重量は極力軽くしかも、ジンバル軸周りの慣性モーメントも極力小さくする必要があり、超小型の C バンド電子加速管を開発した。また、本超小型電子加速管は、熱密度が高くその動作は不安定であるが、これを補償して高精度の線量投与を可能とするために、新規の AFC (Automatic Frequency Controller) やビーム・エネルギー安定化機構を開発して採用した。

C バンド電子加速管

一般の医療用電子リニアックでは、伝統的に S バンド (2.8 ~ 3 GHz) のマイクロ波が使用されているが、共振空洞は周波数に反比例して小型化でき、加速管の小型化が可能である。また、真空中の放電破壊電界はほぼ周波数の平方根に比例して上昇し、より短い管長で目標の加速エネルギーが得られる。一方、給電導波管系は、ロータリー・ジョイント等の可動部が存在し、スペースやコストの制約のために高真空に保つことができず、SF₆ 等の絶縁ガスを使用する場合が多い。この場合、経験上、S バンドでの実用的な耐電力の上限は 7 ~ 8 MW であり、C バンド (5 ~ 6 GHz) ではその半分の 3 ~ 4 MW、X バンド (8 ~ 11 GHz) では更に 1.5 MW ~ 2 MW 程度に低下する。また、マイクロ波源の入手性も重要な点であり、高品質の国産クライストロンが安定に入手可能な C バンドを選択した。電子加速管の構成を図-4 に示す。加速構造は定在波型で、同軸結合型のインジェクタ部と側方結合型の加速空洞部から構成する。インジェクタ部はビーム品質を決定する重要部位であるが、良好なビーム品質を確保するため、1 個のプリバンチャ空洞と 2 個のバンチャ空洞及びこれらを同軸結合する 2 つの結合空洞の計 5 個の空洞から構成される特殊なインジェクタ部を開発し、ビーム・ダイナミクスの詳細な数値計算により最適化した。

本システムは、動体追尾照射機能を除いて 2007 年 8 月 29 日付で米 FDA (Food and Drug Administration) の型式承認を取得し、続いて 2008 年 1 月 16 日付で厚生労働省の薬事承認を取得して、国内外の臨床現場で活躍している。

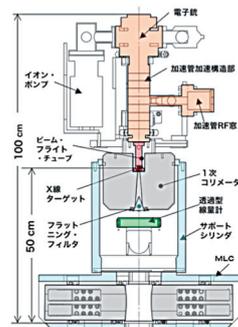


図-3 X 線ヘッド構成図

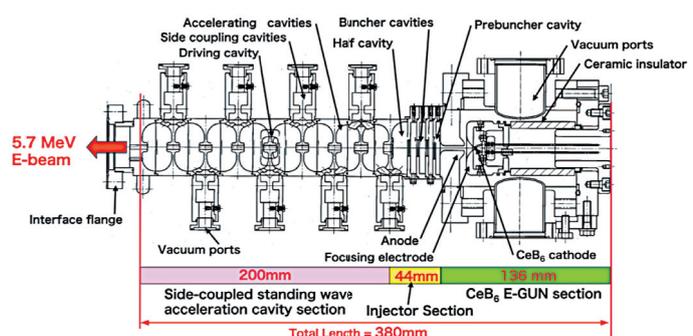


図-4 C バンド加速管構成図

三宅洋平 (大村教授)

「Computer Experiments on Electric Antenna Characteristics in Space Plasma Environment」

(宇宙プラズマ環境における電界アンテナ特性の計算機実験)

平成 21 年 3 月 23 日授与

本研究では、科学衛星に搭載される電界アンテナの波動受信特性を、スーパーコンピュータを用いた大規模数値実験により高精度に解析する方法を提案した。また提案手法により、現実には起こりうる衛星周辺の宇宙プラズマ環境擾乱を再現し、それがアンテナ電気特性へ及ぼす影響を定量的に評価した。得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 無衝突宇宙プラズマ中のアンテナ特性を正確に求めるためには、プラズマの運動論効果を矛盾無く解く事のできる電磁粒子計算機実験手法をアンテナ解析用に拡張する必要がある。本研究では、金属表面での電流計算の境界処理方法、得られた電流データを基礎とする電荷・静電界更新アルゴリズムを新たに開発し、上記目標を達成した。
2. ダイポールアンテナのインピーダンス数値解析を行い、プラズマ波動放射、またはイオンシースの影響によるプラズマ周波数付近での特性変化を調査した。この結果、アンテナ幅に対してシース幅が十分に大きい場合には、実際のアンテナ容量値が従来のシース理論モデルの予測値より大きくなることを見出され、本数値手法がより一般のシース環境に適用可能であることが実証された。
3. 衛星表面からの光電子放出環境での特性解析を行い、アンテナ表面周辺の光電子自身の運動に伴う電流成分が低周波インピーダンス変化に寄与していることを見出し、その周波数特性を明らかにした。この結果は、太陽光が照射する通常の科学衛星システムにおいて、光電子がアンテナや衛星など複数の導体間で形成する複雑な電流ループを考慮したアンテナ電気特性を初めて定量的に評価したものであり、将来の衛星搭載電界アンテナの精密設計を行う上で、重要な知見である。
4. 次世代衛星ミッションにおいては、上記に述べた光電子による予測困難なアンテナ特性変化を防止するため、光電子ガード電極が搭載予定となっている。本研究ではこれらの機構も含めたアンテナ特性解析を可能とするため、上記機構の数値モデルを構築し、それらが正しく機能することを確認した (図参照)。また、数値解析により光電子電流によるセンサー・衛星導体間のカップリングの度合いがガード電極により変化することを見出した。

以上のように、本論文は高精度の3次元計算機実験を用いて、プラズマや衛星周辺の光電子の運動が、電界アンテナの電気特性に与える影響を詳細に解析したものであり、衛星システム・プラズマ間相互作用の定量理解や波動観測用アンテナ精密設計など、学術上、実際上寄与するところが少なくない。

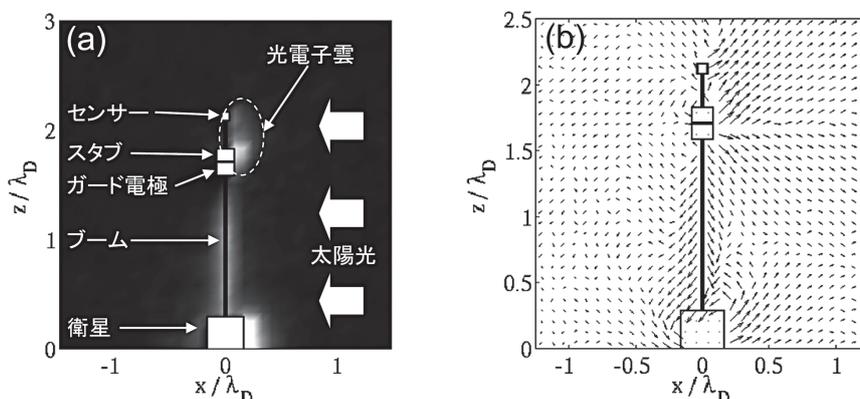


図. 次期衛星ミッション搭載用アンテナ周辺の電子密度分布 (左) と光電子フラックス分布 (右)

木村 真之 (引原教授)

「Studies on the Manipulation of Intrinsic Localized Modes in Coupled Cantilever Arrays」

(カンチレバーアレイにおける空間局在モードの操作に関する研究)

平成 21 年 3 月 23 日授与

空間局在モード (ILM: Intrinsic Localized Mode) とは、非線形性を有する結合振動子におけるエネルギーの局在した振動である (図 1 参照)。空間局在モードは、物質の結晶格子を模したモデルにおいて最初に発見され、近年では種々の物理系においてその存在が確かめられている。それらの物理系の一つに、マイクロカンチレバーアレイが挙げられる。マイクロカンチレバーアレイは、半導体製造技術を基礎とした技術によって作製されたものであり、微小なカンチレバーが機械的に相互結合されたものである。微小なカンチレバーは、構造が単純で作りやすく、MEMS (MicroElectroMechanical System, 微小電子機械系) デバイスにおける振動子として広く利用されている。近年は、このような MEMS デバイスにおいて、カンチレバーの変形に対する復元力の非線形性を積極的に利用するものや、複数のカンチレバーを相互結合し、結合系固有の現象を利用したものが新たに提案されつつある。そのような非線形系や結合系の利用により、これまでにない高い性能を持つ MEMS デバイスが実現できると期待されている。空間局在モードは非線形結合振動子系固有の現象であり、工学的に応用できれば、全く新しい高機能なデバイスを創成できると考えられる。しかしながら、空間局在モードの振る舞いには未解明な点も多く、未だ応用されるには至っていない。そこで、本研究では、空間局在モードの工学的応用を目指し、マイクロカンチレバーアレイにおける空間局在モードの性質や操作手法について解析および提案を行った。得られた成果は以下の通りである。

A) 空間局在モードの移動メカニズム

空間局在モードを結合常微分方程式における周期解として捉え解析を行った。その結果、不安定な解の持つ不変多様体によって特徴付けられる相空間の大域構造によって、空間局在モードの移動が支配されることを示した。

B) 空間局在モードの安定性交替

空間局在モードは振幅分布の空間対称性によって安定性が異なることが知られている。この安定性が、系の非線形性の大きさによって交替しうることを明らかにした。

C) 安定性交替を用いた空間局在モード操作の提案

上記の結果に基づき、空間大域的なパラメータ操作で空間局在モードを操作できることを示した。

D) マクロ電磁機械系による空間局在モードの励起実験

マイクロカンチレバーアレイと力学的にアナロジーの成り立つマクロ電磁機械系を製作し、空間局在モードの励起に成功した。

以上のように、本研究はマイクロカンチレバーアレイにおける空間局在モードの制御へ向けた基礎的研究である。

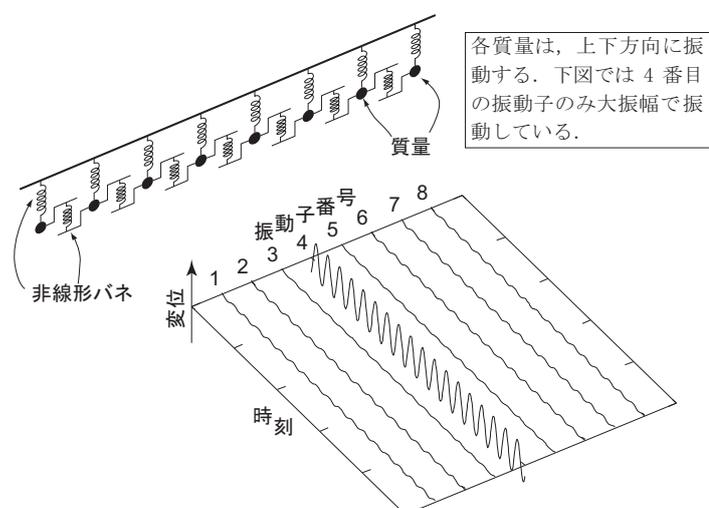


図 1. 空間局在モード

西 中 浩 之 (藤田教授)

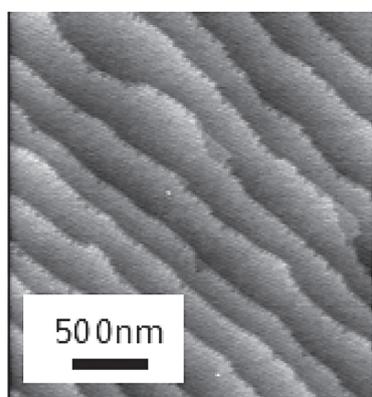
「ミストデポジション法による薄膜形成技術に関する研究」

平成 21 年 3 月 23 日授与

半導体産業は膨大なエネルギーを必要とし、われわれの豊かな暮らしと引き換えに地球環境に重い負荷を課している。半導体の製造にかかるエネルギーの低減と共に、安全な原料をもとに、非毒性かつ資源が豊富な元素で構成される新材料を開発して利用することが、これからのわたしたちに強く求められている。本研究は、酸化物半導体が今後の光・電子デバイスを支える多様な機能を持つことに注目し、有機金属や高真空を必要とせずに高品質の半導体育成を可能とする技術開発を行ったものである。

われわれの研究室では、成長の原料として目的の半導体構成元素を含む安全なものを用い、その水溶液またはアルコール溶液を超音波で霧化してキャリアガスで反応部に輸送し基板上で成長させる、というミストデポジション技術の開発を行ってきた。本研究では、紫外光デバイス、パワートランジスタ、環境センサ等に応用が期待され、豊富で安全な元素に支えられている酸化亜鉛 (ZnO) をベースとした単結晶薄膜成長にこの技術を応用し、そのポテンシャルを明らかにして高品質薄膜の作製をまず目指した。サファイア基板上的ヘテロエピ成長では、バッファ層の効果により移動度 $90 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と、従来の有機金属気相成長法を含む気相法の中で最大クラスの値を持つ ZnO 薄膜を得ることができた。また、ZnMgO 混晶による $3.4\sim 4.0 \text{ eV}$ に亘るバンドギャップエンジニアリングも達成できた。さらに ZnO 基板上的ホモエピ成長において、気相法ではこれまで困難であったステップフローによる成長を実現し、表面にステップ・テラス構造を持ち(図 1)、基板と比べ結晶性の劣化がほとんどない高品質の ZnO 薄膜の成長を実現した。ただ、原料が半導体成長用に準備されたものではなく、純度に問題があることから、薄膜中に不純物の混入があることが問題として残され、今後高純度原料の利用が必要であると考えられた。

ミストデポジション法は、ZnO に限らず多様な酸化物半導体の成長に応用可能と考えられる。そこで最近注目されている非晶質酸化物薄膜の作製を試みた。対象として In-Ga-Al-O 薄膜を選び、ガラス基板上に成膜を試みた。その結果、組成変化により吸収端およそ $4.0\sim 6.0 \text{ eV}$ の制御が可能となった。他方、ミストデポジション法を有機薄膜、例えば導電性高分子 PEDOT:PSS や蛍光性分子の成膜に応用し、従来の真空蒸着やスピコートに比べて原料の利用効率を高め、メタルマスクを用いることでリソグラフィレスのパターニングを行うことができた(図 2)。さらに、In-Ga-Al-O 薄膜とメタルマスクを用いた PEDOT:PSS の成膜を合わせ、ショットキー型深紫外光検出器を安全かつ省エネルギーのもとで作製することができた。光検出器の効率は 210 nm の光に対して 9% と実用上十分な値を示した。



0 nm 1.19

図 1

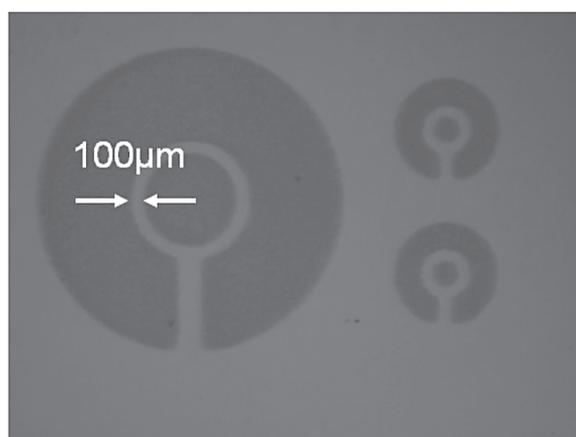


図 2

上 田 雅 也 (川上教授)

「半極性 GaN バルク基板上への InGaN 量子構造の成長と偏光物性」

平成 21 年 3 月 23 日授与

本研究で扱う材料は III 族窒化物半導体のうち、主に紫外発光の GaN と赤外発光の InN、およびそれらの混晶である InGaN である。この InGaN を光デバイスの発光層として用いることで全可視域を再現可能であり、発光ダイオード (LED)、レーザーダイオード等の光デバイスに広く応用されている。

しかし、従来 LED 等に広く用いられている (0001) InGaN/GaN 量子井戸 (QW) 構造では、青から緑、赤色と長波長ほど (高 In 組成ほど) 発光効率が低下することが光デバイス応用上の問題となっている。この発光効率低下の原因の一つが、InGaN/GaN QW に内在する圧電分極由来の大きな内部電界である。一方で、従来の極性面である (0001) に比べて傾いた面 (半極性・無極性面) を用いることで内部電界が低減されることが理論的・実験的 (微細構造上 {11 $\bar{2}$ 2}InGaN/GaN QW において) に示唆されてきた。それを受けて異種基板上への結晶成長により半・無極性面 (In) GaN を作製する研究が広く行われてきた。しかし、異種基板上への半極性面の結晶成長自体の難しさから欠陥密度が非常に高く、良い結晶性が得られていなかった。そこで、本研究では有機金属気相成長法による同種基板上への結晶成長、つまり GaN バルク基板を用いた {11 $\bar{2}$ 2}InGaN 量子構造の作製を提案した (図 1)。

(1) 実用レベルの半極性 {11 $\bar{2}$ 2}InGaN/GaN LED (図 2)

半極性面において転位密度が非常に低い {11 $\bar{2}$ 2}GaN バルク基板を用いた同種基板上への結晶成長を行った。GaN バルク基板は量子構造を作製するには表面が荒かったため、まず成長条件等を最適化した結果、GaN および InGaN/GaN QW 構造において非常に結晶性の良い薄膜が得られた。その後、{11 $\bar{2}$ 2}InGaN/GaN QW LED を作製した結果、極性面以外で初めて、実用レベルの外部量子効率 (例えば緑色発光で 4%) を得た (他研究機関における異種基板上結晶成長では 0.05% 程度)。

この成果はプレスリリースされ、新聞やテレビなどマスメディアから取り上げられた。また、この内容で第 29 回応用物理学会 JJAP 論文賞を受賞、窒化物半導体国際会議である IWN2006 (2006 年、京都) で招待講演となった。

(2) 半極性 {11 $\bar{2}$ 2}InGaN/GaN QW における偏光反転現象

{11 $\bar{2}$ 2}InGaN/GaN QW における偏光特性を詳細に調べ、①バルクに比べて大きな偏光度をもつこと、②従来の理論では予測されていなかった「偏光反転」現象を実験的に見出した。この知見は偏光を利用したデバイスへの応用、さらに半極性 InGaN/GaN QW をレーザーの活性層として用いた場合のレーザーキャビティの作製方向に指針を与える結果でもある。

また、この内容で第 22 回 (2007 年春季) 応用物理学会講演奨励賞を受賞し、窒化物半導体国際会議の IWN2008 (2008 年、スイス) および ICNS-8 (2009 年、韓国) において招待講演となった。

(3) 半極性 {11 $\bar{2}$ 2}InGaN 量子ドット

半極性面 InGaN/GaN 量子ドットでは、①極性面や無極性面に比べて全方位的に内部電界が低減していることが示唆されている。さらに②キャリアの閉じ込め効果により QW に比べてさらなる高効率化が期待できる。本研究では分子層揺らぎを利用した自己形成法で {11 $\bar{2}$ 2}InGaN/GaN 量子ドットを作製できた。また、自己形成法の波及効果として、量子ドットのサイズや In 組成の揺らぎが生じ、光励起により、QW よりも③ブロードな発光が得られた。これら①-③より、高発光効率で蛍光体不使用の白色 LED 等への応用が考えられ、環境負荷の低減が期待できる。

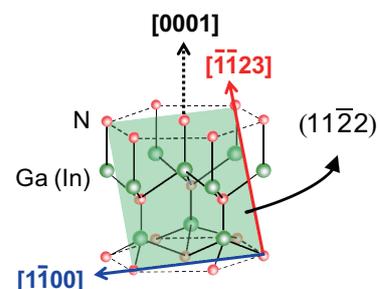


図 1. (In) GaN の結晶構造であるウルツ鉱構造と (11 $\bar{2}$ 2) 面。



図 2. (11 $\bar{2}$ 2)InGaN/GaN QW LED の電流注入による発光の様子 (緑色)

Ryan Ganipan Banal (川上教授)

「MOVPE Growth of AlN and AlGa_xN/AIN Quantum Wells and their Optical Polarization Properties」

(AlN および AlGa_xN/AIN 量子井戸の有機金属気相エピタキシャル成長とそれらの光学偏光特性)

平成 21 年 3 月 23 日授与

In recent years, research toward deep-ultraviolet (DUV) emission range (200-300 nm) using III-V nitride materials (InN, GaN and AlN) has gained momentum driven by the necessity for compact, robust and high-efficiency DUV emitters which are targeted for various applications such as water sterilization, air purification, biological detection, data storage and medical treatment. For such devices, Al_xGa_{1-x}N is the most suitable material where the emission wavelength can be tuned down to 200 nm with increasing Al content (x). Moreover, the use of AlGa_xN/AIN quantum well (QW) structures is necessary to enhance devices' emission efficiency. For DUV emission ($\lambda < 290$ nm), an Al-rich Al_xGa_{1-x}N/AIN QW is required where notable improvements in the growth technology based on metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) have enhanced the internal quantum efficiency (IQE), thereby improving the external quantum efficiency (EQE). However, the IQE is still low brought by defects in the epilayer which act as non-radiative recombination centers.

Obtaining low dislocation density AlN epilayer is a big challenge aggravated by heteroepitaxial growth which induces lattice mismatch thus, degrading the structural quality and emission probability. To improve the quality of AlN epilayer and AlGa_xN/AIN QWs, a new growth method was developed called modified migration enhanced epitaxy (modified MEE), which is characterized by an overlap supply of TMA and NH₃ precursors in-between the perfectly alternating supply of both precursors. This method effectively controls the migration of Al-adatoms thus obtaining an atomically-smooth (RMS: 0.12 nm, 5 μ m x 5 μ m) and defect-free AlN as evidenced by very narrow FWHM linewidth of (0002) plane (32.8 arcsec). The growth of AlN and AlGa_xN/AIN QWs by this method is shown in Fig. 1. For QW, the emission wavelength was varied by changing the aluminum composition (x) from 0.69-0.94 and well-width from 0.7-16 nm. Fig. 2 shows an atomically-smooth surface obtained in QW (RMS: 0.17 nm), replicating that of AlN epilayer. Furthermore, photoluminescence (PL) measurements confirmed their high quality where the estimated IQE (at 200 kW/cm²) was above 5% and as high as \sim 57%, suggesting that modified MEE is effective in improving the quality of the epilayer. Moreover, as a consequence of high-quality QW, the polarization anisotropy has been clarified in c -plane AlGa_xN/AIN QW. As shown in Fig. 3, an intense surface emission ($E \perp c$) can be expected for QW with x as high as 0.82. This demonstrates that [0001]-oriented AlGa_xN/AIN QWs can be used as surface emitters ($\lambda > 225$ nm). Because of the great impact, these results were published in highly reputed physics journals such as Applied Physics Letters, Physical Review B, conducted seminars at Technical University-Berlin and Fraunhofer Braun Institute, and an invited talk at ICNS 8.

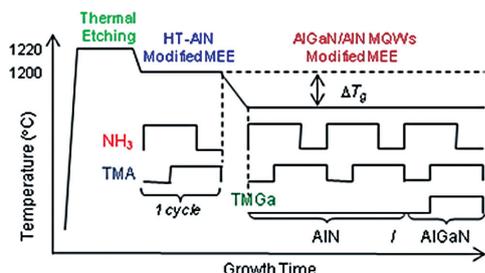


Fig. 1. Modified MEE for AlN and AlGa_xN/AIN QWs.

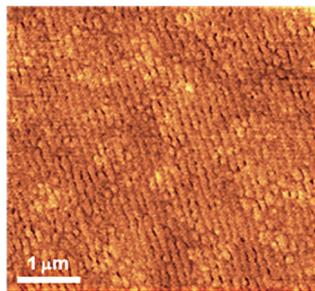


Fig. 2. AFM of Al_{0.82}Ga_{0.18}N/AIN QWs.

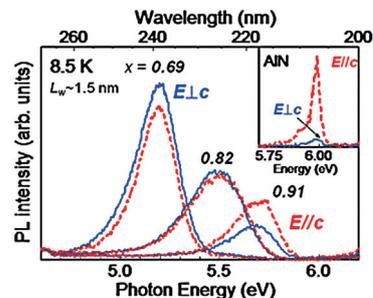


Fig. 3. PL polarization anisotropy in AlN (inset) and AlGa_xN/AIN QWs.

登 尾 正 人 (木本教授)

「Fundamental Study on SiC Meta-Insulator-Semiconductor Devices for High-Voltage Power Integrated Circuits」

(高耐圧パワー集積回路を目指した SiC 金属 - 絶縁膜 - 半導体素子の基礎研究)

平成 21 年 3 月 23 日授与

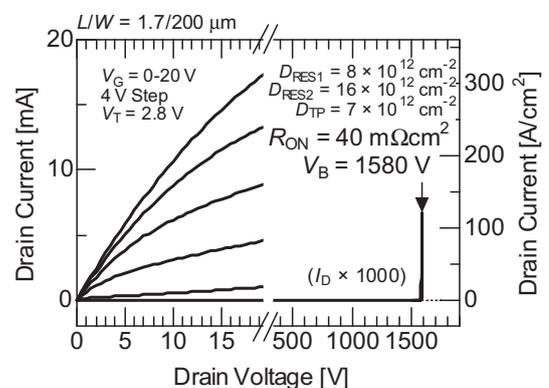
第二次世界大戦以後の急速な経済発展に伴い、我々を取り巻く地球環境は悪化している。我々が直面している喫緊の課題である温暖化の問題だが、主原因は温室効果ガス（主に CO₂）の排出である。CO₂ 排出量低減を実現するために、今後より重要性が高まるのがエネルギー利用の高効率化である。特に、エネルギーの電力化が進んでいることから、電力変換回路等に使用されるパワー半導体デバイスの高効率化が、CO₂ 排出量の低減に直結する。

現在、パワー半導体デバイスは主に Si を材料として作製されているが、既にその性能は材料物性から決まる理論限界（Si リミット）に近づきつつある。一方、ワイドギャップ半導体である SiC（炭化珪素）は、Si の 10 倍の絶縁破壊電界を有し、Si リミットを打破する高性能パワーデバイスを作製可能な材料として期待されている。パワーデバイス応用の一つの潮流として、パワーデバイスを単一素子として使うのではなく、その制御回路や保護回路等を 1 チップ上に集積化したパワー IC（集積回路）がある。SiC パワー IC を実現することができれば、Si パワー IC に比べて効率向上だけでなく、高速化、冷却システムの小型化なども期待できる。しかし、SiC パワー IC を実現するには、未解決の課題が多数残されている。

パワー IC の基本的な構成要素は CMOS 回路と、高耐圧横型 MISFET である。素子の微細化は MISFET 特性を向上する上で最も効果的な方法だが、微細化に伴い顕在化する短チャネル効果の研究は SiC MIS デバイスの分野では未だ行われていない。また、従来熱酸化で形成されていたゲート絶縁膜であるが、熱酸化膜 / SiC 界面には多数の準位（トラップ）が存在し、MISFET 特性の劣化（移動度の低下）を招いている。SiC パワー IC の最も重要な構成要素である高耐圧横型 MISFET であるが、十分な高耐圧化と低損失化が進められているとは言いがたい。上記背景を鑑み、SiC MISFET における短チャネル効果、堆積法により形成した絶縁膜 / SiC 界面と同絶縁膜を有する MISFET の特性、および、新構造を有する高耐圧横型 SiC MISFET に関して研究を行った。

SiC MISFET における短チャネル効果の発現条件は Si MISFET と同様の式で記述されることが分かった。また、SiC 特有の問題として、絶縁膜 / SiC 界面に存在する準位（に捕獲された電子）の影響で、Si の場合に比べ、より長チャネルで短チャネル効果が発現することを独自のチャージシェアモデルを用いて明らかにした。また、堆積条件、および堆積後の熱処理条件を最適化することで、絶縁膜 / SiC 界面準位密度を従来より 2 桁以上 ($10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ から $10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 以下へ) 低減し、MISFET 移動度を 3 倍以上 ($10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ から $30 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上へ) 増加させることに成功した。新構造を有する横型高耐圧 MISFET を作製するため、デバイスシミュレーションを用いて構造を最適化した。実際に作製した MISFET では耐圧 1580 V、オン抵抗 $40 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ という特性を実現した（右図）。この特性はこれまで作製された横型高耐圧 MISFET として最高の特性であり、Si リミットと比較しても 10 倍以上優れている。

このように、本論文では基礎から応用まで SiC MIS デバイスに関する幅広い研究を行った。将来の SiC パワー IC 実現へ向けて大きな一歩を踏み出すことができたと言える。



作製した 4H-SiC ダブル RESURF MISFET の特性

高橋重樹 (野田教授)

「2方向斜めエッチングによる3次元フォトニック結晶に関する研究」

平成21年3月23日授与

本論文は、2方向斜めエッチングによる3次元フォトニック結晶の新たな作製法とその応用について報告している。3次元フォトニック結晶は、全方向に光の禁制帯フォトニックバンドギャップ (PBG) を形成し、光の伝搬と輻射を自在に制御することが可能である。しかしながらその実現には3次元ナノ構造を高精度に形成する必要がある、作製工程が多くなってしまいう問題があった。本論文ではこれを解決するため、新たな微細加工技術を開発し、2回の斜め方向エッチングにより3次元フォトニック結晶を一括作製することに成功している。本研究で得られた成果は以下のようにまとめられる。

1. 理論解析により、新たな作製法の特徴を明らかにした上で、反応性イオンエッチング (RIE) 装置による斜めエッチング技術の開発に着手した。通常のRIE装置では斜めエッチングは不可能であるが、本論文ではイオンシース制御板によってイオンシース近傍の電界を制御することを提案し、高アスペクト比かつ高精度の斜めエッチングを実現した。この技術を用いて3次元フォトニック結晶の一括作製を試みた結果、その試料は世界でもトップクラスの光学特性を示し、2方向斜めエッチングによる作製法の有用性を明快に示すことに成功した。

2. 本論文で提案した斜めエッチング技術の理論解析を行い、実应用到に適したイオンシース制御板構造を検討した。まず、本技術を効果的に解析するため、自己無撞着法によるイオンシースシミュレーション手法を構築した。これにより、本技術の本質がイオンに対する偏向レンズの形成であることを示し、その特徴を定性・定量的に明らかにした。また、大面積処理が可能な制御板の設計を行い、本技術が工業的にも有用であることを示した。

3. 3次元フォトニック結晶の重要な応用の一つである発光制御について検討を行った。まず基礎となる自然放出の抑制とエネルギー再分配について検討し、上下非対称構造の導入によって抑制率と分配率を独立に制御できるという3次元フォトニック結晶ならではの特徴を明らかにした。また、非発光再結合と発光体積の減少という実用上の問題を回避するために、平板状の発光層が有効であることを理論的に示した。そして、系統的な研究展開に必須となるPBG帯域制御を実験的に試み、光通信波長帯を網羅して任意の帯域に完全PBGを形成することに成功した。

以上の成果は、3次元フォトニック結晶の作製と応用に新たな道を切り開くものである。特に、斜め方向の反応性イオンエッチングは、新たな微細加工技術として他の半導体デバイスへの応用も期待され、今後の工学に広く寄与するものと期待される。

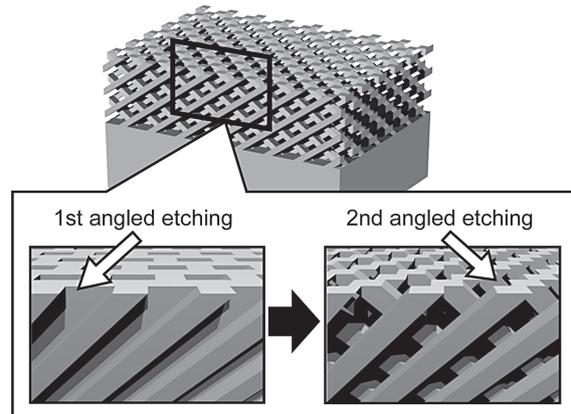


図1. 2方向斜めエッチングによる3次元フォトニック結晶作製法

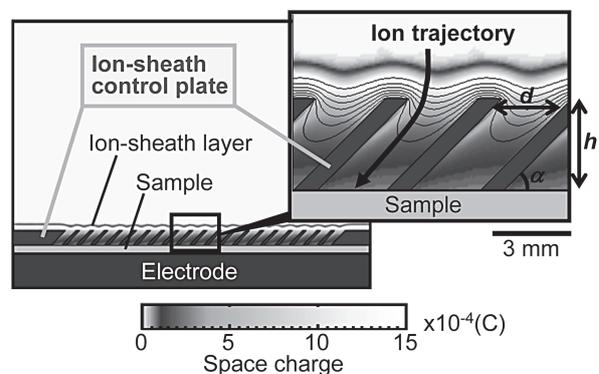


図2. 斜めエッチング時のイオンシースシミュレーション結果

黒坂 剛 孝 (野田教授)

「フォトニック結晶レーザにおけるビーム出射方向制御に関する研究」

平成 21 年 3 月 23 日授与

本論文は、オンチップでビーム出射方向制御を行うというレーザ分野における長年の課題に対して、これを解決する独自の構造の提案から作製手法確立、原理検証までをまとめたものである。フォトニック結晶レーザは、大面積での単一モードコヒーレント動作が可能であり、既存の半導体レーザでは実現が困難な 1° 未満の小さいビーム拡がり角を実現することが出来る。本論文では、この小さいビーム拡がり角を維持したままビーム出射方向制御機能を持たせるための検討を行い、動的にビーム出射方向を制御するデバイスの実現に成功した。本研究で得られた成果は、以下のようにまとめられる。

1. フォトニック結晶レーザの格子間隔と波長が一致する定在波状態においては、ビーム出射方向は面垂直方向となるが、両者が一致しない定在波状態を作ることが出来れば、斜め方向への出射ビームが得られる。このとき、ビーム出射方向は格子間隔と波長のずれ量に対応して変化するので、格子間隔と一致しない任意の波長での定在波状態を作ることによって、ビーム出射方向を制御可能であることを見出した。これを実現するための具体的構造として正方格子と長方格子という格子定数の異なる2つのフォトニック結晶を組み合わせた異周期複合フォトニック結晶(図1参照)を提案し、両者の格子定数差に応じた任意の波長での定在波状態を確かに形成可能であることを理論的に示した。
2. 続いて、異周期複合フォトニック結晶レーザを作製するため、活性層の上下に位置精度よくフォトニック結晶を作製するための手法を確立し、デバイスの作製を行った(図2参照)。次に、そのフォトニックバンド構造上に理論的に予測した複合フォトニック結晶特有の構造が存在することを見出し、ビームパターンの評価によりビーム出射方向が理論予測に従って変化することを確認した。また、近視野像が2次元的に広がっていることから大面積コヒーレント発振が維持されていることを示した。さらに、理論的に予測した通り波長がほとんど変化しない発振スペクトルが得られるなど実験的な評価結果が理論的予測と良く対応していることを示し、ビーム出射方向制御原理を実証することに成功した。
3. 格子定数差が連続的に変化する異周期複合フォトニック結晶を用いた多電極デバイスを作製し、単一デバイスからのビーム出射方向制御を実験的に示し(図3参照)、動的にビーム出射方向を制御するデバイスの実現に成功した。

以上、本論文は、フォトニック結晶レーザのビーム出射方向制御に関して極めて有効な手法を確立したものであり、レーザの応用・融合分野の発展に大きく寄与するものと期待される。

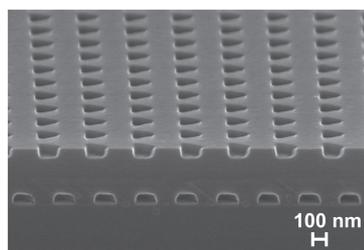


図1 異周期複合フォトニック結晶のSEM像

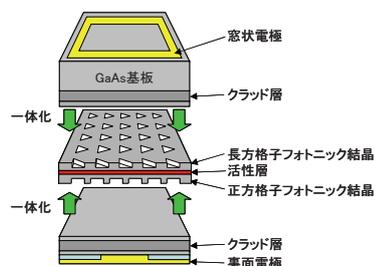


図2 異周期複合フォトニック結晶レーザのデバイス構造

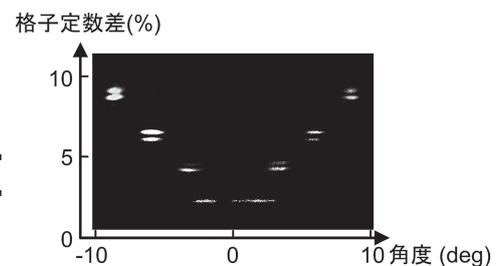


図3 ビームパターン実測結果

Stumpf Wolfgang Constantin (野田教授)

「Studies on Fundamental Technologies for Fabrication and Evaluation of Combined Photonic Crystal Nanocavity-Quantum Dot Devices」

(フォトリック結晶ナノ共振器と量子ドットの融合系の作製および評価法の確立)

平成 21 年 3 月 23 日授与

State of the art information technology (IT) is physically limited in speed and bandwidth by electronics. Although, optical fibers and photonics are increasingly used in IT – integrated optical routing, storage, and computing demand for nanostructured materials and device development. Two-dimensional (2D) photonic crystals (PCs) have a periodicity in their refractive index which is on the order of the optical wavelength and thus gives rise to a 2D photonic bandgap (PBG) – similar to the electronic one in semiconductors – that can guide and confine light. The 2D PBG can also control spontaneous emission (SE) from embedded active materials like quantum dots (QDs). QDs are “artificial atoms” of tens of nanometer size, which can confine carriers i.e. excitons point-like in bulk material and act as ultrahigh efficient light emitters. When placed in a PC NC i.e. a resonator of a cubic optical wavelength in size, SE from QD can be modified by cavity quantum electrodynamic (CQED) effects that scale with the resonators’ quality factor Q over mode volume V_m . The QD-NC interaction mechanisms of SE phenomena in solid state, as preferred for optical integrated circuits, are not entirely clarified. Thus, this work focuses on the step-by-step investigation of the emitter-cavity interaction, which has to be controlled in future IT devices utilizing CQED effects. First, InAs QDs of high optical quality, i.e. of narrow inhomogeneous broadening and bright photoluminescence (PL), were embedded in a GaAs PC slab by molecular beam epitaxy. Second, after optimization of the PC fabrication process, the 2D PBG effect, which yields out of plane emission enhancement by SE energy redistribution, could be demonstrated. In the third step, the introduction of a NC was shown to create artificial emission channels that demonstrated improved device efficiency. Next, in order to investigate the interaction of QD emitters and a PC NC, only QDs inside V_m had to be excited, but QDs of high optical quality have high densities. By development of a polarization resolved resonant excitation technique, the ratio of NC mode over unwanted background PL from the surrounding PC could be improved up to 20dB. By scanning higher order NC modes in resonant excitation, individual QD were selectively excited as seen from exciton peaks and could be tuned into resonance with the NC’s fundamental mode, resulting in 65x SE enhancement of the Purcell effect. Comparing this data with spectral and spatial overlap of the modal electric field distributions, potential QD position within the nanocavity could be narrowed down. At the final stage, the reflection measurement technique (RMT), that avoids intraband carrier relaxation processes, was developed and extensively tested. Resonant NC wavelengths in PL were found to agree well with RMT. Also Q factor statistics reproduced theory well. Coupled mode theory could explain the trend of reflected intensities in the experimental spectra due to a slab coupling effect. RMT is considered potentially useful to gain fundamental insight to the interaction mechanisms of single, deterministically aligned QDs and yield future IT applications.

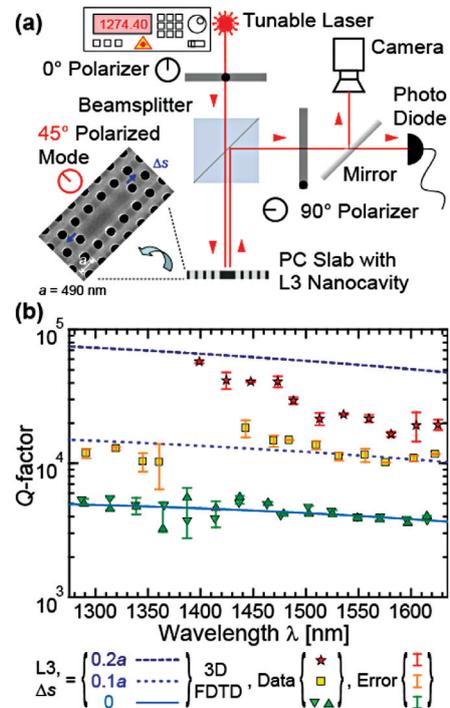


Fig.1 (a) Experimental setup (b) Q factors: theory & RMT.

堀田 昌宏 (木本教授)

「4H-SiC 無極性面基板上への同一ポリタイプを有する 4H-AIN 成長とデバイス応用」
平成 21 年 3 月 23 日授与

波長 300 nm 未満の深紫外領域の光は、化学分析や殺菌などの用途に利用されており、半導体を用いた発光デバイスにより深紫外発光を実現することで、装置の小型化、低消費電力化が可能である。これを実現する材料として、III 族窒化物半導体である AIN が着目されている。AIN は、禁制帯幅 6.2 eV (波長 200 nm 相当) を有する直接遷移型半導体であり、GaN (禁制帯幅 3.4 eV) と任意の割合で混晶を作製することが可能である。実用的な発光効率を有するデバイス実現のためには、結晶の高品質化と量子閉じ込め構造の採用が重要であるが、AIN には高密度の転位が含まれており、また、一般的に用いられる極性面上に量子閉じ込め構造を作製すると、内部電界によって発光効率が低下するという問題がある。この内部電界を回避する方法として、極性面に対して 90° 傾いた無極性面の AIN 成長がある。過去の研究において、無極性面 4H-SiC を基板として、分子線エピタキシ成長を行うことで、同じ無極性面を有する X 線回折半値幅の小さい AIN が得られ、また、その AIN の結晶構造が、安定なウルツ鉱(2H)構造ではなく、基板と同一の 4H 構造であること (同一ポリタイプ成長) が報告された。しかしながら、成長した AIN には高密度の拡張欠陥が存在しており、欠陥の低減が課題となっていた。また、4H-AIN は過去に報告例がなく、欠陥構造や基礎物性に関する知見は皆無である。そこで、本研究では、無極性面 4H-SiC 基板上に同一ポリタイプ成長した 4H-AIN をデバイスへと展開していくための基礎を築くことを目的として研究を行い、以下の成果を得た。

- (1) HCl ガスエッチングによる基板表面の原子レベル平坦化、および AIN 成長条件の最適化を行い、同一ポリタイプ成長を促進させることで、拡張欠陥の飛躍的低減に成功した。(図 1)
- (2) 得られた高品質 4H-AIN に対して、X 線回折や TEM 観察、ラマン分光によって、無極性面 4H-AIN の欠陥構造や通常の 2H-AIN とは異なる 4H-AIN の物性を観測することに成功した。
- (3) 4H-AIN の発光デバイス応用の基礎検討として、4H-AlGaIn 成長および AIN/AlGaIn 多重量子井戸 (MQW) 構造の作製を行った。MQW の光学特性評価において、内部電界の影響を受けていないバンド端に相当する強い発光を得ることに成功した。(図 2)
- (4) 無極性面 4H-AIN は、電子デバイスへの応用も可能であると考え、金属/絶縁体/半導体 (MIS) デバイスの作製を試みた。無極性面で実現可能な低欠陥密度 4H-AIN/4H-SiC 界面をチャネルとした MIS 電界効果トランジスタ (FET) を作製し、初めて FET 動作を示すことに成功した。

以上のように、4H-AIN の高品質化を実現し、基礎物性、欠陥構造に関する知見を得るとともに、デバイスの基本構造を実現したことで、4H-AIN の光・電子デバイス応用の可能性を示した。

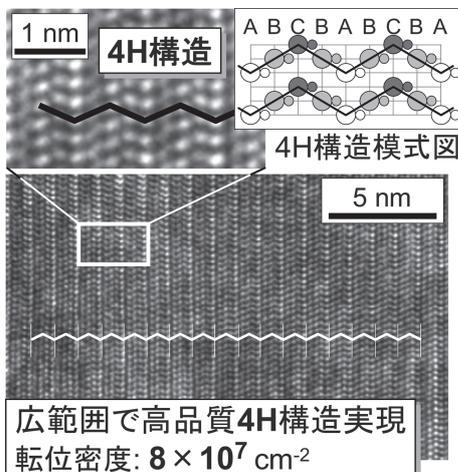


図 1: AIN の高分解能 TEM 像

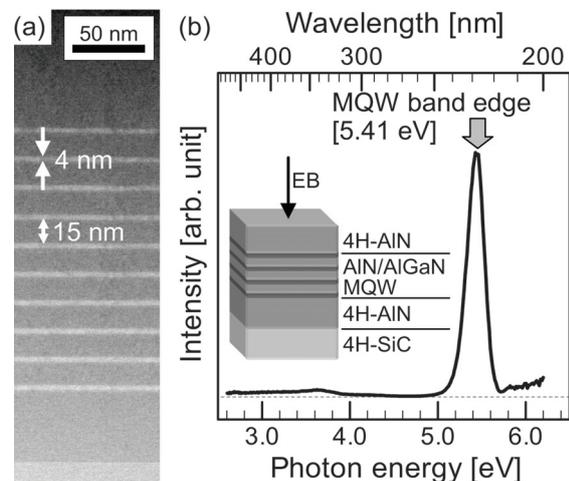


図 2: (a) MQW TEM 像, (b) CL スペクトル

増 崎 隆 彦 (小野寺教授)
 「JPEG2000 処理システムの構成法に関する研究」
 平成 21 年 3 月 23 日授与

近年のデジタル画像に対する高圧縮率，高階調，高いスケーラビリティ性能などの要求を背景に，画像符号化方式 JPEG2000 が 2001 年 1 月に国際標準化された．本論文では，JPEG2000 に着目し，計算量やメモリ使用量が大きいといった問題を解決し効率的なシステムを構成する手法について述べた．

JPEG2000 では，計算の複雑さ及びメモリ使用量を抑えるために，タイルと呼ばれる矩形領域に分割して処理を行うことが可能であるが，その場合，低ビットレート時にタイル境界でのノイズが発生する．そのため，本論文では，タイル分割無しのシングルタイルでの JPEG2000 コーデックのシステム構成（図 1）を提案した．一定の幅で画像を短冊状に分割し，境界についてはオーバーラップ処理を行い離散ウェーブレット変換（DWT）を行うことで，メモリ使用量と入出力データ量のバランスの良いシステム構成を提案した．提案システム構成を実際にチップに実装した例（図 2）を示し，ワンチップで 8,192 × 8,192 の画像をシングルタイルにて符号化／復号化できることを示した．

また，本論文では，組込み向けに計算量及びメモリ使用量が少ない JPEG2000 向けレート制御（符号量制御）手法を提案した．従来の最適化手法では，最初に全パス（データ片）を符号化し，その後，画質への寄与度の低いパスを切り捨てる．この手法では，精密なレート制御が可能である反面，計算量及びメモリ使用量に大きな無駄がある．そこで，パスの切り捨て位置をあらかじめ予測して符号化の処理を省略することにより，処理量の削減を図る手法を提案した．一例として，前もって典型的な画像の特質を分析し，画質（PSNR）とパス数，パス数とバイト数の関係（図 3，4）から画質への寄与度の高いパスを予測するという方法で実験した．従来手法と比較して，若干の画質の低下があるが，ビットレートが 0.5bpp の場合，エントロピー符号化の計算量は従来の 1/3 程度に削減でき，ストリームを保持するためのメモリ量は従来の 1/7 以下に削減することができた．

画像データの受信に伴い，徐々に高階調な画像に変換する処理を SN 比プログレッシブ復号（図 5）と呼ぶ．本論文では，JPEG2000 の SN 比プログレッシブ復号を高速化する手法を提案した．従来は，データを受信する度に最初からエントロピー復号を行う必要があったが，提案手法では，中間データを効率的に保持することにより繰り返し処理を避けた．その結果，画像サイズが 1,280 × 1,280 で非可逆圧縮の場合，メモリの使用量は従来に比べて 26.3% 程度増加してしまうが，エントロピー復号の計算量は最大で 50% の削減ができることを示した．

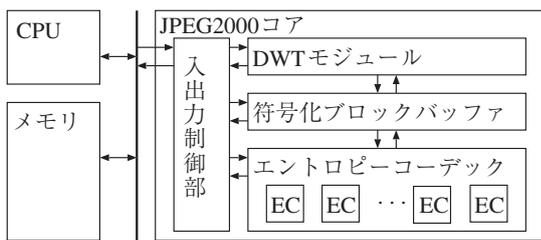


図 1：JPEG2000 コーデックの構成

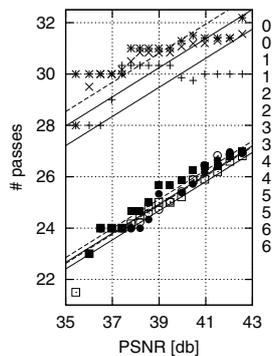


図 3：画質 - パス数

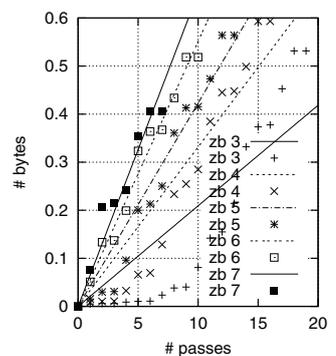


図 4：パス数 - バイト数



図 2：実装 LSI のパッケージ



図 5：SN 比プログレッシブ復号

李 大成 (橘教授)

「A Study on the Application of Microplasmas to Novel Optical Devices」

(マイクロプラズマの新規光デバイスへの応用に関する研究)

平成 21 年 5 月 25 日授与

この博士論文は、マイクロメートルからミリメートルのサイズを持つ、従来用いられていたプラズマよりも小さい“マイクロプラズマ”のデバイス応用に関するものです。すなわち、微細加工技術の進展により、プラズマ生成用電極を微細に設計・製作できるようになり、プラズマのサイズを小さくすることで各種デバイスの構成要素としてプラズマを用いる応用を想定することができるようになってきました。この博士論文では、その内でも発光デバイスとしての応用とミリ波帯からテラヘルツ波帯の電磁波制御デバイスとしての応用を目指した実験研究を行いました。

発光デバイスとしては、これまで電子デバイスで汎用されてきたシリコン基板を基材とし、その表面に放電セルを電子ビーム描画法により作製しました。ここで、構造としては2つの放電電極と絶縁層を基板の厚み方向に積層することで全くフラットな構造を実現しています。そして、特に、放電電極から絶縁された浮遊電極をこの構造の中に設置することで発光特性を大きく制御できることを明らかにしました。また、電磁波制御デバイスとしては、疑似表面プラズモン（金属表面に伝搬する表面プラズモンを電磁波帯で疑似的に実現したもの）の支持体である整列穴アレイを持つ金属板をプラズマ生成用電極として併用し、穴アレイ内に疑似表面プラズモンの伝搬周波数スペクトルの制御を実現しました。

図1に、高速ゲート CCD カメラによる観測された、発光パターンのネオンガス動作圧力依存性を示します。外側の四角の外側領域が両極性パルス電圧が印加される放電電極、内側領域が下部の接地電極に絶縁層が被覆された領域です。この絶縁層領域内に内側の四角領域で示す浮遊電極を設置しています。浮遊電極の果たす1つ目の役割として、接地電極がカソード電極となる極性の時に、浮遊電極上の発光強度が数倍に増強されることがわかりました。これは、前の極性パルスでその領域に蓄積した荷電粒子が、極性切り替え時に再分布して次の逆極性パルス時に放電中電界を強くすると推定され、2次元流体シミュレーションでも同様の結果を確認しました。さらに、浮遊電極の2つ目の役割として、低圧力条件下では、カソード電極極性時のみならず、アノード電極極性時も浮遊電極上にプラズマ発光をもたらしかつ増強する機能のあることがわかりました。その様子を図1に示します。この極めて特異な現象は、プラズマ空間が電極が囲われていることによりプラズマ生成の重要パラメータである換算電界（電界／ガス圧力）が強められ、かつ浮遊電極の存在が換算電界を増加させていると解釈できます。このように、電極構造の微細設計を行うことでプラズマ発光強度を大きく制御できることがわかり、超高強度点光源への応用などが期待されます。

本論文では、先にも述べましたように、電磁波制御に対するプラズマの誘電的性質が果たす可能性も実験・理論の両面で明らかにしており、広周波数範囲におけるマイクロプラズマと光・電磁波の関係に新たな知見をもたらす研究と総括できます。

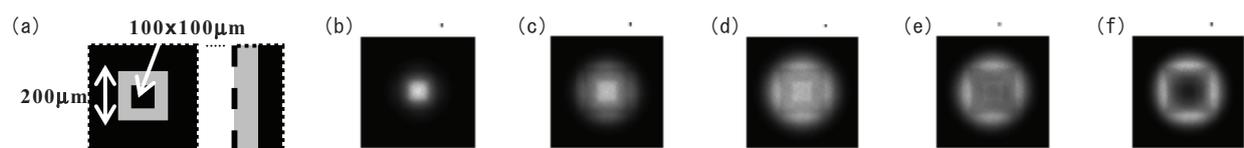


図1. シリコン基板上に形成された浮遊電極付きプラズマ発光セルの電極構造 (a) と、ネオンガス圧 100 Torr (b)、150 Torr (c)、200 Torr (d)、250 Torr (e)、および 350 Torr (f) での発光分布。

全 炳 俊 (増田准教授)

「Generation of High Quality Electron Beam Using a Thermionic RF Gun for Mid-Infrared Free Electron Lasers」

(熱陰極高周波電子銃による中赤外自由電子レーザ用高品質電子ビーム生成)

平成 21 年 5 月 25 日授与

熱陰極高周波電子銃 (RF Gun) は図 1 の様に高周波共振空洞の一端に熱陰極を配置した構造を持ち、熱陰極から供給される電子を高周波電場により加速する電子銃である。この電子銃は従来の静電型電子銃と比べ、高い電界強度により電子を加速する事が可能であり、小さな構造で数 MeV の高エネルギー電子ビームを生成可能であること、空間電荷効果による電子ビーム特性の悪化が低減されるなどの利点があり、エネルギー科学に有用な中赤外自由電子レーザ (Free Electron Laser; FEL) を駆動するための電子源として研究されてきた。しかし、熱陰極 RF Gun では、熱陰極から引き出された電子の一部が逆加速され、陰極に衝突し、陰極が電子により加熱され、陰極温度が上昇、電子ビームエネルギーが低下するという Back-bombardment と呼ばれる現象に酷く悩まされていた。自由電子レーザ発振には電子ビームパルス持続時間が長く、電子ビームエネルギーが一定な電子ビームが要求されており、Back-bombardment 現象の解決が熱陰極 RF gun を用いた自由電子レーザ発振には必要であった。

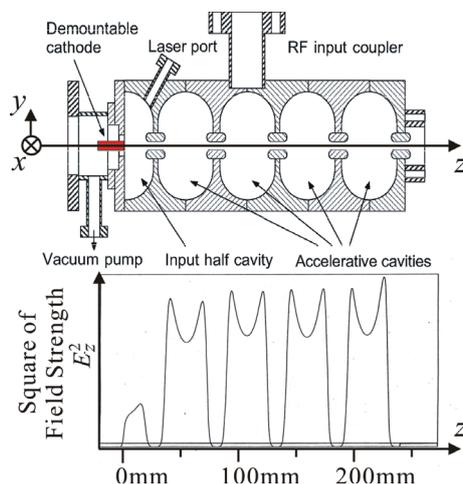


図 1：熱陰極高周波電子銃の概略図

本研究では、以下の 2 つの手法を導入し、Back-bombardment 現象によって生じる電子ビームエネルギー低下を補償することにより、熱陰極 RF Gun を用いてレーザ発振に要求されるパルス持続時間が長く、エネルギーの均一な電子ビームを生成することに成功した。

- 1) 電子ビーム電流増加に伴い熱陰極 RF gun に供給する高周波電力を増加させる。
- 2) 共振空洞の共振周波数と外部から供給する高周波電力の周波数とに一定の周波数差を与え、高周波負荷特性を利用して電子ビーム電流変化に対してビームエネルギーが変化しない条件を与える。

また、これら二つの手法を同時に適用してやることにより、最終的に図 2 に示すようにエネルギー一定な電子ビームパルス長を従来 $1 \mu s$ 以下であったものを $5 \mu s$ に延ばすことに成功した。また、電子ビームの横方向特性、ピーク電流などを実験的に評価した。

加えて、上記のようにエネルギー補償法を用いて京都大学エネルギー理工学研究所にて開発が進められている熱陰極中赤外自由電子レーザ装置において自由電子レーザ発振実験を行い、同装置初の自由電子レーザ増幅を観測し、図 3 の様にレーザ飽和を達成する事に成功した。

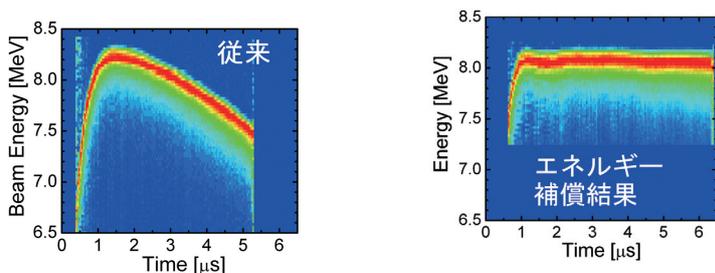


図 2：エネルギー補償による電子ビーム品質改善

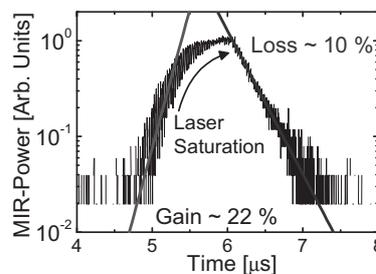


図 3：レーザ飽和達成時のレーザ出力時間発展

川 添 雄 彦 (守倉教授)

「Highly Efficient Data Transmission Schemes for Integrated-Media Systems」

(統合メディアシステムにおける高能率データ伝送方式に関する研究)

平成 21 年 9 月 24 日授与

映像配信サービスなどのブロードバンドサービスの普及に伴い、通信システムで伝送するトラフィックは年々増大している。本研究では、統合メディアシステム(図1)におけるデータ伝送効率を改善するために、ネットワーク層、メディアアクセス層、物理層など各層の特徴を活かして改善を図り、システムの総合性能の向上を可能とする新方式の提案及び性能解析手法を検討した。

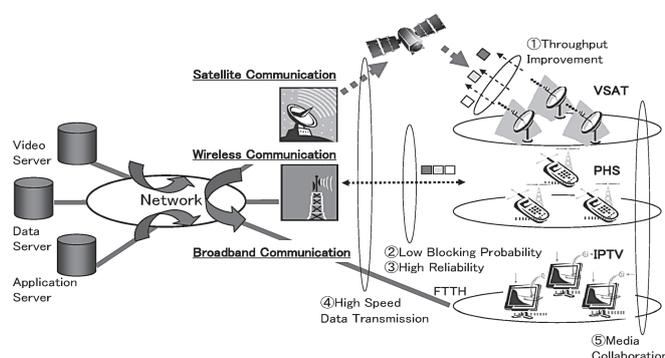


図1 統合メディアシステム

1. 可変長パケット信号の無手順高能率伝送を可能とする多重スロット付きアロハ方式

衛星通信用に可変長パケット信号伝送時のスループットの向上を可能とする多重スロット付きアロハ方式を考案した。本方式は信号長に応じて送信タイミングを制御する。従来のスロット付きアロハ方式と比較し信号長の分布によらずスループットを大きく改善でき、信号長が変化した場合においても特性が安定している。最大スループットは従来方式と比較して約20%向上可能である。

2. ワイヤレスパーソナル通信向け TDMA-TDD-AF 方式

ワイヤレスパーソナル通信システムに適用する TDMA-TDD-AF 方式を考案した。本方式では TDMA フレームのフルスロットを送受信で使用するために、タイムスロット毎にアンテナ共用器の送信及び受信で利用可能な周波数帯域を切り替える。提案方式により TDMA フレームで割り当て可能なタイムスロット数は倍以上となりユーザ当たりの最大伝送速度が向上し呼損率を大幅に改善する。

3. ワイヤレスマルチメディア通信向け高信頼バースト伝送方式

ワイヤレス通信システムにおいて高信頼なバースト伝送を可能とする TDMA バーストアサイン方式を考案した。提案方式ではパケットのフレームエラー率を改善するためにパケット長に応じて割り当てる TDMA バースト数を決定しバーストダイバーシティー技術を適用する。制御チャンネルに提案方式を適用した際の効果を解析した結果、フレームエラー率は約25%と大幅に改善されることを示した。

4. 超高速・汎用ビタビ復号方式

無線通信回線の誤り訂正方式にビタビ復号を適用する際に、高符号化率の畳み込み符号に対して高速復号を可能とする方式及び復号器の構成法を考案した。考案した簡易復号器により、ゲート回路の動作率は符号化率 7/8、復号後誤り率 10^4 で従来型の 40% に低減し、ビタビ復号器の低消費電力化が可能となった。

5. 通信放送融合サービスを実現するメディア連携方式

アプリケーション層における伝送効率の向上が可能な方式として通信と放送の融合及び固定と移動の連携を実現するメディア連携方式を考案した。提案方式は異なる伝送メディア間でのデータ伝送を実現するためにメディア毎の特徴を示すメタデータ技術を適用する。統合メディアシステムにおける提案方式の適用例として、IPTV システムを基に具体化を行った。

兼 村 厚 範 (石井教授)

「Inversive and Synthetical Bayesian Methods for Image Estimation」

(画像推定のための逆転・合成ベイズ的方法)

平成 21 年 9 月 24 日授与

撮像機器から得られた画像に直接表されていない情報を抽出する画像推定の技術は、過去半世紀にわたりたゆまず研究されてきた。初期に提案された手法はヒューリスティック的に設計されたものが多いが、近年では統計推測法に基づく洗練された方法も多い。ベイズ統計は、古典統計学が大きな役割を果たしてきた統計データ解析のみならず、人工知能、ロボティクス、コンピュータビジョンなどの分野にみられる各種問題の解決法として近年注目を集めている。

本論文は具体的な画像推定問題として解像度向上問題を取り扱い、ベイズ統計に基づいた方法を提案した。論文は第 1 部と第 2 部から構成される。第 1 部では複数枚の劣化画像を用いて高解像度画像を推定するマルチフレーム超解像問題 (図 1) に取り組んだ。高解像度画像の復元のために、劣化画像が観測される物理過程を順過程 (図 2) としてモデリングし、高解像度画像に対する事前知識を利用して、逆問題を解く逆転ベイズ的方法を記述した。とくに、画像中にはオブジェクトの重なりなどにより画素値の急峻な変化 (エッジ) が存在することを事前知識としたエッジ保存超解像法と、観測過程に起こりうる遮蔽を空間相関のあるノイズ過程としてモデリングすることで効果的に遮蔽物を除去できる超解像法を提案した。

第 2 部では画像拡大の 1 手法を提案した。提案法は、画像拡大を低解像度画像から高解像度画像へのフィルタリング問題として定式化し、フィルタの台をスパース性を導きながら同定するスパースベイズ法を利用した合成ベイズ的手法である。

将来は、逆転的視点と合成的視点の統合によるフレキシブルな画像推定法などへの発展が期待される。

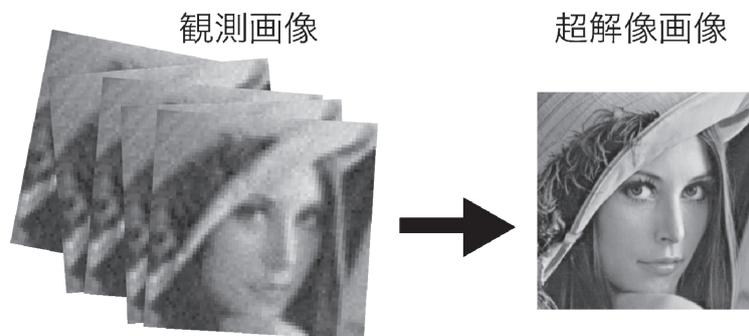


図 1 超解像のイメージ図。劣化した観測からオリジナルの解像度を復元する。



図 2 順過程。原画像に幾何的な変換 (位置ずれ)、ぼけ、画素減少 (縮小)、ノイズ付加が実行されて観測画像になる。