

## 「VLSI 技術の進展と動作状態解析技術の重要性」

NEC システムデバイス研究所 望月康則

最先端の LSI ではサブ 100nm 領域に微細化が進み、これに伴って回路規模の増大とソフト領域まで取り込んだ高度なシステム化が進展している。一方で、従来のいわゆるスケーリング則によるコスト・速度・低電力性の三位一体での進化は物理限界に直面しつつあり、デバイス面ではスタンバイ電力の増大と特性バラツキに如何に対処するかが喫緊の課題となっている。また、電源の低電圧化トレンドと回路動作の高速化が複合したシグナルインテグリティ問題に如何に対処するかも近年急速に重要性を増している。

このような環境の下、近年の VLSI では動作解析機能を製品チップに組み込んでしまう技術が活発に提案されている。これらは、膨大な数のトランジスタを搭載できる今日の VLSI において、冗長な回路機能を追加してでもコストや消費エネルギーをトータルで削減することを優先する発想の技術である。具体的には温度やリーク電力など LSI の動作状態に応じてアダプティブに周波数と動作速度を最適化する DVFS 技術などが挙げられる。また、チップ開発時には予測不可能なソフトウェア搭載後の信号波形を実動作時に観測・解析するオンチップオシロスコープ技術なども、VLSI というシステムデバイスならではの特徴を反映している。

一方で、極限にまで微細化・集積化された LSI においてデバイス構造や製造プロセスが材料物性にどのように影響しているかを把握することも重要である。このためにはデバイス動作を支配する物性情報を如何にうまく引き出すかという観点で局所領域（「その場」）の解析技術が重要であり、DRAM 中の点欠陥や局所歪みにかんする最近の研究事例を御紹介する。また、近年では FeRAM や MRAM など新材料を用いた LSI の研究も盛んであるが、これらも集積化に向けた現象理解の上で局所解析技術の果す役割は大きい。

今日のシステム LSI はソフト・アーキテクチャ・回路・デバイス・材料といった様々な技術が垂直統合されているが、その実現（回路動作、信頼性確保、高歩留まり）を支える動作解析においても、ソフトウェアからナノサイエンスまで多様なレイヤーの技術が協調連携し合うことが今後益々求められている。

## 「動作中 FET のキャリア分布計測」

京都大学大学院工学研究科 山田啓文  
京都大学国際融合創造センター 小林圭

我々は原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy: AFM) をベースとして、探針と半導体試料の表面の間に作用する静電気力を高感度で検出することによって、静電容量の二次元マッピングを行うことが可能な、走査型容量原子間力顕微鏡法 (Scanning Capacitance Force Microscopy: SCFM) を開発した。SCFM では、探針と試料との間に交流電圧を印加し、その交流電圧の周波数の 3 倍の周波数の静電気力成分をカンチレバーの振幅、位相、振幅位相のいずれかを画像化することで、半導体試料におけるキャリア密度分布を可視化することができる。

AFM を用いて試料の静電容量のマッピングを行う手法としては、静電容量センサーをコンタクトモード AFM のカンチレバー探針近傍に取り付ける走査型容量顕微鏡法 (Scanning Capacitance Microscopy: SCM) として広く普及してきたが、これに対して、我々が今回開発した SCFM の手法は、セットアップが簡便であり、ダイナミックモード AFM における利用が可能であり、AFM における非常に高い力検出感度を利用するために高感度容量検出が可能であるといった特徴を有している。

劈開して断面を研磨した MOS トランジスタ断面試料に集束イオンビームによってソース、ドレイン、ゲートの各電極に配線を施し、デバイスを動作させた時のキャリア密度分布の変化を可視化することに成功した。

## 「電子線ホログラフィーによるデバイスの電界分布計測」

財団法人 ファインセラミックスセンター 平山 司

多くの半導体デバイスでは、ドーパント濃度の分布によって固体内に形成される電位分布と外部から与えられる電位の変化を機能発現の源泉としている。よって、固体内電位分布を解析することは半導体デバイスの研究開発にとって重要な評価技術であると考えられる。我々は、電子線ホログラフィーによる電界効果トランジスタ (MOSFET) 断面の電位分布計測を試みた。シリコンウエハに含まれるドーパント濃度はきわめて微量であるため、本来シリコン結晶としての平均内部電位は p 型でも n 型でもほとんど同レベルにある。ところが、p-n 接合が形成され、試料が電子顕微鏡本体に接地されると、それぞれのフェルミ準位は強制的に同じ電位に接続され、その結果内部電位に差が生じる。我々は集束イオンビーム (FIB) を用いて厚さの極めて均一な MOSFET 断面 TEM 試料を作製し、2次元電位分布の観察を行った。この種の実験はすでに Rau らが実現しているが、我々は  $10^{15}/\text{cm}^3$  程度の低いドーパント濃度のシリコンウエハに形成した MOSFET の解析に成功した。非常に低い濃度のドーパント分布を電位分布として2次元的に観察できるところが電子線ホログラフィーの強みである。このような解析を導入すると、新デバイスの開発において試作量を大幅に削減できる可能性がある。また、品質管理にも役立つと考えられる。

## 「量子細線・量子ドットの局所発光解析」

東京工業大学 理工学研究科 山本直紀

ナノメートルサイズの構造に電子が閉じ込められると、量子効果により離散的なエネルギー準位が作られ、バルクでは見られない新たな物理的性質が現れることが知られている。ナノ構造が密集していると巨視的な測定法では新規な物性は平均化され隠されてしまう。最近、局所からの発光を検出するさまざまな手法が開発され、高密度に分布したサイズの異なる量子構造を個別に調べることができるようになってきた。これらの手法は、近接場光学顕微鏡に代表される試料表面近傍の近接場の光を利用するタイプと、試料から遠方に散乱される光（遠隔場）を利用するタイプとに分かれる。後者の手法のひとつとしてここでは透過型電子顕微鏡（TEM）と組み合わせた光検出法による研究を紹介する。この手法は電子線を物質に照射してルミネッセンスを調べる方法として発展してきたことから、カソードルミネッセンス（CL）法（TEM-CL法と呼ぶ）として知られている。

ここではTEM-CL法の応用として、半導体量子構造（量子細線および量子ドット）の研究例を示す。量子ドットではキャリアの3次元閉じ込めによりエネルギー準位は離散化する。量子ドットが密に分布し低いポテンシャル壁で隔てられている場合には、キャリアまたはエキシトンが熱的励起によりドット間を移動し、そのため発光スペクトルやその温度変化に異常な振る舞いを生じる。InGaN量子井戸における量子ドット状の構造やGaAs上にS-K成長により形成されたInAs量子ドットからの発光の性質について、キャリアの生成から拡散過程を経て、エキシトンとしてドット内で発光性再結合するまでのダイナミクスを表す速度方程式を用いて説明する。つぎに量子細線として、基板上に直立したナノワイヤー（GaAsナノワイヤーとInPナノワイヤー）の発光について紹介する。ワイヤーでは軸方向に強く偏光した発光が予想される。InPナノワイヤーからの発光は偏光度50%で偏光していたが、GaAsナノワイヤーからの発光には顕著な偏光は見られなかった。個々のワイヤーについて発光を測定した結果に基づいて、発光の性質を明らかにする。

TEM-CL法の別の応用として、金属ナノ構造の表面に閉じ込められた局在表面プラズモン（LSP）や、周期構造を持つ金属表面の表面プラズモンポラリトン（SPP）の研究について紹介する。LSPやSPPは表面構造を介してフォトンと結合して光を放出するのでTEM-CL法が適用できる。金属の単一微粒子のLSPには多重極モードが存在するが、それらのモードの表面プラズモンを個別に可視化した観察結果を示す。微粒子を2次元配列させた表面のSPPは定在波を作り離散的なエネルギー状態を形成する。発光スペクトルには定在波モードのエネルギーに相当する波長にピークが現れ、その波長の発光を使った2次元走査像（フォトンマップ）には、定在波のパターンが現れる。表面に局在し増幅された電場はセンサーや導波路に利用されプラズモニクスと呼ばれる分野として現在急速に発展している。

## 「Si 単電子デバイスとその場計測の重要性」

北海道大学 大学院 情報科学研究科 高橋 庸夫

デバイスサイズがナノメートルのオーダーに縮小され、集積度が著しく向上し、これに伴い消費電力の増大と回路の複雑性による設計にかかる負担増が問題になりつつある。ナノメートル時代の新デバイスには低消費電力性と高機能性の両面が求められる。単電子デバイスは、電子1個をも操ることが可能な、究極の省電力デバイスとして、将来の高集積の時代への適応力を有すると共に、従来のMOSトランジスタとは異なった新たな機能を発現するデバイスでもある。容量的な接続を全て等価に入力とすることが可能であるため、容易に多入力厚生とすることができる点や、電子を1個の単位で制御でき、究極の低消費電力を実現すると共に、多進数の取り扱いも可能となる。これらの機能を活かすことで、より少ないデバイスで、より高い機能を実現することができる。最近の加工技術の進歩もあって、室温で動作する単電子トランジスタや単電子転送デバイスが実現されており、実用の可能性も高まっている。一方、単電子デバイスは、そのサイズがナノメートルと小さいために、サイズの制御とその評価が難しい。理想的な単電子トランジスタの特性が得られている実際に作成されたデバイスでも、そのデバイス構造の詳細を明らかにするのは至難の技である。このデバイスの利用に向けて、構造と電気的特性の関連を明らかにすることが重要となる。ここでは、単電子デバイスの原理と応用を概説すると共に、その構造評価について述べる。

## 「ナノサイエンスから生まれた「原子スイッチ」」

物材機構 長谷川剛

「原子スイッチ」は、固体電気化学反応を利用してナノスケールのギャップにおける金属原子架橋の形成と消滅を制御することで、オンオフ動作する。一方の電極に電子・イオン混合伝導体を用いていることが特徴である。原子スイッチは、いわば機械スイッチであるが、ナノスケールの素子寸法を実現することによって、半導体デバイス並の動作速度を可能としている。これまでに、素子単体での動作確認に加えて、基本論理回路や1キロビット不揮発性メモリチップの試作を行い、その動作を確認してきた。原子スイッチは構造が簡単であることから、一般的な微細加工手段を用いての集積化が可能であり、既存の電子デバイスへの組み込みも比較的容易であると考えられる。また、原子スイッチには、不揮発性や低オン抵抗など、半導体デバイスにはない優れた特徴があり、これらの特徴を利用すると、半導体デバイスを用いてでは実現が難しい新しいタイプの電子デバイスの開発も可能となる。

本セミナーでは、原子スイッチ開発に至ったナノサイエンスの研究から話を始め、原子スイッチの動作原理と特徴、さらには、原子スイッチの特徴を活かしたデバイス開発の現状について紹介する。

## 「スピントランジスタの研究動向」

東京大学大学院新領域創成科学研究科基盤情報学専攻 菅原 聡

スピントロニクス(またはスピントロニクス)とは従来のエレクトロニクスの分野で用いられることのなかったキャリアのスピンの自由度・機能を積極的に活用した新しいエレクトロニクスの分野である。スピントランジスタはデバイス内部に強磁性体を取り込みスピン偏極したキャリアによる電流(スピン偏極電流)の制御を可能とした高機能デバイスであることから、スピントロニクスのキーデバイスとして注目を集めている。これまでに様々な動作原理・構造のスピントランジスタが提案されており、また、いくつかのスピントランジスタについてはその動作も実験的に確認されている。しかし、スピントランジスタではスピン偏極電流を用いた機能のみに着目してトランジスタ本来の機能を犠牲にしているものも多い。スピントランジスタを集積回路に応用して新たなエレクトロニクスへと展開させるためには、スピントランジスタはスピン偏極電流による機能(磁気電流比など)が十分であることの他に、通常のトランジスタと同様に高い電流駆動能力や低消費電力などといった要請を満足するものでなくてはならない。このようなスピントランジスタを集積回路に応用することによって始めて、スピンの自由度を利用したアーキテクチャに基づく新しい集積エレクトロニクスの展開が可能となる。本稿では集積エレクトロニクスへの応用という観点から代表的なスピントランジスタを選択して紹介を行い、スピントランジスタによる集積エレクトロニクスの実現に向けた課題について述べる。

## 「放射光光電子顕微鏡 PEEM によるナノ領域の磁区観察と制御」

東京大学大学院工学系研究科 尾嶋正治

磁気記録デバイスの超高密度化に伴い、さまざまな微小パターンにおける磁気構造の詳細な解析が必要になってきている。磁気力顕微鏡 (MFM) の進歩や磁気シミュレーション技術の発展によって、サブ 100 nm 領域の磁区構造の解析が可能になっている。しかし、面内磁化である flux closure では磁束の噴出しがないために、MFM では磁区構造を観測することは困難である。これに対して、円偏光放射光を用いた X 線磁気円二色性 (X-ray magnetic circular dichroism: XMCD) 光電子顕微鏡 (PEEM) は元素選択性、面内磁区構造観察、nsec オーダーの時間分解測定、空間分解能数 10nm という大きな特徴を持っており、また、直線偏光放射光を用いた X 線線二色性 (X-ray magnetic linear dichroism: XMLD) を用いると反強磁性のイメージングが可能になる。これは放射光の大きな特徴である。

本講演では、まず放射光光電子顕微鏡の原理、装置開発、XMCD-PEEM の原理を説明し、いくつかの解析例を紹介する。すなわち、1) パーマロイパターンの磁区構造の形状依存性、2) リング型パーマロイパターンのカイラリティ (磁化回転方向) 観察と制御手法、3) SrTiO<sub>3</sub> ステップ基板上に成長させた強相関酸化物薄膜の磁区構造: ステップ誘起 1 軸異方性、および磁気異方性のパターン形状・サイズ依存性、4) 放射光パルス性を利用した時間分解 XMCD-PEEM による磁区構造の動的観察 (計画)、5) XMLD-PEEM による反強磁性体 NiO 単結晶中磁区構造観察、について説明し、放射光光電子顕微鏡による磁気イメージング技術の展望について議論していきたい。



## 「ナノ磁性の応用と計測の重要性」

東大、理研 大谷義近

一般に磁性体は、静磁エネルギー、磁気異方性エネルギーや交換エネルギーから成る自由エネルギーを最小にするように、異なる磁化方向を持った微細な分域構造（磁区）に分かれ消磁している。磁区と磁区の間には磁気スピンのなだらかにねじれた遷移領域の磁壁が存在し、通常の遷移金属強磁性体の場合おおよそ 10 ナノメートル程度の大きさとなる。したがって、注目する磁性体のサイズを数十ナノメートルの大きさに近づけると磁性体中に生じる磁区構造は、上述の磁区を一つしか含まない磁気円盤や、磁壁を一つだけ内包する磁気細線など、単純構造を有する強磁性体になる。このような強磁性体を格子状に並べたり数珠状に繋げたりすると、とたんにパターンドメディアや磁気ロジックゲートなどの次世代高機能磁気デバイスの顔を覗かせる。

一方、1988年の巨大磁気抵抗効果の発見に代表されるように我々は強磁性体中を流れる電流はスピン偏極しており電荷の流れとスピンの流れ（スピン流）が存在することを知っている。最近では、上述した単一磁壁を内包する強磁性細線に電流を流すと磁壁がスピン流と相互作用して運動する現象（スピントルク効果）についても理論と実験の両面から理解が進んでいる。更には、スピン注入源として、制御性良く加工された強磁性体を非磁性体と接合することにより、非磁性金属や半導体中に非平衡にスピン偏極を誘導する、あるいはナノスケールで微細加工された微小な強磁性体の磁化を反転したり共鳴させることも可能である。ここで主役となるスピン流やスピン偏極は微小な物理量であり、精密な計測の重要性が顕となる。本稿では、前半部分でナノ構造磁性体の作製方法を簡単に概説した後、応用に直結すると期待されているナノスケール磁性体を用いた実験研究を我々の結果を交えながらナノ磁性の応用と計測の重要性について議論したい。