

戦略的創造研究推進事業
－CRESTプログラム－

研究領域「高度情報処理・通信の実現に向けた
ナノファクトリーとプロセス観測」

研究領域中間評価用資料

平成18年3月3日

1. 戦略目標

戦略目標：情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製（平成14年度設定）

1. 名称

情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製

2. 具体的な達成目標

2010年に訪れると予想されている現方式のシリコン集積回路の微細加工限界（ムーアの法則の限界）を越えた、次世代の情報処理・通信を担う新たな情報処理・通信用デバイス・材料・システム開発をめざす。この際、シリコン基板及び非シリコン基板の双方の取組みを実施する。

また、これらデバイス・材料・システムを活用するためのインターフェースとしても有用な各種センシング技術（最先端的計測法・先端センサー素子とセンサー管理システムの開発等）による健康・環境計測法の実現を目指す。

これらの目標達成のため、革新的な物性を有する物質創成からデバイス・システム開発までの総合的な推進を目指す。

このため、2010年代に実用化・産業化を図るべく、以下のような成果等を目指す。

・現在の半導体よりも演算速度を2桁向上するとともに、消費電力を2桁以上低減する情報通信用デバイスの探索。

・革新的なナノ素材とナノプロセスの開拓、新機能・新特性を持つ超集積素子の実現及び、医療応用・障害克服などに貢献するための集積システムの生体親和性の飛躍的向上。

・革新機能を付与した単一分子の合成及び高度集積化法の開拓等、機能分子を望むように集積して回路を形成する技術の確立及び分子デバイスシステムへ応用

・ナノメモリーの原理・素材・方式の解明を通じ、現在のハードディスクの記録密度の1000倍程度の記録密度を目指す。

・固体量子ビット素子、超伝導系量子磁束素子、相関電子素子、相関光子素子、スピン制御素子、ナノチューブ・ナノワイヤ素子等、新原理素子の探索及び技術的な壁の打破

・大容量・超高速の光通信技術に必要な光発生、光変調、光スイッチ、光増幅、光検出、光メモリ、表示などへの革新につながるナノ構造フォトンクスや材料の開発を通じた次世代光技術の創製

・バイオ分子の自己組織化を利用したナノスケールの新素子、新材料の創製を通じた高集積バイオチップの開発

・半導体、酸化物や磁性体中の電子の持つもう1つの自由度であるスピンを電子デバイスにおける新しい自由度として積極的に活用した、新しいナノ構造を利用したスピンエレクトロニクス材料の探索・創製

・超分子を用いたバイオナノ超分子センサー、導電性超分子スイッチング素子、ナノマシンなどの分子デバイス、ナノ材料の開発

・フラーレンの集積化、ナノデバイスへの応用に不可欠なCNT超微細加工技術、コンポジット材料開発

・フラーレン、ナノチューブに次ぐ新たなナノ集合体材料の創製と開発を通じたクラスター・ナノ粒子集合体をベースにした素子の実用化

・従来は全く異なる物質・材料として扱われてきた有機物質と無機物質とをナノスケールで融合させた構造を持つ全く新しい物質・材料群による素子の開発

3. 目標設定の背景及び社会経済上の要請

経済のグローバル化と国際競争の激化等に伴う産業競争力の低下、雇用創出力の停滞といった現下の経済社会の課題を科学技術、産業技術の革新により克服し、我が国の産業競争力を強化し、経済社会の発展の礎を着実に築くことが不可欠である。このような革新的な科学技術、産業技術の発展の鍵を握るものとして、ナノレベルで制御された物質創製、観測・評価等の技術であるナノテクノロジーが、近年急速に注目されている。

具体的には、

- ①半導体を用いた高速・高集積・低消費電力デバイス技術に関し、国際競争力を確保することに加え、
- ②全く新しい原理を用いた次世代のデバイス・材料の礎を確立することが長期的展望にたった我が国の国際的な技術競争力の確保にとり必要不可欠である。

また、これらの実用化・産業化の目標を達成するためには、ナノレベルでの計測・評価、加工、数値解析・シミュレーションなどの基盤技術開発や、革新的な物性、機能を有する新物質創製への取り組みが必須である。

なお、総合科学技術会議分野別推進戦略（平成13年9月）においても、情報通信分野においては、国家的・社会的課題の克服のため、「次世代情報通信システム用ナノデバイス・材料」が5つの重点領域の1つとして位置づけられているところである。

4. 目標設定の科学的な裏付け

情報通信分野における我が国の技術競争力は、欧米に比べて全体的に低下傾向にある。これまで大きな役割を果たしてきた民間の研究開発については、その投資額の日米格差が急速に拡大しており、内容的にも製品開発に重点を移しつつあるため、我が国の競争力強化に向け、リスクの高い研究開発等について国の役割が一層重要となっている。

特に、次世代情報通信システム用ナノデバイス材料においては、2010年に訪れると予想されている現方式のシリコン集積回路の微細加工限界（ムーアの法則の限界）を越えた、次世代の情報処理・通信を担う多様な新原理デバイス・材料・システムの構築に向け、現在、各国が世界標準の獲得競争のまっただ中にある。我が国として、次世代情報通信用デバイス開発において、世界を凌駕するための取り組みを緊急に準備することが必要であるが、この際、シリコン基板及び非シリコン基板の双方について産業化を見据えながら段階的な目標設定も行いつつ、戦略的に取り組むことが必要である。

ソフトウェア無線等の新規通信方式への転換につれて、通信システムの急速な高速・大容量化が今後とも予想されているが、半導体の集積化・高機能化はムーアの予測に従い、3年で4倍のペースで進んでおり、2005年には素子の最小寸法が100nmを切り、ナノデバイス時代に突入することとなる。このため、大容量、高演算速度、省エネルギー、高セキュリティその他の画期的な機能を有する新原理デバイス・材料・システムの開発が急がれている。

具体的には、

- ・現在の延長の技術においては、高速化限界、セキュリティ問題、消費電力等の課題の克服に加え、量子効果等により現れる素子の動作や製造技術上の物理的な限界、製造コスト等の問題を回避するための革新的なナノ素材やプロセスの開発、量子ドット、量子細線、ナノチューブ等を取り込んだスイッチ素子の開発が求められる。
- ・現在使われているLSIメモリ、磁気ディスク、光ディスクの性能限界の壁をうち破るとともに、強誘電体メモリーなどの次世代メモリーの開発が求められている。
- ・更に、現在の方式の集積回路とは全く異なる新たな原理に基づくデバイスとして、単一分子素子、各種固体Qビット素子、超伝導系新量子磁束素子、スピンエレクトロニク

ス等の技術開発も次世代の世界標準獲得の観点から積極的に取り組むべき重要な課題である。

・加えて、このようなデバイスやシステムの開発に際しては、革新的な物性、機能を有する新物質創製が必須であり、超分子、カーボンナノチューブ、フラーレン、クラスター・ナノ粒子をはじめとした積極的開発が必要である。

5. 重点研究期間

ナノテクノロジー分野については、競争が激しく多くの研究領域を推進する必要があるため初年度のみ公募とし、次年度以降には新たに同じ研究領域での公募は行わない。

1 研究課題は概ね5年の研究を実施する。(なお、優れた研究成果を上げている研究課題については、厳正な評価を実施した上で、研究期間の延長を可能とする。)

2. 研究領域

「高度情報処理・通信の実現に向けたナノファクトリーとプロセス観測」

(平成14年度発足)

領域の概要

高度情報処理・通信に資するナノデバイス等の実現に向けた新しいプロセッシング技術、ナノ構造体の機能を観察・計測・評価する新しい計測評価技術等に係わる研究を対象とする。具体的には、新たなプロセッシング技術の確立に向けた、ナノ構造を作り出す光・X線・電子ビーム・イオンビーム等の新たな活用に係わる研究、分子・原子を制御することにより結晶・組織等をナノレベルで形成する技術に係わる研究、および、構築されたナノ構造体の機能を計測・評価、検証する技術に係わる研究等が含まれる。

3. 研究総括

蒲生 健次 (大阪大学 名誉教授/ (独) 情報通信研究機構関西先端研究センター
専攻研究員)

4. 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	終了時 所属・役職	研究課題	研究費
平成 14 年度	石橋 幸治	理化学研究所 主任研究員	カーボンナノ材料を用いた量子ナノデバイスプロセスの研究	530
	市川 昌和	東京大学 教授	超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術	456
	彌田 智一	東京工業大学 教授	高信頼性ナノ相分離構造テンプレートの創製	593
	川勝 英樹	東京大学 教授	超高速・超並列ナノメカニクス	506
	木下 博雄	兵庫県立大学 教授	位相差極端紫外光顕微鏡による機能性材料表面観察・計測技術	296
	大門 寛	奈良先端科学技術大学院大学 教授	ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡の開発	285
	松井 真二	兵庫県立大学 教授	高機能ナノ立体構造デバイス・プロセス	478
平成 15 年度	本間 芳和	東京理科大学 教授	カーボンナノチューブ形成過程その場観察と物性制御への展開	396
			総研究費	3540

5. 研究総括のねらい

加工・計測技術はナノテクノロジーの共通基盤技術である。ポストシリコン時代には数10nm以下から原子・分子スケールまで、自由に形成、加工、操作し観測・評価をする極限技術が必要である。半導体産業界においては、45nm以下を描画するマスマシニング技術の実現の見込みはまだ不明というのが世界的なコンセンサスである。この時点にあつて、その先を見据える極限加工技術を世界に先駆けて実現して我が国の電子産業の発展を持続し、高度情報化社会のさらなる進展をもたらすには、ナノメータ領域の加工・計測技術の開発は多くの挑戦的な課題を含んでおり、探索的な基礎研究の積み重ねが要求される。

挑戦的な領域の開拓には、課題は集中するよりも可能性のある手法をバランスよく追求していくことが必要である。また、専門分野の異なる研究者を集めて組織し、相互の協力を行って知識・技術の融合のもとに研究を進めることが望まれる。また、独創的なナノテクノロジーを世界に先駆けて開拓するには、手法の開拓と共にそれを実現する独創的な装置を開拓することが必須である。そこで、本領域では、新しい手法と共に、画期的な装置を開発することも重要課題として取り上げている。

具体的には、ナノ加工においては加工精度(サイズ、位置の制御、ゆらぎなど)、生産性、コストなどに画期的な飛躍が望まれ、計測においては加工プロセスやナノ素子の機能、特性評価のためにナノ領域の局所観測・評価手法が望まれる。このとき、理論の援用を最小にして直接観察できる手法が信頼性、汎用性の観点からも重要である。

6. 選考方針

優れた提案が多数寄せられ、その中で少数しか採択できないため選考は公平、慎重に進めた。提案を評価するに当たっては、目的が明確であるか、新規性は何か、提案が具体的であるか、目的を達成するための問題点とその解決策は何か、大きな成果、インパクトが期待できるか、実現の可能性、遂行能力は大きいかなどを判定のポイントとした。これまでの成果と組織も実現の可能性、遂行能力を判定する上で一つのポイントである。また、新技術の実用化には企業との協力も望まれるので、この点も考慮にいった。

共通の戦略目標の下に複数のチームが参加して研究を推進することは、バックグラウンドが異なる異分野との交流、情報交換を密にするよい機会である。広い知識の融合によって生まれる極限技術の開発には、特に前述のように分野のバランスが必要である。このため、課題、分野、手法など集中することなくバランスを取るように心がけた。

7. 領域アドバイザー

領域アドバイザー名	所属	役職	任期
青柳 克信	東京工業大学	教授	平成14年7月～平成20年3月
石原 直	東京大学	教授	平成14年7月～平成20年3月
大泊 巖	早稲田大学	教授	平成14年7月～平成20年3月
小川 正毅	名古屋大学	教授	平成14年7月～平成20年3月
古室 昌徳	産業技術総合研究所	つくばセンター次長	平成14年7月～平成20年3月
志水 隆一	大阪工業大学	リエゾンセンター長	平成14年7月～平成20年3月

デバイスプロセス、材料プロセスおよび計測分野において十分の研究実績と広い見識を持つ人を選んだ。また、専門分野のバランスと所属も考慮した。すなわち、この分野では

産業界の意見も重要であるので産業界の人にも加わって頂いた。推進途中で大学に移られたため結果的に大学の人が殆どになっているが、企業の経験を生かした貴重な助言を頂いている。

8. 研究領域の運営

融合的な研究分野において成果をあげるために、情報の流通を円滑にし、また、研究協力の機会を高めることを重視した。このために、オンサイトミーティングを重視した。オンサイトミーティングは、アドバイザーと全研究参加者に参加を呼びかけ、研究成果の紹介のみでなく研究室の見学も行い、実験のノウハウなど広く情報の交換が出来るように努めた。また、ポスター発表も行い、特に若手研究者の切磋琢磨、研鑽の場になるようにも努めた。これによって、研究代表者間で相互協力ができて研究を発展させることが出来た例も生まれた。また、他分野との協力では、ワークショップや国際シンポジウムの共催なども行った。

研究の推進は基本的には研究者の計画を尊重した。課題の評価、研究方針に対する助言は、必要に応じてアドバイザーも参加したオンサイトミーティングおよび各年度末に行った成果報告会での発表などをもとにして行った。また、必要な場合は研究事務所に研究代表者に来て頂いて研究総括と議論の上、研究方向の確定、追加の予算などの決定を行った。

9. 研究の経過

研究課題：カーボンナノ材料を用いた量子ナノデバイスプロセスの研究

研究代表者：石橋幸治

新機能ナノデバイスの基本構造として量子ドットに注目し、カーボンナノチューブ (CNT) を用いたデバイス機能の実証およびデバイスプロセスの開発を目指している。これまでに、世界で初めて明確な人工原子的振る舞いの直接観測に成功し、CNT を用いた単電子トランジスタ、単電子インバータ、単電子 XOR(排他的論理和演算) デバイスを作製しその動作を実証した。また、CNT と GaAs/AlGaAs のハイブリッド化を初めて提案し、そのデバイスプロセスを確立した。

研究課題：超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術

研究代表者：市川昌和

ナノドット形成技術を基礎にして、Si 光素子実現のための材料プロセス技術の開発とそれに必要なナノ構造材料の物性評価技術の開発を目的としている。これまでに、(1)Ge ナノドット超格子の作成とフォトルミネッセンス (PL) スペクトルの測定、(2)鉄シリサイド (FeSi₂) のナノドットの積層構造の作成と PL スペクトルの測定、(3)Ge ナノドットの走査トンネル顕微鏡 (STM) による操作、(4)個々の Ge ナノドットの電子状態の走査トンネル分光法 (STS)、光電子分光法と、STM-光吸収分光法による測定 (5)Ge ナノドット間の伝導特性の測定、(6)断面透過電子顕微鏡 (TEM) によるナノドット結晶構造の観察、走査透過電子顕微鏡 (STEM) による Si 薄膜中の Ge ナノドットの観察と、TEM による Ge ナノドット成長過程のその場観察、を行った。

研究課題：高信頼性ナノ相分離構造テンプレートの創製

研究代表者：彌田智一

精密重合によって得られる多機能型両親媒性ブロック共重合体の自己組織化 (ミクロ相分離) によって、実用リソグラフィ技術の及ばないデカナノメートルスケール (10-50nm) の親水性ナノシリンドラードメインの六方格子配列の形成と薄膜内垂直配向を実現し、これを構造制御性と大面積製膜性に優れたナノテンプレート薄膜として各種材料への転写および複合化プロセスの開発を進めた。

研究課題：超高速・超並列ナノメカニクス

研究代表者：川勝英樹

走査型力顕微鏡の高分解能化、高感度化、ならびに、走査型力顕微鏡を用いた原子レベルの質量検出のために必要な振動検出方法として、ヘテロダインレーザドップラー速度検出を提案した。これにより、カンチレバーのサブオングストロームオーダの振幅を用いた原子分解能の取得、原子分解能ラテラル力顕微法、カンチレバーの 200MHz までのドップラー検出が可能となった。従来の 1/100 から 1/10 の振幅による原子レベルの場の計測が可能になり、原子レベルの短距離力の作用範囲内での微分計測が実現された。また、サブ fm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ のノイズレベル、200MHz までの検出帯域の達成により、超高速撮像や、微小質量検出の可能性を示した。

研究課題：位相差極端紫外光顕微鏡による機能性材料表面観察・計測技術

研究代表者：木下博雄

本研究は、2009 年までに次世代リソグラフィ技術である極端紫外線露光法を実用化するために、多層膜が形成されたマスク上の欠陥を露光光と同一の EUV 光で直接観察し、サブナノメートル (0.03 nm) の微細な表面界面の 3 次元像の形成を実現させることを目的としている。これまでに高精度観察性能をもつ極端紫外光顕微鏡を開発し、EUVL 用実マスクの観察、ならびに、ガラス基板上に設けた凹凸パタンに多層膜を形成したマスクブランクス上の欠陥（位相欠陥）の観察に成功した。実マスクの検出分解能は 50 nm、位相欠陥は高さ 5nm、幅 90nm まで確認した。

研究課題：ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡の開発

研究代表者：大門寛

ナノサイズ物質の原子配列構造を立体的に解析できる顕微鏡を開発するため、「立体原子顕微鏡」の技術を確認し、より簡便に測定できる小型で高性能の分析器を製作するとともに、低倍率での顕微鏡像も得られる顕微鏡機能システムの基礎的な開発を進めることが目的である。これまでに、多くの物質の立体写真像を撮影することにより理解が進み、明瞭な像を撮る装置改良にも成功し、「立体原子顕微鏡」の技術は着実に確立しつつある。簡便に測定できる小型で高性能の分析器は製作がほぼ終了し、性能テストと不具合のチェック段階に入っている。顕微鏡機能システムの基礎的な開発として、広角対物レンズを発明し、試作を進めている。これに関して特許申請を行い、外国企業と実施準備契約を結ぶなど、反響の大きい成果である。このレンズの性能評価と並行してレンズシステムと全体の「ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡」の製作を進めている。

研究課題：高機能ナノ立体構造デバイス・プロセス

研究代表者：松井真二

本研究課題は、集束イオン・電子ビーム励起反応堆積技術(FIB/EB-CVD)を用いて、ナノ立体構造形成プロセス技術の開発および「高機能ナノ立体構造電子・機械・光・バイオデバイス」の創製を目的としている。FIB-CVD ナノ立体構造描画システムのソフト・ハードを開発することにより、各種ナノ立体構造デバイス試作・特性評価を行った。さらに、FIB-CVD と MO-CVD との複合装置を試作し、ナノ立体構造光デバイス創製を目的として、GaN ナノ構造体を作製し、その光学的評価を行った。ナノ立体構造基礎物性研究として、FIB/EB-CVD により形成されたナノ立体構造体のヤング率等の基礎物性評価を行った。また、基礎物性探索研究において、カーボンナノ構造体固相反応からカーボンナノチューブの成長メカニズム解明に関わる現象を見出した。

研究課題：カーボンナノチューブ形成過程その場観察と特性制御への展開

研究代表者：本間芳和

カーボンナノチューブ(CNT)の成長過程をその場観察し、その結果を CNT 形成技術に反映し、CNT の成長・物性などを制御することを目的としている。これまでに、環境制御型走査電子顕微鏡(SEM)を開発し、微細構造間に単層 CNT が架橋成長する様子を捉え、CNT が架橋構

造やバンドル（束）を形成する過程をはじめて明らかにした。また、単一の単層 CNT の垂直成長を実現し、ラマン分光およびフォトルミネッセンス(PL)測定を用いて単一の単層 CNT の物性測定を可能にした。

10. 総合所見

ナノ加工・計測はナノテクノロジーの共通基盤技術であり、現在、世界的にその確立を目指して研究が進められている。共通基盤技術であるが故に応用分野に対応して様々な手法や技術に対する要求がある。これらを本研究領域に全て網羅することは、限られた予算内では採択件数に制限があり不可能である。また、評価する側の専門分野による制約もある。さらに、公募では応募状況を考えると全てを揃えることはできないこともある。これらによって、採択課題は自ずと制約を受ける。例えば、トップダウンとボトムアッププロセスの特長を融合したプロセスは、新しいナノ加工技術として期待できる。また、分子デバイスもポストシリコン時代の極限のデバイスとして期待されている。しかし、このような制約のもとで、これらを主テーマとする優れた課題は採択できなかった。これら以外は、この分野で重要な課題はほぼ集まったと考えている。採択された課題はいずれもチャレンジングな新規な課題である。また、いくつか、すでに世界的にも注目される成果も出つつある。

ナノ加工・計測は基礎科学技術への貢献だけでなく産業応用との結びつきが強い。この点で、産業界からの提案、参加も期待したが、応募は多くなく、採択にはいたらなかったのは残念であった。しかし、必要に応じて研究グループでは、基礎科学技術の研究だけではなく、明確な出口を求めて産業界との協力、情報交換や実用化への試みが行われていることは望ましいことである。

課題の中間評価では、アドバイザーから、優れた成果もいくつか見られ、全体としてはほぼ計画通りに進行しているとの評価を頂いた。しかし同時に、少数については、研究方向、協力体制などについて検討する必要があることも指摘された。これらの研究課題については研究代表者と議論し再検討を御願ひしている。これによって、研究終了時にはいずれの研究グループも初期の目標を達成できるものと期待している。

世界的に競争が激しく、いち早く独自の革新的科学技術の確立が望まれているナノテクノロジー分野では、一つの研究領域について優れた研究者を結集し、分野の異なる研究者のアイデアの交換、相互協力のもとに集中して進めることが肝要である。本研究領域では、情報の交換、相互協力を緊密に進めるために、オンサイトミーティングを重視した。これによって研究情報の効率的な交換が行われ、研究協力ができ研究が進展した例が生まれたことは喜ばしいことである。

半導体産業と関連するエレクトロニクスへの応用は、ナノ加工・計測技術の最も大きな出口であろう。この分野ではまだ、45nm のパターン描画技術の実用化の見込みがないと考えるのが世界的なコンセンサスであり、現状の技術水準を考えるとポストシリコン時代に必要な 10nm 以下のナノ加工技術との間には大きなギャップがあり、その確立には大きな努力と基礎研究の積み重ねが必要であることが窺える。この点においても CREST 事業の必要性和期待は大きいといえる。

領域評価用資料 添付資料（CRESTタイプ）

研究領域「高度情報・通信の実現に向けたナノファクトリーとプロセス観測」

1. 応募件数・採択件数

採択年度	応募件数	採択件数
平成14年度	46	7
平成15年度	19	1
平成16年度	25※	0
採択数 計		8

※ 平成16年度は戦略目標（3目標）毎に公募し、ナノテク分野別バーチャルラボ9領域全体で選考した。

2. 主要業績

採択年度	研究代表者	論文投稿		口頭発表		その他	外部発表 計	特許出 願件数
		国内	国際	国内	国際			
平成 14 年度	石橋 幸治	0	37	92	50	7	186	1
	市川 昌和	0	3	18	14	2	37	2
	彌田 智一	6	16	105	37	5	169	8
	川勝 英樹	1	8	24	36	2	71	9
	木下 博雄	0	11	29	27	0	67	1
	大門 寛	0	11	75	25	12	123	1
	松井 真二	0	26	65	61	23	175	7
平成 15 年度	本間 芳和	1	20	62	23	0	106	15
合 計		8	132	470	274	48	932	34

平成 17 年 9 月末現在

2-2 代表的な発表論文

○ 平成 14 年度採択

研究課題：カーボンナノ材料を用いた量子ナノデバイスプロセスの研究

研究代表者：石橋幸治

(1) D. Tsuya, M. Suzuki, Y. Aoyagi and K. Ishibashi

“Exclusive-OR gate using a two-input single-electron transistor in single-wall carbon nanotubes”
Applied Physics Letters **87**, 153101 (2005)

量子ドットの周期的なゲート電圧特性を利用すれば、1 個の量子ドットに 2 つの入力ゲートを設けることにより、XOR ゲートデバイスを容易に構成することができる。実際に、単層カーボンナノチューブを用いて 2 つのゲートを持った単電子トランジスタを作製し、各ゲートが量子ドットに対して同じ働きをすることを確認し、1.5K から 40K 程度まで XOR 動作をすることを実証した。

(2) T. Tsukamoto, S. Moriyama, D. Tsuya, M. Suzuki, T. Yamaguchi, Y. Aoyagi and K. Ishibashi

“Carbon Nanotube quantum dots fabricated on a GaAs/AlGaAs two-dimensional electron gas substrate”
Journal of Applied Physics **98**, 076106 (2005)

GaAs/AlGaAs の 2 次元電子ガス (2DEG) の基板の上に単層カーボンナノチューブを形成し、2DEG をゲートとした単電子トランジスタ動作を 2.8K および 22mK で測定した。ドットと 2DEG ゲートへのオーミックコンタクトの間の形成された量子ポイントコンタクトを制御することにより 2DEG のカーボンナノチューブへのゲート動作を ON、OFF することができることを示した。SWCNT ドットと 2DEG のユニークなコンビネーションはフレキシブルなハイブリッドデバイスを実現する可能性がある。

(3) S. Moriyama, T. Fuse, M. Suzuki, Y. Aoyagi and K. Ishibashi

“Four-Electron Shell Structures and an Interacting Two-Electron System in Carbon-Nanotube Quantum Dots”
Physical Review Letters **94**, 186806(2005)

単層カーボンナノチューブを利用した量子ドットが、1 次元人工原子として振る舞うことを実験的に示した。すなわち、原子の特徴である離散化量子準位、電子殻構造、量子準位のゼーマン効果を観測することに成功した。カーボンナノチューブのバンド構造や 1 次元閉じこめ構造を反映して、電子殻は 4 電子で閉殻し、量子準位間隔は周波数に換算してテラヘルツの領域にあることも示した。さらに、電子殻に電子を 2 個入れた場合に、相互作用する 2 電子系の量子状態であるスピン 1 重項状態と 3 重項状態の観測に成功し、磁場がないときに 1 重項状態の方が交換エネルギー分だけ大きなエネルギーを持つことを示し

た。これは、原子におけるフント則の最も直接的な例である。そして、電子殻に電子を1個入れることによりスピン 1/2 系が実現できることを示し、カーボンナノチューブ人工原子がスピン型量子ビットとして有力な系であることを示した。

研究課題：超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術

研究代表者：市川昌和

- (1) Y. Nakamura, Y. Nagadomi, K. Sugie, N. Miyata and M. Ichikawa

‘Formation of ultrahigh density Ge nanodots on oxidized Ge/Si(111) surfaces’,
J. Appl. Phys. 95, 5014 (2004).

Si(111)-(7×7)基板上に形成した Ge 層を酸化することにより得られた極薄 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 酸化膜上に、サイズが約 4nm で高密度 ($>10^{12}\text{cm}^{-2}$) な Ge ナノドットを成長した。ナノドットの密度は Ge の堆積速度に依らないことが分かった。このことは、Ge 原子と極薄酸化膜の化学的反応が Ge ナノドットの核形成を決定していることを示している。極薄 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 酸化膜上に形成した Ge ナノドットのサイズと密度は、成長温度と堆積量に依存した。この依存性から、極薄 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 酸化膜を使用することにより、超高密度 Ge ナノドットの形成を制御できることが分かった。

- (2) Y. Nakamura, Y. Nagadomi, S.-P Cho, N. Tanaka and M. Ichikawa

‘Formation of strained iron silicide nanodots by Fe deposition on Si nanodots on oxidized Si(111) surfaces’,
Phys. Rev. B72, 075404 (2005).

極薄 Si 酸化膜を有する Si(111)基板上の Si ナノドット上に Fe を蒸着することにより得られる鉄シリサイド ($\epsilon\text{-FeSi}$, $\beta\text{-FeSi}_2$ および $\alpha\text{-FeSi}_2$) のエピタキシャル成長を、RHEED、STM および TEM により調べた。Fe の成長温度、成長速度および堆積量などの形成条件を制御することにより、ほぼ単一相の鉄シリサイドナノドットを形成した。 $\epsilon\text{-FeSi}$ あるいは $\alpha\text{-FeSi}_2$ ナノドットは、基板表面上に平均粒径が約 5nm で超高密度 ($>10^{12}\text{cm}^{-2}$) にドーム型にエピタキシャル成長した。密度が約 $5\times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ で、高さが約 2nm、幅が約 8nm のドーム型の $\beta\text{-FeSi}_2$ を形成した。断面 TEM 観察により、 $\beta\text{-FeSi}_2$ は Si 表面から内部方向に成長していることが分かった。内部の $\beta\text{-FeSi}_2$ ナノドットの部分は、Si(111)面に平行な急峻な界面を有する約 5nm 厚で約 20nm 幅のディスク形状をしていた。ナノドットはエピタキシャル成長しており、 $\beta\text{-FeSi}_2$ と Si 界面近傍では殆ど不整合転位がなく、格子不整合により歪んでいた。鉄シリサイドナノドットのサイズ分布は、ドット端モビリティの活性化エネルギーが 1.3eV であるとしたオストワルド成長により説明できた。

研究課題：高信頼性ナノ相分離構造テンプレートの創製

研究代表者：彌田智一

- (1) Enhancement of Surface-Relief Gratings Recorded on Amphiphilic Liquid-Crystalline Diblock Copolymer by Nano-Scaled Phase Separation

Haifeng Yu, K. Okano, Atsushi Shishido, Tomoki Ikeda, Kaori Kamata, Motonori Komura, and Tomokazu Iyoda

Adv. Mater., 17(18), 2184-2188 (2005).

液晶相を示す両親媒性ブロック共重合体薄膜にホログラム記録された回折格子パターンが加熱処理によって異常に強調されることを明らかにした。このホログラム記録は、2 光束レーザ光の干渉露光によって室温で書き込むことができ、その後のアニールにより回折効率を 2 桁向上させることができた。このようなホログラム記録は、信頼性のあるデータ記録に応用される可能性がある。

- (2) Synthesis, Nanostructures, and Functionality of Amphiphilic Liquid Crystalline Block Copolymers with Azobenzene Moieties

Yanqing Tian, Kazuhito Watanabe, Xiangxing Kong, Jiro Abe, and Tomokazu Iyoda

Macromolecules, **35**(9), 3739-3747 (2002).

アゾベンゼンをメソゲンとする poly[11-{4-(4-butylphenylazo)phenoxy}undecyl methacrylate]を原子移動ラジカル重合法によって合成し、多分散度 1.17 以下、分子量 6100 から 23500 までのホモポリマーを得た。熱的評価により、ホモポリマーは、等方点より低温側にスメクティック A 相、スメクティック C 相および構造が未定のスメクティック X 相を示すことがわかった。これらの転移温度は、分子量の増加に伴い増加し、分子量 21500 程度で一定となる。同様にポリエチレンオキシドの片末端にイソプロモ酪酸を置換したマクロ開始剤を用いて、上記モノマーを原子移動ラジカル重合によって重合し、特定の長さのポリエチレングリコールを片方のセグメントとする両親媒性ブロックコポリマーを多分散度 1.11 以下で合成した。これらのブロックコポリマー薄膜のマイクロ相分離構造は透過型電子顕微鏡を用いて観察し、10~20nm 程度の周期構造（ナノ相分離構造）が再現性良く形成されることを明らかにした。熱処理されたホモポリマーとブロックコポリマー薄膜で、分光特性と光異性化過程に顕著な違いが見られた。これはブロックコポリマーのナノ構造による効果と考えられる。

(3) Photocrosslinkable liquid-crystalline block copolymers with coumarin units synthesized with atom transfer radical polymerization

Yanqing Tian, Xiangxing Kong, Yu Nagase, and Tomokazu Iyoda

J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem., **41**(14), 2197-2206 (2003).

光架橋機能を示すクマリン構造を側鎖にもつ液晶性セグメント (poly[11-{4-(3-ethoxycarbonyl-coumarin-7-oxy)carbonylphenyloxy}-undecyl methacrylate]) とポリスチレンからなる液晶性—コイルブロックコポリマーを原子移動ラジカル重合法によって合成した。合成したホモポリマーとブロックコポリマーはいずれも狭い多分散性で、精密制御されたリビング重合が進行していることがわかった。示差走査熱量測定、偏光顕微鏡、広角 X 線回折により、全てのホモポリマーとブロックコポリマーはスメティック A 相を示した。薄膜中のクマリンは、300nm 以上の照射により効率よく 2 量化され、この光架橋によって耐熱性と耐溶媒特性に優れたナノ相分離構造の固定化に成功した。

研究課題：超高速・超並列ナノメカニクス

研究代表者：川勝英樹

(1) S. Kawai, S. Kitamura, D. Kobayashi and H. Kawakatsu

“An ultrasmall amplitude operation of dynamic force microscopy with second flexural mode”

Applied Physics Letters **86**, 193107(2005)

市販されているダイナミックモードのカンチレバーの撓み 2 次モードを用いて、近接相互作用を検出した。高次モードは高いバネ定数と低い機械的性能指数を有しており、ダイナミック力顕微鏡で小さい振幅動作に適している。撓み 2 次モードの 0.70 Å の振幅で、Si (111)-7×7 構造の原子分解能での撮像に成功した。力勾配をサンプル表面から比較的長距離で検出するため、非常に小さい振幅で観察することは、高い安定性を確保でき、カンチレバーの先端やサンプルを破壊することなく反応性表面を観察する有効な手法である。

(2) S. Kawai, S. Kitamura, D. Kobayashi and H. Kawakatsu

“Dynamic lateral force microscopy with true atomic resolution”

Applied Physics Letters **87**, 173105(2005)

真の原子分解能のラテラル力顕微鏡を示す。市販の長方形のカンチレバーの捻れ共振モードを用いて、チップとサンプル表面の間の横方向の力を検知した。Si 表面に接触する前に、捻れ振動の小さな負の周波数シフトが観測された。一定の周波数シフトを保つように探針試料間距離を制御したところ、Si (111)-7×7 構造の可視化が可能となった。原子レベルでのラテラル方向位置変調による相互作用や摩擦の可視化の点で意義がある。

(3) F. Rose, S. Kawai and H. Kawakatsu

“Low reactivity of molecular oxygen with Si(111)-c(2×8)”

Surface Science, 600 (2006) 106-115

Si(111)表面のc(2×8)構造への酸素分子の吸着につき、室温STMを用いて原子分解能で評価した。清浄なc(2×8)上の吸着分子はO₂と反応しないが、吸着分子が $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 構造で存在する所で限定的な酸化が起きることが分かった。Si(111)-c(2×8)およびSi(111)-7×7構造へのO₂の吸着について詳細に比較評価した。表面に存在する各々の原子サイトに関し、酸素にさらすことによる反応の変化を測定した。低濃度酸素に対しては、Si(111)-7×7には酸素による明暗が観測されたのに対し、Si(111)-c(2×8)は全く酸化されなかった。高濃度酸素に対しては、7×7は、ユニットセルの欠陥部分に優先的に、広く酸化され、清浄な反応していないSi(111)-c(2×8)には、位相欠陥によるより狭い酸化領域が形成された。酸化されにくいシリコンの表面構造を明らかにした点で意義がある。

研究課題：位相差極端紫外光顕微鏡による機能性材料表面観察・計測技術

研究代表者：木下博雄

(1) K. Hamamoto, Y. Tanaka, T. Watanabe, N. Sakaya, M. Hosoya, T. Shoki, H. Hada, N. Hishinuma, H. Sugahara and H. Kinoshita

”Cleaning of extreme ultraviolet lithography optics and masks using 13.5 nm and 172 nm radiation”

J. Vac. Sci. Technol. **B23** (2005) 247-251

極端紫外光は物質とのインターアクションが強いため、露光チャンバ内に残存するハイドロカーボンや炭素や炭素系のガス、水に分解され、多層膜がコーティングされた光学部品やマスクに付着し、反射率の低下や欠陥の原因となる。従って、マスクや光学部品から炭素汚染物を取り除く有効な方法が極端紫外線リソグラフィでは重要な課題である。そこで、2つの方法を提案した。1つは、主として露光光学系の炭素汚染の除去として、実際の露光光源を用い、微量酸素を露光チャンバに流すことにより除去する方法、ならびに、マスクの炭素汚染除去法としてオゾンの発生効率の高い172nm光源の利用である。前者はサンプルを加熱することなく、その場洗浄が可能であり、後者は除去速度を高めることが可能である。その場洗浄、いわゆるオンライン洗浄では、 5.0×10^{-2} PaのO₂を含む雰囲気中で1.0GeVの蓄積リングの電子ビーム電流が130mAの条件下で、汚染除去レートは0.24nm/minであった。172nm光を使用するオフライン洗浄では、 2.0×10^{-3} PaのO₂を含む雰囲気中で、汚染除去レートは2nm/minであった。両方の洗浄方法共に、表面損傷なくMo/Si多層膜の反射率を変化させることはなかった。オンラインおよびオフライン洗浄方法の有効性が確認された。

(2) H. Kinoshita, T. Haga, K. Hamamoto, S. Takada, N. Kazui, S. Kakunai, H. Tsubakino, T. Shoki, M. Endo and T. Watanabe

”Actinic mask metrology for extreme ultraviolet lithography”

J. Vac. Sci. Technol. **B22(1)** (2004)264-267

極端紫外線(EUV)露光用マスク検査システムとして13.5nmを光源とするEUV顕微鏡を開発し、その解像性能を評価した。EUVマスクは5倍体であり、マスク上の250nm幅(ウェハ上では50nm)と350nm幅(ウェハ上では70nm)の線を解像することが可能であることを示した。さらに、マスクに使用される吸収体材料が、EUV顕微鏡で撮像されたパターンのコントラストに影響を及ぼすことが分かった。すなわち、吸収体の表面の粗さが大きいと散乱光の影響が大きくなり、コントラスト低下を引き起こす。この結果は、EUV露光に使われるマスク製造プロセスの評価に、同じ波長の光を使ったEUV顕微鏡が有効であることを示している。

(3) K. Hamamoto, Y. Tanaka, S. Y. Lee, N. Hosokawa, N. Sakaya, M. Hosoya, T. Shoki, T. Watanabe and H. Kinoshita

“Mask defect inspection using an extreme ultraviolet microscope”

J. Vac. Sci. Technol. **B23(6)** (2005)2852-2855

EUV 露光に使用されるマスク欠陥検査システムについての報告である。光源には 13.5nm の放射光を用い、顕微鏡の光学系として開孔率(NA)0.3、倍率 30 とする Schwarzschild 光学系を開発した。顕微鏡像は X 線 Zooming 管によって拡大され、CCD 上に画像として表示される。この顕微鏡と X 線 Zooming 管とによって、マスク上の 22nm までの欠陥を検知することが可能である。本論文では Finished マスクの観察結果ならびにマスクブランクス上の位相欠陥の観察結果を示した。Finished マスクの観察分解能としてこれまでに 50nm 以下を確認しており、また、位相欠陥として、ガラス基板上に形成した高さ 5nm、幅 90nm の位相欠陥の観察に成功した。これまでは、位相欠陥の有無のみの評価であったが、EUV 顕微鏡により、はじめて像としての観察が可能となった。この成果は多層膜中の微細な歪検査にも応用できる。

研究課題：ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡の開発

研究代表者：大門寛

- (1) “Atomic-orbital analysis of the Cu Fermi surface by two-dimensional photoelectron spectroscopy”
F.Matsui, H.Miyata, O.Rader, Y.Hamada, Y.Nakamura, K.Nakanishi, K.Ogawa, H.Namba, H.Daimon,
Physical Review B, 72, 195417-1-5, (2005).

電子エネルギーバンドは逆格子空間での電子状態のエネルギー分布であるが、その各々の逆格子点での電子状態を構成している電子軌道の向きを決定する方法を開発した。2次元表示型球面鏡分析器と直線偏光したシンクロトロン光を用いて、Cu(001)面の光電子強度角度分布(PIAD)を得た。異なる光子エネルギーにおけるPIADを積み重ねることにより、Cuの3次元フェルミ面(FS)を測定し視覚化した。FSを構成している電子軌道は、主に軸が外を向いている4p軌道でできていることが結論された。FS面の異なる座標における電子軌道の方位を、実測から直接明らかにすることができた。これはオービトロニクス of the new解析法として期待される。

- (2) “Visualization of graphite atomic arrangement by stereo atomscope”

F.Matsui, H.Daimon, F.Z.Guo, T.Matsushita,
Appl. Phys. Lett., 85,(17),3737-3739 (2004).

原子配列を直接に視覚化することは、物質の本来の姿を理解する上で重要である。右回りと左回りの円偏光で励起された光電子角度分布(PEAD)における前方散乱ピークの回転は、立体写真における視差と同じである。このPEADの円方向の2色性の現象を利用して、グラファイト結晶の原子配列の立体写真の撮影に成功した。炭素の場合、光電子の角運動量が小さいために測定は困難とされていたが、炭素原子の周りの3次元像の観察に成功したことは、この手法が生体分子を含めて全ての物質に応用できることを示している。

- (3) “Atomic structure of Fe thin-films on Cu(001) studied with Stereoscopic photography”

A.N.Hattori, M.Fujikado, T.Uchida, S.Okamoto, K.Fukumoto, F.Z.Guo, F.Matsui, K.Nakatani, T.Matsushita, K.Hattori, H.Daimon,
Applied Sur. Sci, 237, 311-315(2004).

Cu(001)面上にエピタキシャル成長させたFeナノ薄膜の複雑な磁気特性を、原子構造と関連づけて議論した。3次元原子構造を直接に観察する新規な分析法(立体写真法: Stereoscopic Photography)により、Cu(001)面上のFeナノ薄膜の原子構造について解析した。光軸の回りに時計方向あるいは反時計方向に回転している円偏光により励起して、光電子角度分布における前方散乱ピークのパターンを得た。エネルギー分析に2次元表示型球面鏡分析器を使用すると、原子配列の立体写真を直接得ることが出来る。得られた像から、Feの結晶構造が、Fe膜が厚くなるに従い、歪んだbcc構造に変化することが直接判明した。ナノ構造体の構造解析法として期待される。

研究課題：高機能ナノ立体構造デバイス・プロセス

研究代表者：松井真二

- (1) T.Hoshino, K. Watanabe, R. Kometani, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai and S. Matsui

"Development of three-dimensional pattern-generating system for focused-ion-beam chemical-vapor deposition"

JVST.B21(6), 2732-2736, 2003

FIB-CVD による自由にデザインされる 3 次元 (3D) 構造の形成について調べた。1 × 10⁻⁴ Pa のフェナントレン雰囲気中で、30 keV の Ga⁺ イオンビームを走査することにより 3D 構造を形成した。イオンビームの走査信号は、コンピュータ・パターン発生システムを使用した 3D の CAD モデルにより作られた。この 3D パターン発生システムは、適切なパラメータ (例えば、ピッチ、時間、照射停止時間、描画位置優先性など) を設定することにより、オーバーハングや中空の構造を形成できる。ここでは、1 億分の 1 スケールのエンタープライズ宇宙船のモデル、マイクロリング、蛾の眼、200nm 間隔のモルフォ蝶構造などを作成することにより、3D パターン描画システムの性能を紹介する。

- (2) T.Morita, R. Kometani, K. Watanabe, K. Kanda, T. Hoshino, K. Kondo, T. Kaito, T. Ichihashi, J Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai, T. Tajima and S. Matsui

"Free-space-wiring fabrication in nano-space by focused-ion-beam chemical vapor deposition",

JVST.B21(6), 2737-2741, 2003

集束イオンビーム CVD (FIB-CVD) は 3 次元のナノ構造を作るのに優れた技術である。電子ビーム (EB) リソグラフィ用のコンピュータ制御パターン発生装置を用いて、種々のダイヤモンドライクカーボン (DLC) の空中配線を作成した。DLC 空中配線の組成と結晶構造を、TEM とエネルギー分散型 X 線分光で調べた。その結果、DLC 空中配線は芯部に Ga が存在している非晶質の炭素であることが分かった。さらに、2 端子法で DLC 空中配線の電気抵抗を測定した。金電極は EB リソグラフィとリフトオフ法で作成した。電気抵抗は室温で 100 Ω cm であった。

- (3) T.Ichihashi, J. Fujita, M. Ishida and Y. Ochiai

"In-situ Observation of Carbon-Nanopillar Tubulization Caused Liquidlike Particles"

PHYSICAL REVIEW LETTERS. Vol.92, No.21. 215702-1~215702-4, 2004

アモルファスカーボン・ナノピラーが、鉄微粒子の存在下で、650~900°C の熱処理により、グラファイトチューブに変わる過程を TEM (透過電子顕微鏡) によりその場観察した。アモルファスカーボン・ナノピラーの中に入り込んだ熔融した鉄微粒子は、ミミズのようにな型を変えながらピラー中を移動する。その際、前方のカーボンを溶かし、後方にグラファイトを排出し、ピラーをチューブ化する。チューブ化は solid-(quasiliquid)-solid メカニズムで起きており、液相化した金属-カーボン合金の微粒子が触媒となるアモルファスカーボンの一種の液相グラファイト化であると結論付けられる。

○平成 15 年度採択

研究課題：カーボンナノチューブ形成過程その場観察と特性制御への展開

研究代表者：本間芳和

- (1) Suzuki, D. Takagi, Y. Homma, Y. Kobayashi

"Selective removal of carbon nanotubes utilizing low-acceleration-voltage electron irradiation damage"

Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) L133 (Exp. Lett.)

単層カーボンナノチューブを配線素子として応用する場合には、ネットワーク的に接続して成長させた単層カーボンナノチューブを所望の箇所で切断することが必要になる。本論文では、簡便な単層カーボンナノチューブの空間的選択性除去の方法を示す。この

方法は、低加速の電子照射損傷に基づくものであり、局所的な電子線照射を行った後、空气中で熱処理することにより、電子線を照射した単層カーボンナノチューブを選択的に除去できる。低加速電子による照射損傷は価電子の励起の結果として起きているものと思われる。

(2) J. Kikkawa, Y. Ohno and S. Takeda

“Growth rate of silicon nanowires”

Appl. Phys. Lett. 86, 123109 (2005)

ナノワイヤの成長制御の実現にはナノ触媒の作用を解明することが必要である。本論文では気相・液相・固相(VLS)機構で 365~495℃で成長させたシリコンナノワイヤ(SiNW)の成長速度の測定から、触媒作用を解析した。金を触媒とし、気相原料にモノシラン(SiH₄)を使用し、SiNW を成長した。SiNW の TEM 観察により、直径の小さい SiNW は直径の大きい SiNW よりも成長速度が遅く、成長が完全に止まるクリティカルな直径があることが分かった。このクリティカルな直径は 2nm 程度であると思われる。さらに、SiNW の成長速度の温度依存性を評価した結果、SiNW の成長の活性化エネルギーは 230kJ/mol であると思われる。

(3) D. Takagi, Y. Homma, S. Suzuki and Y. Kobayashi,

“Vertical growth of individual single-walled carbon nanotubes on silicon and SiO₂ substrates”

Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) 1564

単層カーボンナノチューブ(SWNT)の応用には、様々な形態の SWNT を方向や長さを制御して成長する技術確立する必要がある。本研究では孤立した SWNT を、メタンをガス原料とし Fe あるいは Co を触媒とした CVD 法により基板上に成長させることに成功した。成長温度が 900~1000℃の時、垂直成長が得られ、チューブの直径は 2~5nm であった。垂直成長した SWNT は数 10 から 300 nm と短く、これはフィールドエミッションやプローブ顕微鏡のチップとして有用である。基板上の垂直配向 SWNT に直接フラーレンを包み込むことができた。

3. 受賞等

受賞者名	賞の名称	授与者名	受賞日(時期)
森山悟士	第 17 回応用物理学会講演奨励賞	応用物理学会	2004 年 9 月
宍戸 厚	H16 年度高分子学会研究奨励賞	高分子学会	2004 年 9 月
鎌田香織	第 18 回応用物理学会講演奨励賞	応用物理学会	2005 年 4 月
渡辺一史	Best Poster Award	The 8 th IUMRS International Conference on Advanced Materials	2003 年 10 月
浜本和宏	MNC2003 Award for Young Author's Award	International Microprocesses and Nanotechnology Conference	2004 年 10 月
片岡恵太	Best Poster Award	ICMAT2005 and IUMRS-ICAM 2005	2005 年 7 月
大門 寛	NAIST 学術賞	奈良先端科学技術大学院大学	2004 年 3 月
松井文彦	Best Poster Award	アジア太平洋表面界面分析会議	
渡辺啓一郎他	第 7 回ロレアル色の科学と芸術賞	ロレアル・アーツ・アンド・サイエンス・ファンデーション	2004 年 10 月
高木大輔	ALC '05 Student Award	5 th International Symposium on Atomic Level Characterizations for Materials and Devices	2005 年 12 月

平成 17 年 11 月 30 日現在

4. シンポジウム等

シンポジウム名	日時	場所	入場者数	特記事項
領域合同会議	H15/2/5	千里 LC ビル	30 名	
International Symposium on Functional Semiconductor Nanosystem	H15/11/12-14	NTT 厚木 R&D センター	150 名	
領域合同会議	H15/12/25	千里 LC ビル	30 名	
オンラインミーティング(石橋チーム)	H16/3/2	理化学研究所	30 名	
オンラインミーティング(彌田チーム)	H16/3/10	東京工業大学	50 名	
オンラインミーティング(松井、木下チーム)	H16/4/9	兵庫県立大学	50 名	
オンラインミーティング(大門チーム)	H16/7/28	奈良先端科学技術大学院大学	30 名	
オンラインミーティング(市川チーム)	H16/10/1	東京大学	30 名	
カーボンナノチューブ合同研究会	H16/10/5-6	ホテル聚楽 (伊東)	50 名	
領域合同会議	H16/12/18	千里 LC ビル	40 名	
オンラインミーティング(彌田チーム)	H17/3/8	東京工業大学	50 名	
オンラインミーティング(松井チーム)	H17/5/17	物質・材料研究機構	30 名	
オンラインミーティング(本間チーム)	H17/6/23	東京理科大学	40 名	

平成 17 年 12 月 28 日現在

5. その他の重要事項 (新聞・雑誌・テレビ等)

石橋チーム

○ CNT 単電子インバータ

- ・ nanotechweb.org (英国) Web 掲載、日経ナノテクノロジー (Web 掲載) 2003 年 5 月
- ・ Observatoire des Micro et NanoTechnologie, Veille Strategique, Electronique Moleculaire, Numero13 2003 年 7 月 (フランス)
- ・ 化学工業日報 2004 年 3 月 (火曜日)

○ CNT 人工原子

- ・ 毎日新聞、日経産業新聞、科学新聞、他 4 紙 2005 年 5 月
- ・ 日経 BYTE (日経 BP 社) 2005 年 7 月号

市川チーム

○ 「球状の単結晶ナノドットを形成」 日経先端技術 2004 年 10 月

彌田チーム

- 「高分子の形自在に 分子レベルの部品組み合わせ」日刊工業新聞 2003 年 9 月
- 「ブロック共重合体の自己組織化を利用し、ナノ相分離構造テンプレートを作製」週刊ナノテク 2005/年 2 月
- 「ナノ円筒が並ぶコーティング薄膜を開発 高密度記録媒体製造用の鋳型として期待」日経ナノビジネス No19 2005/08/08
- 「親水性ナノシリンドラー構造体への微粒子選択ドーピングで新しいナノ構造材料群を作

製」日経ナノテクノロジー 2005 年 5 月

木下チーム

- EUV リソグラフィマスク検査装置開発
・日経産業他 4 紙、日系ナノビジネス 2005 年 6 月

大門チーム

- 「大門研究室の紹介」 テレビ大阪 2004 年 2 月 22 日
- 「光電子分光法によるホールサブバンドの面内分散の可視化」
・NHK・U(ニュースなら 610) 2005 年 1 月
・毎日新聞、読売新聞、他 2 紙 2005 年 1 月

松井チーム

- 「EB-CVD による 5nm 立体構造形成」日経新聞 2003 年 5 月
- 「三次元ナノ配線」日刊工業新聞 2003 年 8 月
- 「三次元ナノピンセット」読売新聞 2003 年 12 月
- 「モルフォ蝶ブルーの原理説明」日刊工業新聞 2004 年 9 月
- 「ナノテクで構造色説明」読売新聞 2004 年 12 月
- 「バイオツール開発」神戸新聞 2005 年 1 月
- 「超微細 3 次元構造体で新デバイスの未来を拓く」週刊ナノテク 2003 年 12 月
- 「3 次元ナノ構造物の CAD/CAM を完成 解像度 10nm、立体の形成自在に NEMS システムで実用化目指す」日経先端技術 2003 年 12 月
- 「南米のモルフォチョウの「青色」を再現 FIB 技術で立体ナノ構造試作 衣類、塗装など広範に応用可能」日経先端技術 2004 年 5 月
- 「ナノテクを拓いた微細加工技術」大人の科学 Vol.05 2004 年 8 月
- 「LASF、第 7 回「ロレアル 色の科学と芸術賞」受賞者を発表 金賞は松井真二教授ら 阪大・兵庫県立大チームに」週刊ナノテク 2004 年 10 月
- 「立体ナノ形成技術とその応用」SEMI News 2004 年 11 月
- 「モルフォ蝶の不思議な青色を再現する」日経サイエンス 2005 年 1 月
- 「三次元ナノテクノロジーが再現したモルフォ蝶の輝き」バイオニクス 2005 年 4 月
- 「ナノテクノロジー加工分野の動向」光アライアンス 2005 年 5 月
- 「集束イオンビームによる立体ナノ構造形成技術とその応用」表面技術 2005 年 7 月

本間チーム

- 「プロジェクトナノチューブ 電子素子 導電性は銅線の一千倍に」朝日新聞 2004 年 1 月
- 「カーボンナノチューブ成長過程その場で観察 阪大 透過型顕微鏡開発へ」
日刊工業新聞 2004 年 9 月
- 「電子線で容易に切断 NTT LSI 向け配線技術」日経産業新聞 2005 年 2 月

6. その他の添付資料

なし。

7. 中間評価結果

平成 14 年度採択 17 年度中間評価結果

1-1. 研究課題名：カーボンナノ材料を用いた量子ナノデバイスプロセスの開発

1-2. 研究代表者名：石橋 幸治 理化学研究所 石橋極微デバイス工学研究室 主任研究員

1-3. 研究概要

本研究は、新機能ナノデバイスの基本構造として量子ドットに注目し、カーボンナノチューブ (CNT) を用いたデバイス機能の実証およびデバイスプロセスの開発を目指している。これまでに、離散準位の観測、電子殻構造の観測、ゼーマン分裂の観測、2電子間相互作用など、世界で初めて明確な人工原子的振る舞いの直接観測に成功した。さらに CNT を用いた単電子トランジスタ、単電子インバータ、単電子 XOR(排他的論理和演算) デバイスを作製しその動作を実証した。また、CNT と GaAs/AlGaAs のハイブリッド化を初めて提案し、新しいデバイス応用の可能性を示した。

1-4. 中間評価結果

1-4-1. 研究進捗状況と今後の見込

本研究チームは、デバイスプロセスの開発と機能の実証を目指す理化学研究所と、デバイス開発に必要なナノカーボン材料の成長技術の開発を目指す、共同研究グループである長岡技術科学大学、東京工業大学の3グループから構成されている。CNT を用いた人工原子の1電子準位のゼーマン分裂の観測はスピン量子ビットの実現に結びつく成果であり、さらには、各種の単電子デバイスやテラヘルツ検出器の提案と実証をするなど、全体的には、計画通りあるいはそれ以上の進歩が見られる。しかし、共同研究グループのカーボンナノチューブの配列制御およびフラーレン電子重合によるナノカーボン創製などについては、一層の努力と工夫が望まれる。

今後は、単電子デバイスの室温動作に向けて一層の努力と、共同研究グループとの連携強化により、当初の目標を達成できることを期待する。

1-4-2. 研究成果の現状と今後の見込

CNT 人工原子の挙動の実証、CNT による明瞭な単電子デバイスやテラヘルツ検出器の実証は注目すべき科学的成果といえる。これらは優れた1次元物質としての CNT の特徴をよく生かした成果である。

今後は、スピン制御、テラヘルツ波領域の超高感度電磁波検出器への応用に向けたデバイス機能の探索、実証と CNT 成長プロセスの制御性向上、CNT 単電子デバイスの高温動作達成などの技術の確立に期待する。

1-4-3. 今後の研究に向けて

CNT の人工原子的振る舞いや CNT 量子ドットによるテラヘルツ波の観測などは CNT 成長技術の改良によって実現したものである。今後、本間チームとのさらに一層の協力関係を進めることにより、CNT 成長プロセスの制御技術を進展させ、量子ビット素子、単電子素子の機能実証が進展することを期待する。CNT 単電子デバイスの高温動作を妨げている原因がトンネル障壁低さであることを解明したので、電極材料の探索を進め、実用化に必要な高温動作を達成することを期待する。

1-4-4. 戦略目標に向けての展望

基礎研究として優れた科学的成果が出ており、ゼーマン分裂の観測、テラヘルツ波の検出などナノデバイスとしての CNT の可能性に期待を持たせる結果が出始めている。戦略目標達成のためには、CNT 成長プロセスの制御性向上や CNT 単電子デバイスの高温動作など実用に向けての壁をブレイクスルーする事が重要である。

1-4-5. 総合評価

ナノデバイス作製に必要な高品質 CNT の成長技術の探索、SET デバイスの回路、機能の実証と、量子デバイスの提案とデバイス原理の探索という3つの課題について研究しており、それぞれに期待できる成果を得ている。スピン量子ビット、テラヘルツ検出などの量子ナノデバイスの機能の実証がさらに進むことを期待する。共同研究グループについては今後、インパクトのある成果が出るような進め方を工夫することが重要であると思われる。また、CNT 成長プロセスの制御性向上については、本間チームとの一層の協力関係を進めることが重要であると思われる。

2-1. 研究課題名：超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術

2-2. 研究代表者名：市川 昌和 東京大学 大学院工学系研究科 教授

2-3. 研究概要

本研究では、研究代表者が見出した極薄 Si 酸化膜を用いたナノドット形成技術を基礎にして、Si 光素子実現のための材料プロセス技術の開発とそれに必要なナノ構造材料の物性評価技術の開発を目的としている。これまでに、(1)Ge ナノドット超格子の作成とフォトルミネッセンス(PL)スペクトルの測定、(2)鉄シリサイド(FeSi_2)のナノドットの積層構造の作成と PL スペクトルの測定、(3)Ge ナノドットの走査トンネル顕微鏡(STM)による操作、(4)個々の Ge ナノドットの電子状態の走査トンネル分光法(STS)、光電子分光法と、STM-光吸収分光法による測定 (5)Ge ナノドット間の伝導特性の測定、(6)断面透過電子顕微鏡(TEM)によるナノドット結晶構造の観察、走査透過電子顕微鏡(STEM)による Si 薄膜中の Ge ナノドットの観察と、TEM による Ge ナノドット成長過程のその場観察、を行った。

2-4. 中間評価結果

2-4-1. 研究進捗状況と今後の見込

本研究チームは、ナノドット形成技術と、評価技術を担当する東京大学(3グループ)と名古屋大学の計4グループで構成されている。Ge および FeSi_2 ナノドットの形成と、フォトルミネッセンス(PL)評価、および、ナノドットの光・電子物性、伝導特性、結晶構造や原子スケールでの成長過程などの評価・観測は、当初の計画通り進んでいる。

Ge ドットについては、ドット1個の測定によって量子サイズ効果が現れることを確認し、さらに急速熱アニール法により、ナノドット構造を乱すことなく欠陥を除去し、PL 強度を大きく改善できることを見つかるなど、今後に期待できる成果を得ている。 FeSi_2 については、歪み緩和することなしにドット成長することを確認している。今後、チーム内の連携をさらに強化して当初の目標のエレクトロルミネッセンス(EL)発光を実現することを期待する。

2-4-2. 研究成果の現状と今後の見込

Ge ナノドット形成技術と、強い PL と量子サイズ効果の観測や、STS による物性評価、STM-光吸収分光法の開発、ナノメートルスケールの伝導特性の測定、STEM 解析法の高度化などの評価技術は高いレベルの成果が出ている。これまで行われていたストランスキー・クラスタノフ(SK)成長法では得られなかった 2nm の微細ナノドットを形成し、バンドギャップのサイズ依存性を観測して量子サイズ効果を確認したこと、また、歪み緩和することなしに FeSi_2 ナノドットを成長できたことは発光材料の開発に向けて、今後に期待できる成果である。

ナノドットの物性評価結果をナノドット形成にフィードバックすることにより、さらに高品質のナノドットと、EL 発光の実現が期待できる。

2-4-3. 今後の研究に向けて

評価技術関連では、準備段階をクリアしており、STM プローブを駆使したナノ構造素子の光・電子物性、構造評価技術として新規な成果が期待できる。その評価技術による成果をナノドット形成技術の最適化に反映するとともに、現在改善を進めているアニール法などとも組み合わせて、ナノドットの特性向上が見込め、EL 発光も可能と思われる。

2-4-4. 戦略目標に向けての展望

従来の SK 成長法で得られる 20nm 径よりも遙かに小さく、かつ高密度($>10^{12}/\text{cm}^2$)の Ge ナノドット形成を実現しており、今後 Si 系ナノドット発光素子の実現できれば、Si 電子素子と Si 発光素子を融合したシリコンフォトニクスへの展望が開け、インパクトは大きい。また、ナノドット特有の新規な物性、用途の発現も期待される。

2-4-5. 総合評価

微細、高密度ナノドット超格子の形成技術と STM や TEM/STEM を用いたナノドットの光、電子物性および原子スケールの構造、界面評価技術に関する研究は高い水準にある。また、発光強度の改善の見込みも得ており、今後のドット形成実験加速による EL 発光の早期実現を期待している。

ナノドットの物性について新たな知見が得られており、今後、シリコンフォトニクス分野に貢献できる技術的な展開に期待する。

3-1. 研究課題名：高信頼性ナノ相分離構造テンプレートの創製

3-2. 研究代表者名：彌田 智一 東京工業大学 資源化学研究所 教授

3-3. 研究概要

本研究は、トップダウンの超微細加工技術では実現困難であるデカナノ（ $\sim 10^1\text{nm}$ ）領域の構造を機能分子から自在に形作る材料作製プロセスを開発することを目的としている。そのため、精密重合によって得られる多機能型両親媒性ブロック共重合体の自己組織化（ミクロ相分離）によって、デカナノメートルスケール（ $10\text{-}50\text{nm}$ ）の親水性ナノシリンドラードメインの六方格子配列の形成と薄膜内垂直配向を実現し、これを構造制御性と大面積製膜性に優れたナノテンプレート薄膜として各種材料への転写および複合化プロセスの開発を進めている。

3-4. 中間評価結果

3-4-1. 研究進捗状況と今後の見込

本研究チームは、東京工業大学（2 グループ）、首都大学東京、高知大学の計 4 グループで構成されている。各共同研究グループのミッションの明確化と連携など、チームとして最大のアウトプットを出すような配慮がなされている。再現性よく配向制御されたナノシリンドラードメイン構造を大面積基板上に製膜するプロセスを確立し、ナノシリンドラードメインの応用開拓に関しても、独自のアイデアを持って取り組んでおり、当初の計画通り進捗している。ナノシリンドラードメインの高い規則性、大面積化、データベースの豊富さなど、特に工学的視点から世界的にも進んだ成果をあげている。

今後、この計画に沿って研究を進めることにより、当初の目標を達成できるものと期待される。

3-4-2. 研究成果の現状と今後の見込

ナノテンプレート膜の材料合成から始まり、大面積化と製造プロセスの構築による試供品の供給の実現、多数の材料の組み合わせに対する物性データの取得とライブラリーの作成、多機能性薄膜への展開、など質、量ともに優れた成果が出ている。

今後、産業界との連携を図ることにより、応用展開が加速されることが期待される。

3-4-3. 今後の研究に向けて

ナノテンプレートの試供品供給により、さまざまな応用に出口が見出されることが期待でき、相乗作用による本研究の拡大が見込まれる。また、機能性薄膜としても多様な展開と発見が期待できる。

今後、配向過程をその場観察し、配向の分子論的形成メカニズムを解明して、高信頼性ナノ規則構造を与える高分子設計の指導原理を得ることを期待している。

3-4-4. 戦略目標に向けての展望

高分子系でのナノ材料は、Si-LSI の層間膜などにも応用されている。その他にもいろいろな用途があると思われ、ナノ材料として最も成功する分野となる可能性がある。大面積において、垂直配向を実現したことは世界にも例のないもので、自己組織化による高信頼、大規模ナノプロセスの実用化に向けて期待できる成果である。

3-4-5. 総合評価

自己形成ナノ構造を大面積化することに成功しており、産業的規模の自己形成法の有用性を示

したところが評価できる。配向過程のその場観察などの基礎的研究を通して、サイズの制御幅の拡大並びに基板の選択による孔の貫通の可能性等、将来の発展を期待したい。新材料創製・量産化技術開発は当初の計画を上回るスピードで進んでいる。コストやスループットの点で実用的なナノテクノロジーを構築しようとしており、具体的応用の開拓が大いに期待される。

4-1. 研究課題名：超高速・超並列ナノメカニクス

4-2. 研究代表者名：川勝 英樹 東京大学 生産技術研究所 教授

4-3. 研究概要

走査型力顕微鏡の高分解能化、高感度化、ならびに、走査型力顕微鏡を用いた原子レベルの質量検出のために必要な振動検出方法として、ヘテロダインレーザドップラー速度検出を提案した。これにより、カンチレバーのサブオングストロームオーダーの振幅を用いた原子分解能の取得、原子分解能ラテラル力顕微法、カンチレバーの 200MHz までのドップラー検出が可能となった。従来の 1/100 から 1/10 振幅による原子レベルの場の計測が可能になり、原子レベルの短距離力の作用範囲内での微分計測が実現された。また、サブ $\text{fm}/\sqrt{\text{Hz}}$ のノイズレベル、200MHz までの検出帯域の達成により、超高速撮像や、微小質量検出の可能性を示した。

4-4. 中間評価結果

4-4-1. 研究進捗状況と今後の見込

本研究チームは、東大生研の川勝教授のグループのみで構成され、同教授の指導の元で、レーザドップラー計に焦点を絞り、要素技術毎にサブグループを形成して丹念な研究を行っており、一言で言えば AFM(原子間力顕微鏡)の機能向上という絞った課題を推進するのに適当なチーム構成である。

AFM の検出分解能向上と測定的高速化を達成するなど、ほぼ当初の計画通り進捗している。今後、超高真空 TEM-AFM を活用した微小質量物質の検出、液中での検出などの研究が計画通りに進展することを期待する。

4-4-2. 研究成果の現状と今後の見込

ヘテロダインレーザドップラー速度検出法により、従来の 1/100 から 1/10 の振幅による原子レベルの場の計測を可能にし、原子レベルの短距離力の作用範囲内での微分計測を実現し、マルチカンチレバーによる超並列計測を実現するなど、AFM の検出分解能向上と測定的高速化については、定量的な力分布の計測を可能にする真の力顕微鏡として国際的に評価される非常に高い成果が出ている。海外からの測定依頼があることも、国際的に評価されていることを示す一例である。

装置メーカーへの技術供与なども進行しており、今後、目標に向けて研究が進めば、AFM 測定技術としてのインパクトと同時に科学的インパクトも期待できる。

4-4-3. 今後の研究に向けて

本研究はナノテクとして重要な研究テーマであり、また、期待に応える成果が出ていると評価する。AFM の限界に挑戦している研究姿勢およびこれまでの実績から判断して、今後、超高真空 TEM-AFM を活用した微小質量物質の検出、液中での検出などの研究が計画通りに進展することが期待できよう。装置メーカーへの技術供与など製品化の努力をさらに拡大することにより、ナノテク材料の開発に貢献できると期待する。

4-4-4. 戦略目標に向けての展望

評価技術関係分野は、ナノテクの共通基盤となるインパクトの大きい分野である。この分野において独自技術を開発することは我が国のナノテクの独自性、リーダーシップの確立にとって必須である。AFM に関する本研究はその可能性を示す有望な研究の一つである。戦略目標である(実用に耐える)『システムの実現』に向けて多くの成果が出ることが期待できる。

4-4-5. 総合評価

本研究はナノテクとして重要な研究テーマであり、また、期待に応える極限 AFM の探求などの優れた成果が挙げっていると評価する。計画通りに研究を進めると共に、装置メーカーへの技術供与など製品化への努力を行うことにより、ナノテク材料の重要な分析技術の一つとしての今後の普及が期待される。

5-1. 研究課題名：位相差極端紫外光顕微鏡による機能性材料表面観察・計測技術

5-2. 研究代表者名：木下 博雄 兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 教授

5-3. 研究概要

本研究は、2009年までに次世代リソグラフィ技術である極端紫外線露光法を実用化するために、多層膜が形成されたマスク上の欠陥像を露光光と同一の EUV(極端紫外)光で直接観察し、サブナノメートル (0.03 nm) の微細な表面界面の 3 次元像の形成を実現させることを目的としている。これまでに高精度観察性能をもつ極端紫外光顕微鏡を開発し、EUVL(極端紫外光リソグラフィ)用実マスクの観察、ならびに、ガラス基板上に設けた凹凸パタンに多層膜を形成したマスクブランクス上の欠陥(位相欠陥)の観察に成功した。実マスクの検出分解能は 50 nm、位相欠陥は高さ 5nm、幅 90nm まで確認した。本装置は、単に欠陥による散乱を計測するものではなく、欠陥像の観察を目指しており、新しい X 線顕微鏡としても期待できるものである。

5-4. 中間評価結果

5-4-1. 研究進捗状況と今後の見込

システム構築に要求される要素技術の開発と性能評価、顕微鏡システムの構築と初期性能評価などは、ほぼ当初の計画通り進捗している。また、企業との共同研究体制は、本テーマのように、ロードマップに基づいた実用化研究開発には不可欠であり、評価できる。

すでに、マスクブランクス上の欠陥(位相欠陥)の観察に成功しており、今後、心臓部であるビームスプリッターの改良、観察時間の短縮に注力すれば、当初の目標を達成できると期待できる。

5-4-2. 研究成果の現状と今後の見込

EUVL 用実マスクの観察、および、位相欠陥の観察に成功したことは評価される。欠陥検査装置の開発は国内外で複数行われているが、干渉を利用した計測技術を EUV 領域、さらに X 線領域にまで拡大し、欠陥像の観測を試みる研究はこれまで行われておらず独創的である。

今後、ビームスプリッターの改良、観察時間の短縮を実現することにより、実用化が期待でき、工業化まで到達できればさらに大きな成果となる。

5-4-3. 今後の研究に向けて

EUVL 用マスクの検査だけでなく、EUV 顕微鏡としての他分野への応用、あるいは異なる波長での顕微鏡への展開などの探索研究を行うことにより、さらに研究の広がりや用途の拡大が期待できる。

5-4-4. 戦略目標に向けての展望

世界的に最も研究投資が行われているナノデバイス分野は実は Si-LSI であると思われるが、本研究は、ナノ Si-LSI 分野において世界的な寄与が見込める貴重な研究であり、良い成果を期待したい。

5-4-5. 総合評価

研究努力の積み重ねにより、EUV マスク検査機のプロトタイプが徐々にその具体的な形をみせてきていると評価する。装置性能としては、今後、分解能と検出スピードの向上を図ることが重要である。また、EUV 顕微鏡としての他分野への応用検討を行うことにより、研究の広がりや応用分野が拡大すると期待される。

6-1. 研究課題名：ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡の開発

6-2. 研究代表者名：大門 寛 奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 教授

6-3. 研究概要

ナノサイズ物質の原子配列構造を立体的に解析できる顕微鏡を開発するため、「立体原子顕微鏡」の技術確立し、より簡便に測定できる小型で高性能の分析器を製作するとともに、低倍率での顕微鏡像も得られる顕微鏡機能システムの基礎的な開発を進めることが目的である。これまでに、多くの物質の立体写真像を撮影することにより理解が進み、明瞭な像を撮る装置改良にも成功し、「立体原子顕微鏡」の技術は着実に確立しつつある。簡便に測定できる小型で高性能の分析器は製作がほぼ終了し、性能テストと不具合のチェック段階に入っている。顕微鏡機能システムの基礎的な開発として、広角対物レンズを発明し、試作を進めている。これに関して特許申請を行い、外国企業と実施準備契約を結ぶなど、反響の大きい成果である。このレンズの性能評価と並行してレンズシステムと全体の「ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡」の製作を進めている。

6-4. 中間評価結果

6-4-1. 研究進捗状況と今後の見込

SPRING-8 に設置の立体顕微鏡により種々の試料の観察、性能検証を行った。2次元表示型球面鏡分析器を改良し、多くの人にとって使いやすいものにするを旨とした小型分析器については設計・製作を進めた。また、比較的低い倍率で試料表面を観察し、立体原子像の見たいところを選べるようにする顕微鏡機能システムの開発を進めるなど、当初の計画通りに進捗している。

今後、さらに多くの物質の観察が行われ、小型分析器を組み込んだコンパクト立体顕微鏡が、高い性能を実現する事を期待する。

6-4-2. 研究成果の現状と今後の見込

グラファイト、Si、Cu、TiS₂などの単結晶、Si上のFeシリサイド、Cu上のFeやNi薄膜、さらに薄膜中の不純物としてBドーパ超伝導ダイヤモンド中のBについても観察するなど、立体顕微鏡の有用性に期待が持てる状況になった。また、装置開発の観点からは、小型分析器、新メッシュ、広角対物レンズ、超小型電子線源などの新開発が注目される。この広角対物レンズについては、外国企業と実施準備契約を結ぶなどの成果が出ている。

今後、計画通りに研究を進めれば、当初の目標を達成できるものと期待される。

6-4-3. 今後の研究に向けて

立体原子顕微鏡でなければ観察できない物質(例えば、準結晶など)の観察や、立体顕微鏡を利用することにより初めて明らかになる現象などの観察例を蓄積し、使いやすくするための分析器の小型化や顕微鏡機能システムの開発を進め、この技術の有用性を実証することにより、分析方法としての今後の普及が期待される。

6-4-4. 戦略目標に向けての展望

本研究では、ナノデバイス・材料に対する独創性の高い評価技術の開発が進められている。小型分析器や電子線励起のオージェ電子の2次元角度分布を用いた立体構造のマッピングが行えるようになると、一般の実験室でも使えるような実用的分析技術になると期待される。

6-4-5. 総合評価

立体原子顕微鏡そのものが世界的にもオリジナリティの高い技術である。様々な物質の観察実験により、立体顕微鏡の機能検証は進んでいる。また、立体原子顕微鏡の改良や小型機の設計・製作においても随所にオリジナルなところが見受けられ、順調に進んでおり、内容も着実な進歩をしていると評価される。今後のさらなる進展を期待したい。顕微鏡機能システムの基礎的な開発には困難な課題もあるが、要素技術の波及効果は期待できる。

7-1. 研究課題名：高機能ナノ立体構造デバイス・プロセス

7-2. 研究代表者名：松井 真二 兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 教授

7-3. 研究概要

本研究課題は、集束イオン・電子ビーム励起反応堆積技術(FIB・EB-CVD)を用いて、ナノ立体構造形成プロセス技術の開発および「高機能ナノ立体構造電子・機械・光・バイオデバイス」の創製を目的としている。FIB-CVD ナノ立体構造描画システムのソフト・ハードを開発することにより、各種ナノ立体構造デバイス試作・特性評価を行った。さらに、FIB-CVD と MO-CVD(有機金属気相成長法)との複合装置を試作し、ナノ立体構造光デバイス創製を目的として、GaN ナノ構造体を作製し、その光学的評価を行った。ナノ立体構造基礎物性研究として、FIB/EB-CVD により形成されたナノ立体構造体のヤング率等の基礎物性評価を行った。また、基礎物性探索研究において、カーボンナノ構造体固相反応からカーボンナノチューブの成長メカニズム解明に関わる現象を見出した。

7-4. 中間評価結果

7-4-1. 研究進捗状況と今後の見込

本チームは、兵庫県立大学、物質・材料研究機構、NEC、筑波大学の計4グループで構成されている。当初計画に沿った研究が行われた結果、空中配線技術、微小エミッター、静電アクチュエータ、バイオナノインジェクター等のナノ立体構造デバイス試作・特性評価を行ったことは評価できる。

今後、応用展開のターゲットを明確にした研究計画に見直し、それに向かって研究を進めた方が良いように思われる。

7-4-2. 研究成果の現状と今後の見込

興味深いナノ構造体を多数試作し、そのどれもが興味深い動作をするという点で科学技術の理解増進には大きな貢献をすると思われ、技術的にはナノ立体構造を自在に創製できる技術として評価される。また、鉄微粒子によるナノチューブ成長の現象を見出したことは、科学的に興味深い成果といえる。

今後、FIB/EB-CVD プロセスの科学的アプローチと、応用展開のターゲットに向けて研究を進めることにより、多くの成果が生まれることを期待する。

7-4-3. 今後の研究に向けて

FIB を用いた研究は、ナノファクトリとしての魅力感が高い。プロセスの科学的アプローチにより、ナノ立体構造の高機能化をさらに進め、ナノバイオツールなどのターゲットを明確にすることにより、その展開に期待する。バイオグループとの連携などによるナノ立体構造デバイスの有用性が立証されることを期待する。

7-4-4. 戦略目標に向けての展望

応用展開のターゲットを明確にし、そのために必要な共同研究グループとの連携を図ることにより、新たな展開が開けると期待する。

7-4-5. 総合評価

各種ナノ立体構造デバイスの成果はビジュアルには興味深くインパクトがある。応用のターゲットを明確にし、それに向かった諸問題を解決する手法を期待したい。また GaN のナノピラーの研究は、競合技術の進展もあり、本方法でやる必然性が薄いので、見直した方が良いと思われる。

平成15年度採択17年度中間評価結果

8-1. 研究課題名：カーボンナノチューブ形成過程その場観察と物性制御への展開

8-2. 研究代表者名：本間 芳和 東京理科大学 理学部 教授

8-3. 研究概要

カーボンナノチューブ(CNT)の成長過程を原子スケールでその場観察し、その結果を CNT 形成技術に反映し、CNT の成長・物性などを制御することを主な目的としている。これまでに、環境制御型走査電子顕微鏡(SEM)を開発し、触媒微細構造間に単層 CNT が架橋成長する様子を捉え、CNT が架橋構造やバンドル(束)を形成する過程をはじめて明らかにした。また、単一の単層 CNT の架橋構造を実現して、ラマン分光およびフォトルミネッセンス(PL)測定を用いて単一の単層 CNT の物性測定を可能にした。さらに単一の単層 CNT の垂直成長も実現した。

8-4. 中間評価結果

8-4-1. 研究進捗状況と今後の見込

本チームは、電子顕微鏡観察、成長、物性評価およびデバイス開発を専門とする、東京理科大学、NTT、大阪大学、横浜国立大学、NRC(カナダ National Research Council) の5グループで構成されている。また、他のチームとは異なり、平成15年度に発足している。

これまでに、環境制御型 SEM による CNT の成長過程の観察、および単一の単層 CNT を何ら表面処理をすることなしにラマン分光および PL 測定を可能にするなど、ほぼ当初の研究計画どおり進捗している。今後、計画通りに環境制御型 TEM、SPM を導入し、原子スケールでのその場成長過程を観測することにより成長過程の解明と制御に関する研究の進展が期待される。

8-4-2. 研究成果の現状と今後の見込

単層 CNT が架橋構造やバンドルを形成する過程の環境制御型 SEM による観察、孤立した垂直配向単層 CNT の実現、単一の単層 CNT のラマン分光・PL 測定など、世界に先駆けた成果を出している。

今後、環境制御型 TEM、SPM の導入と、ラマン分光によるその場観察・PL 評価などの成果を CNT 成長制御に融合できれば、特性の揃った CNT ネットワークの形成など大きな成果が期待される。

8-4-3. 今後の研究に向けて

これまでチーム内での連携はなされているが、非常にチャレンジングな課題であり、優れた個々の技術と成果の融合を目標達成に向けてさらに進めれば、一層インパクトのある成果につながることが期待できる。また他チーム、特に石橋チームとの研究協力は、互いの研究の進展のために望まれるものである。

8-4-4. 戦略目標に向けての展望

CNT デバイスが実用化されるための一つの大きなポイントは CNT の成長制御（物性の制御と成長位置の制御）であると思われる。世界中で多くの研究者が研究を行っているが、未だ確たる技術が確立されていない。その意味で、色々のその場観測技術を駆使して成長過程の解明を行う本研究チームに期待されるところは大きい。今後の大きな進展に期待する。

8-4-5. 総合評価

CNT 成長制御と成長過程のその場観察、架橋 CNT の物性評価と制御された CNT ネットワークの特長を探るデバイスへの応用まで、総体的に研究が良くオーガナイズされ、順調に成果を出している。本分野の研究をリードするチームと思われる。この調子で研究を進め、成長制御の可能性を明らかにして、架橋 CNT のナノエレクトロニクスやナノフォトニクス分野などへの応用につながることを期待する。