

<付属資料>

付属資料3 際立った研究成果例

北海道イノベーション創出ナノ加工・計測支援ネットワーク	
国立大学法人北海道大学	1
千歳科学技術大学	2
ナノテク融合技術支援センターによるイノベーション創出支援事業	
国立大学法人東北大学	3
NIMS ナノテクノロジー拠点	
(独) 物質・材料研究機構	4
東洋大学	5
ナノプロセッシング・パートナーシップ・プラットフォーム	
(独) 産業技術総合研究所	6
超微細リソグラフィー・ナノ計測拠点	
国立大学東京大学	7
電子ビームによるナノ構造造形・観察支援	
国立大学法人東京工業大学	8
早稲田大学カスタムナノ造形・デバイス評価支援事業	
学校法人早稲田大学	9
中部地区ナノテク総合支援：ナノ材料創生加工と先端機器分析	
大学共同利用機関法人自然科学研究機構分子科学研究所	10
国立大学法人名古屋大学	11
国立大学法人名古屋工業大学	12
学校法人トヨタ学園豊田工業大学	13
京都・先端ナノテク総合支援ネットワーク	
国立大学法人京都大学	14
国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学	15
国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学	16
阪大複合機能ナノファンダリ	
国立大学法人大阪大学	17
放射光を利用したナノ構造・機能の計測・解析	
(独) 日本原子力研究開発機構	18
(独) 物質・材料研究機構 (播磨)	19
立命館大学総合理工学研究機構SR センター	20
シリコンナノ加工と高品質真空利用技術に関する支援	
国立大学法人広島大学	21
国立大学法人山口大学	22
九州地区ナノテクノロジー拠点ネットワーク	
国立大学法人九州大学	23
九州シンクロトロン光研究センター	24
(財) 北九州産業学術推進機構	25
国立大学法人佐賀大学	26

テラヘルツ帯にプラズモン共鳴周波数を有する 金ナノスリットリング構造の光学特性

^aローム株式会社, ^b北大電子研, ^c静岡大学

麦野 遥一^a, 宮本 博徹^b, 上野 貢生^b, Vygantas Mizeikis^c,
村澤 尚樹^b, Saulius Juodkazis^b, 三澤 弘明^b

ナノネット事業で初めて可能になった成果

1. 超高精度電子線描装置による超微細加工(研究シーズとノウハウ)と民間企業のニーズから、新しい検出原理によるテラヘルツ光検出素子を開発した。
2. 従来は可視光領域での研究が中心であったプラズモニックデバイスをテラヘルツ領域へ拡張し、デバイス製造メーカーとの共同研究により実用化に直結する素子開発を短時間で推進した事例である。
3. ギャップ間隔を制御することにより、テラヘルツ光の検出周波数帯の選択と高感度化を同時に行える点は、他にはない非常に優れた特徴である。

【研究概要】

テラヘルツ光は、低侵襲かつ非破壊検査が可能であることから、医療診断や生体分析、或いは情報通信技術などへの応用が期待されている。本研究ではテラヘルツ帯域においてプラズモン共鳴周波数を有し、高い光電場増強効果を示す金ナノスリットリング構造の光学特性について検討を行った。

【特記すべき成果の詳細】

シリコン基板上に電子線リソグラフィ及びリフトオフにより、金ナノスリットリング構造(リング直径:100 nm, ギャップ幅:15 nm)を作製した(図1)。構造の共鳴スペクトルを測定したところ、50 THzと130 THzに二つのプラズモン共鳴バンドが観測された。(図2) シミュレーション結果からもこれらがギャップモードに由来する共鳴吸収であり、非常に大きな光電場増強を示すことが明らかとなった。

これらの結果から、テラヘルツ帯に高い電場増強を示す構造の設計指針を得ることができ、本研究で開発した素子は特定周波数のテラヘルツ光を捕集・信号増強することにより、従来技術よりも高感度かつ短時間でテラヘルツ光を検出することが期待される。

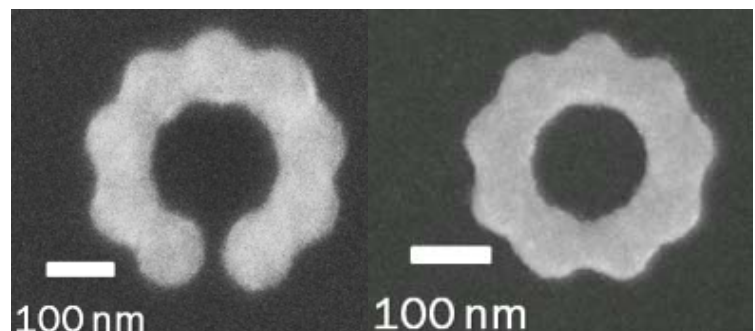


図1：金ナノスリットリング構造と金ナノリング構造の電子顕微鏡写真。超高精度電子ビーム描画装置を用いたリフトオフ技術により作製した。

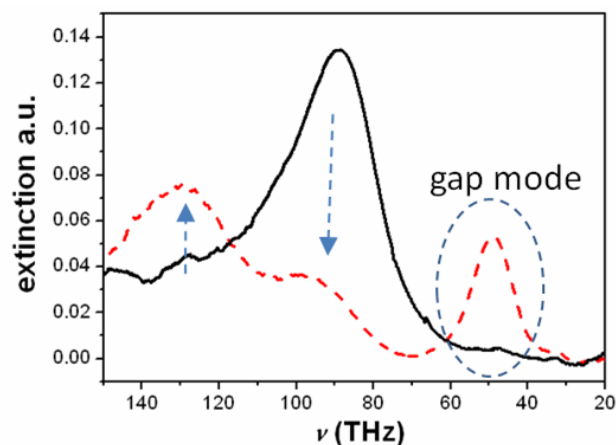


図2：金ナノスリットリング構造と金ナノリング構造の吸収スペクトル。金ナノスリットリング構造に設けたギャップに由来する新しい共鳴吸収が現れる。

ポリマーMEMSのモジュール化技術検討他

^aフォトニクスサイエンステクノロジー株式会社, ^b千歳科学技術大学
藤井 雄介^a, 川村 拓哉^b 小林 壮一^b

ナノネット事業で初めて可能になった成果

1. 微細加工設備を持たないベンチャー企業が、支援機関内の加工設備、分析設備を活用することで最先端のMEMS光スイッチを作製した。
2. 設備や加工ノウハウがなく開発することができないものであっても、材料の検討から加工条件の決定、動作確認などナノネット事業の支援を受けることでアイデアがあれば製品化まで行うことができることを示した事例である。
3. ベンチャー企業はその後、ナノネット事業を通じて提供された、ノウハウやその後の支援により、企業の主力製品である特殊光ファイバー製品群を開発するまでに成長した。

【研究概要】

従来のマイクロマシンで主に用いられているシリコンに代わり、線膨張係数の大きなポリマー材料を用いた独自のMEMS光スイッチを開発し、特殊V溝を接合するモジュール化の技術を確認することで最終製品化を目指した。

【特記すべき成果の詳細】

図1に最終製品化したMEMS光スイッチを示す。本件を含む一連の支援において駆動条件(図2)の他、露光条件、エッチング条件、電極形成条件を設定するための超微細加工支援とその条件を確認するためのナノ計測・分析支援を組み合わせることにより、市場製品と同等の性能を持つMEMS光スイッチを作製した。これは、ナノネット事業に代表される民主的かつ公平公正な支援事業を活用することにより、設備を持たない中小企業であっても、世界に通用する製品を生み出せることを示す成果である。



図1：作製したMEMS光スイッチ

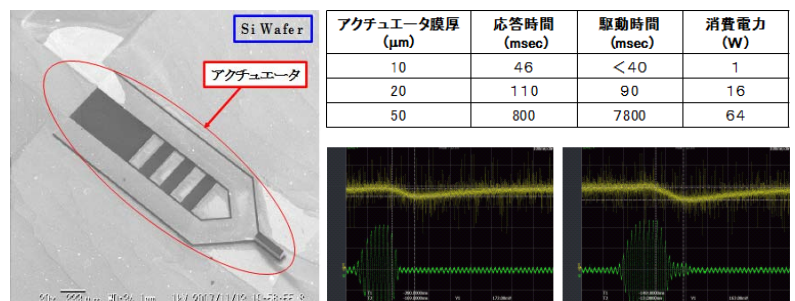


図2：MEMS光スイッチ駆動部(左)、アクチュエータの膜厚による駆動速度及び消費電力の変化(右)

燃料電池自動車用湿潤水素センサシステムの開発

ナノネット事業で初めて可能になった成果

超微細加工・分子合成領域融合研究

1. 超微細加工分野において産学連携の枠組みで開発している水素センサーに必要な市販の表面処理薬品の性能が充分ではないため、同センターの分子・物質合成分野で当該薬品を独自に合成し、良好な結果を得た。
2. 本事業に携わっている超微細加工分野と分子・物質合成分野の研究者の協力により、初めて実現した融合研究の成功事例である。

【研究概要】

燃料電池等に用いられている従来型水素センサには結露水滴により誤動作するという問題がある。これに対し、センサ表面に連続的な親／疎水性の傾斜組成膜を形成し、膜上に結露した水滴の両端の接触角の差異から生じる駆動力を利用して水滴を周囲へと排除する方法が田中准教授（超微細加工分野）によって考案された。ところが市販の薬品では十分な性能が得られなかったため、分子・物質合成分野において、親／疎水性を光によって制御可能なマラカイトグリーンカルビノールベース(1)を合成し当初の成果を得た。

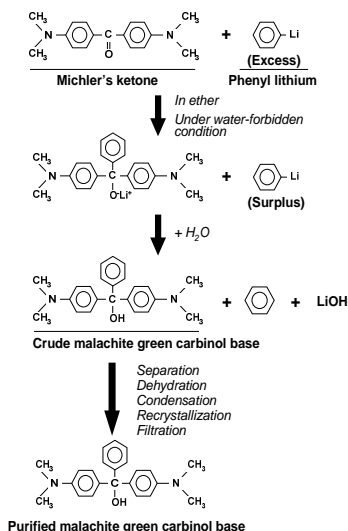


図1：親水基と疎水基を有する分子合成シーケンス。

希土類ナノ磁石の交換相互作用評価

ナノネット事業で初めて可能になった成果

極限環境(強磁場)分野

1. 極限環境分野において提供している電子スピン共鳴(ESR)を用いて分子磁石に用いられる希土類イオンの周囲の環境を明らかにし、磁氣的結合力を系統的に整理した。
2. 本事業により ESR装置が共用化されることにより、初めて可能となった研究成果事例である。

【研究概要】

電気通信大学石田グループと協力し、軽く強く極微量の磁石である、有機物—希土類—遷移金属の分子磁石における磁石の強さの鍵となる”磁気結合力”が希土類イオンを変えるとどう変わるかを系統的に明らかにした。(関連論文はISI社の高引用論文になっている。)

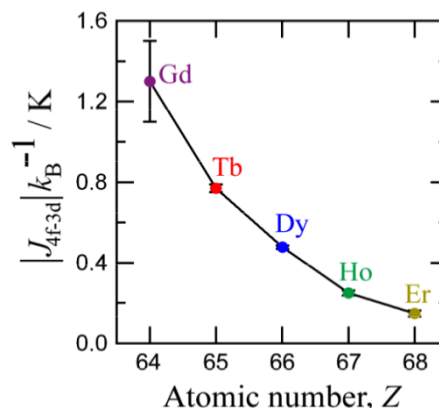
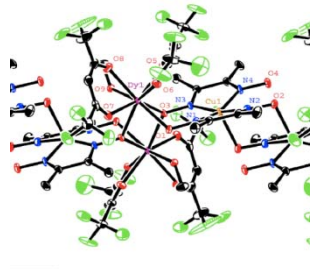


図1：分子磁石の磁気結合力の希土類イオン依存性、化学的な傾向が世界で初めて明快に示されました。

ナノ計測・分析/超微細加工/極限環境における主な支援成果

マルチフェロイック固体電子材料のナノ構造観察

[最先端設備による学術的成果例(H21年度)]

JST-ERATO十倉MFプロジェクト/物質・材料研究機構

【研究概要】

らせんスピン構造をもつ $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$ が、磁場下で渦巻状のスピン超構造(スカーミオン; Skyrmions)を持つことを、極低温ローレンツ電顕法で可視化することに成功した。このスカーミオン超構造は二次元的な周期性を示し、最密な六方晶構造であることを示した。これまで理論でのみ予測されていたスカーミオンの生成から消失までの過程を初めて観察し得たことは、技術的にも学術的にも大変重要な結果である。

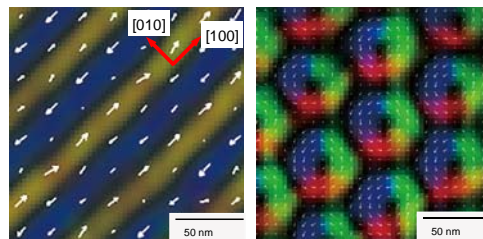


図: TIE解析法によって得られた、らせんスピン構造(左)とスカーミオン(右)の2次元磁化分布。

ナノフォトニクスデバイス創製に関する研究

[企業との連携による成果事例(H20年度)]

(株)豊田中央研究所/物質・材料研究機構

【研究概要】

金属薄膜に光の波長の半分程度の周期的な孔を形成すると光の異常透過が起こることが知られている。本研究では、プラズマ周波数の高いアルミニウム薄膜(AI)に、電子ビーム描画や塩素系反応性イオンエッチングにより周期 $a=420, 380, 340, 320, 300\text{nm}$ のホールアレイを形成、赤・橙・横・緑・青の光を透過するカラーフィルタの開発に成功した。電子ビーム描画とドライエッチング技術により表面プラズモンデバイスの作製に道筋をつけた。



図: アルミニウムを用いた表面プラズモンカラーフィルタの光透過像。

930MHz固体NMRによる葉緑素分子集合体の構造解明

[異分野融合による成果事例(H20年度)]

関西学院大学/日本電子/物質・材料研究機構

【研究概要】

葉緑素を太陽電池に応用する上で超分子構造を知ることが重要である。しかし、その構造について6種類のモデルが提案されてきたが、30年以上たった今でも決着していなかった。NIMSが保有する21テスラの固体NMR装置によって、世界で初めてMgの観測に成功することができ、Mg-NMRの結果から青枠で示した構造モデルだけが正しいことが実証され、30年以上の論争に終止符が打たれた。従来はNMRと無縁だった分野の研究者へも利用の輪が広がり、新しい融合の成果を出すことができた。

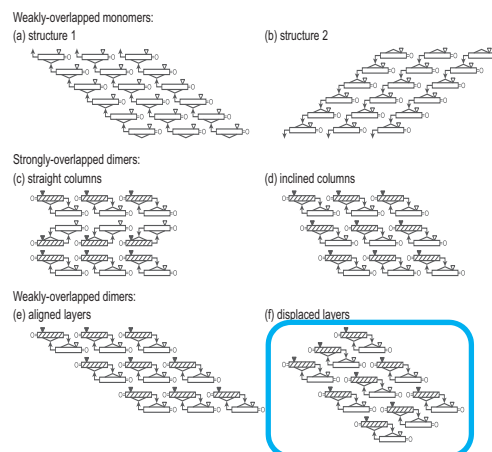


図: 葉緑素(BChl-c)の超分子構造は6種類のモデル

単一分子機能計測用ナノ電極の開発

^a京都大学大学院、^b東京工業大学、^c兵庫県立大学、^d住友化学
松重和美^a、田中一義^a、木口学^b、山名一成^c、田中健太^d

ナノネット事業で初めて可能になった成果

1. 究極のエレクトロニクスとして長年研究が進められてきた単一分子素子の特性評価プラットフォームとして、10nmスケールのギャップを持つ2端子及び3端子ナノ電極を開発し、世界で初めて80%以上の高い歩留まりと1TΩ以上の高い性能を実現した。これを用いた単一分子計測技術の開発が進められた。
2. 高い超微細加工技術と複雑なノウハウを必要とする単一分子機能計測用ナノ電極は、ナノネットのようなモノ作りを目的にできる研究支援の仕組み以外では開発が不可能である。

【研究概要】

現在の半導体エレクトロニクスは、物理的、材料的、デバイスの限界が近づいており、新しいパラダイムに基づいたエレクトロニクスの構築が必須である。有機分子は有機合成のみで構造も電子状態も制御できるという優れた特性を持つため、次世代のエレクトロニクスを支える材料として注目されている。本研究により単一分子トランジスタなどの単一分子素子の基本的特性を評価するために必須なナノスケールの2端子および3端子電極技術を世界で初めて開発した。

【特記すべき成果の詳細】

p型(100)面のシリコンウエハー上に500nmの厚さの酸化膜を成長させたものを基板として用いた。電子線描画技術により設計ギャップ長15–20nm、設計ギャップ幅50nmの電極パターンを形成した。厚さ約20nmの金薄膜を真空蒸着法で成長させ、最後にリフトオフ法により金電極部を形成する。さらにホトリソグラフィー技術により100μm角の電極パッドパターンを形成し、真空蒸着により金を40nm程度堆積し、リフトオフした。図は完成した10mm角チップ(a)、6x6サブチップ(b)、2端子電極部分(c)、および2端子電極(d)を示す。歩留まり80%以上、電気的特性は1TΩ程度と良好な絶縁性を示す。単一分子特性評価に適用成果もあり、単一分子素子が実用化に向けた研究段階に入ることになった。

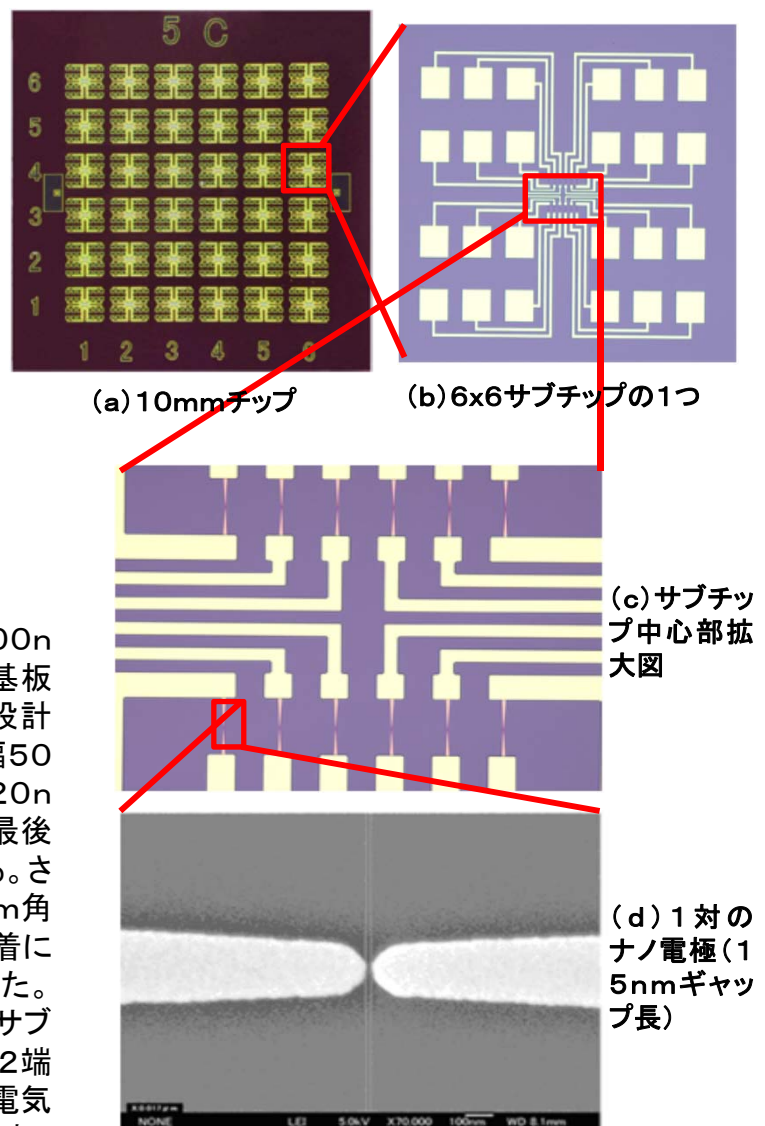


図1：開発に成功したギャップ長15nmの2端子ナノギャップ電極チップ写真。歩留まり80%以上を確認済み。

超微細加工／ナノ計測・分析領域における支援成果

超微細加工・ナノ計測・分析人材育成スクール

【ナノネット事業内連携の事例(H19-23年度)】

産業技術総合研究所／物質・材料研究機構／東京工業大学

産総研／物材機構／東工大の3機関合同で「超微細加工・ナノ計測・分析人材育成スクール」を開催した。このスクールは、機能別グループそして拠点を超えた機関の連携により実施したものであり、当ナノテクノロジー・ネットワークならではの特記すべき拠点間連携の事例であるといえる。表1に平成19-23年度の総参加人数(産学公別)、図1に産総研での実習の様子を示す。また以下に、受講生の声(原文)を抜粋して紹介する。

表1：平成19-23年度開催の3機関合同人材育成スクールの総参加人数(産学公別)

	産	学	公
講義	117	35	79
実習	49	20	38
合計(延べ人数)	166	55	117

※産業界からの参加が多かった

- ◆(産)全体的に幅広い知識(加工／分析)習得の参考になった。理論など勉強する場が少ないので、是非、今後も開催して下さい。
- ◆(学)テキストが充実していて、今後十分役立つと思われまます。講義がとてもしっかりやすく為になりました。
- ◆(公)講義によっては、時間が足りなかった先生方がおられました。どの先生も大変分かりやすい説明をしてくださいましたので、もう少し時間のゆとりがあるとよいと思います。



図1：産総研NPFのクリーンルームにおけるFE-SEM実習の様子

微量イオン物質のセンシング技術研究と環境センサの開発

【産業界における実用化研究開発への支援事例(H19-22年度)】

日立化成工業株式会社 中村 英博 様

大気汚染、水質汚染、廃棄物による土壌汚染など環境問題が深刻化する昨今、環境改善、維持に寄与する技術は重要であり、微量成分の簡易・迅速分析のニーズは非常に高い。本研究開発では、自己組織化膜が持つ微量イオンのセンシング機能に着目し、その有機基板上への展開を進めた。一方、これらの実用化には、従来にない多電極製造が不可欠であり、そのための基板としては、有機基板が有望と考えている。安定したセンシング機能を実現するための金／銅電極構造を検討し、その適正化の見通しを得た。

この研究開発は一時減速したが、当事業支援により事業展開に進展する見込みが立った。
 ※ナノネット追跡調査報告書より

電位測定パターン	断面写真(FIB加工)	特徴
安定パターン		金のクラスターは、比較的均一な層状に見え、クラスター界面がはっきりしている。
異常パターン		カーケンダルボイドが大きく金層内に広がっている。表面には銅の腐食物がXPSIによって観測された。

図2：安定／異常センシングが観測された電極の断面写真、およびその特徴。

側壁絶縁シリコンチップ試作

【大学における独創的先端研究開発への支援事例(H22年度)】

慶應義塾大学 三浦典之、吉田洋一、黒田忠弘 様

三次元LSIシステム集積における技術課題であるチップ間の通信方式および電源供給方式に関する研究の一環として側壁絶縁シリコンチップの試作を行った。試作した積層チップでは、通信方式に誘導結合を用いた無線通信方式である貫通チップインタフェース(TCI: ThruChip Interface)を採用、電源供給はAgペースト有線で行った。図3には、産総研ナノプロセッシング・パートナーシップ・プラットフォーム(NPPP)において実施した側壁絶縁シリコンチップ試作のプロセスフローである。3-inchシリコンウェハを用いて、NPPPの線ステップ、真空蒸着装置、RIEにより、ウェハ上に事前にAI電源配線を形成した。インピーダンスアナライザで電源線の導電性と基板との絶縁性を評価優れた特性を実証した。

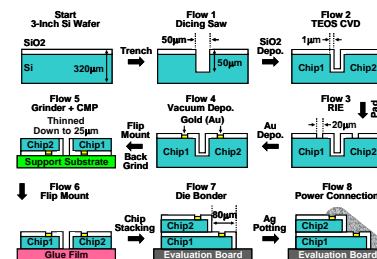


図3：側壁絶縁シリコンチップ試作のプロセスフロー。

この成果はISSCC(2011)(電子回路に係る世界最高峰の国際会議)にて発表された。

原子分解能TEM/STEMによるLaMOX化合物の微構造解析

^a東京工業大学, ^b東京大学平松秀典^a, 細野秀雄^a, 藤平哲也^b, 溝口照康^b, 幾原雄一^bナノネット事業で初めて可能になった成果

1. 原子分解能を有する走査透過型電子顕微鏡を用いたSTEM像観察および局所EELS分析により, 新規機能性セラミックス材料の特性発現の鍵となる欠陥構造の原子レベル観察に成功した。
2. 高キャリア濃度を有するがその起源が不明であった新規p型ワイドギャップ半導体LaCuOSeエピタキシャル薄膜について, ホール源となりうる積層欠陥構造を見出し, キャリアドーピングの起源を明らかにした。(JACS, 2010)
3. 原子サイズ電子プローブを用いたSTEM-EELSスペクトラムイメージング法により, 従来の結像法では可視化できない鉄系超伝導体LaFeAsO_{1-x}F_x中のフッ素ドーパントの直接観察に成功した。(APL, 2009)

【研究概要】

LaMOX化合物は, M(遷移金属元素), X(カルコゲンまたはニクトゲン元素)の組合せによりさまざまな組成の化合物が得られ, 近年の研究においてp型ワイドギャップ半導性(LaCuOSe)や高温超伝導(LaFeAsO)といった特色ある物性が見出されている系である。これらの系における薄膜および焼結体試料の微構造解析支援として, TEM, STEMによる機能発現欠陥構造の原子レベル観察を行った。

【特記すべき成果の詳細】

LaCuOSe薄膜のHRTEMおよびSTEM観察より, 薄膜化合物の積層と平行な方向に積層欠陥が見られた。HAADF-STEMによるZコントラスト観察より, この欠陥はCu-Se層が欠損したものであり, 電子状態計算の結果と合わせ, 本系におけるホールドーピングの起源となっている可能性が示唆された(図1)。また, 鉄系超伝導体LaFeAsO_{1-x}F_xの原子サイズ電子プローブによるSTEM-EELS観察により, 超伝導特性をもたらすフッ素ドーパントの原子レベル直接可視化に成功した(図2)。このような軽元素ドーパントの観察はHAADFを含む従来の結像法では不可能なものである。

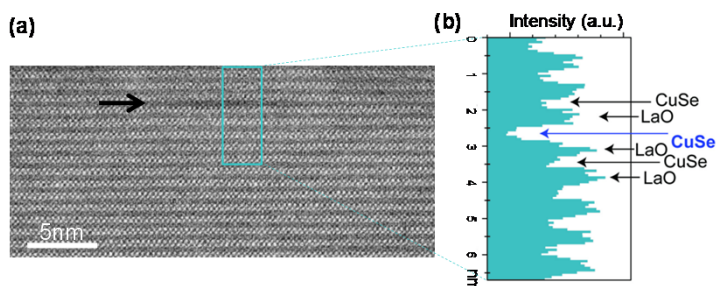


図1 : (a) LaCuOSeエピタキシャル薄膜中の積層欠陥構造近傍におけるHAADF-STEM像および (b) HAADF像強度プロファイル。

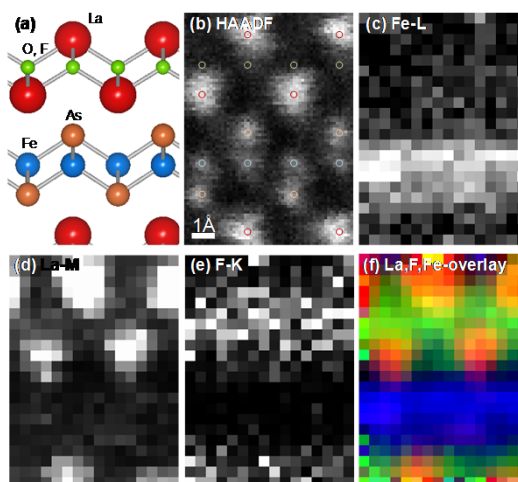


図2 : LaFeAsO_{1-x}F_x超伝導体の (a) 結晶構造, (b) STEM-HAADF像, およびEELSマッピング像 (c) Fe-L (d) La-M (e) F-K (f) La, Fe, F overlay。