

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 超高輝度放射光機能界面解析・制御ステーション

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

研究代表者

尾嶋 正治 (東京大学大学院工学系研究院 教授)

主たる共同研究者

雨宮 健太 ((大)高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究機構 准教授)

(平成 18 年 10 月～)

木下 豊彦 ((財)高輝度光科学研究センター利用研究促進部門 グループリーダー)

(平成 18 年 10 月～)

辛 埴 (東京大学物性研究所 教授)

(平成 18 年 10 月～)

小野 寛太 ((大)高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究機構 准教授)

(平成 18 年 10 月～)

横谷 尚睦 (岡山大学大学院自然科学研究科 教授)

(平成 18 年 10 月～)

3. 研究実施概要

本研究課題では、SPring-8 の超高輝度コヒーレント軟 X 線放射光を用いて、半導体ナノデバイス、磁性ナノデバイス、有機薄膜デバイスにおける界面構造を三次元的に解明すること、さらにその結果に基づいて界面電子構造の制御・設計を行うことを目的として研究を実施した。

ステーションの陣容としては、3 次元ナノ ESCA、マイクロ発光分光、コヒーレント分光の3装置を東京大学の新設ビームラインに設置して開発、これに他のラインに設置した光電子顕微鏡を加えた。その結果として、測定精度の向上と得られる情報量の飛躍的増加を実現したものである。以下に開発の概要を示す。

①軟 X 線放射光ナノビームに対して試料を走査する「3次元ナノ ESCA 装置」の開発を高エネルギー加速器研究機構のシンクロトロン(KEK-PF)をベースに行うとともに、これをSPring8 に設置してX線のビーム絞り込みなどを成功に導き、現時点で世界最高となる空間分解能 70 nm の角度分解光電子分光を実現した。さらに、測定された光電子検出角度依存性の最大エントロピー解析により、電子状態深さ方向分析、すなわち 3 次元解析が可能なることを Si-LSI におけるゲート部、裏面研磨 LSI デバイス、抵抗変化不揮発メモリー ReRAM、グラフェン FET、ナノシートスーパーキャパシターなどのナノ界面において実証し、その有効性を確認した。

②ミクロンビーム軟X線を用いた超高分解能発光分光装置を開発し、このエネルギー領域で世界最高のエネルギー分解能 1 万を達成した。これにより、酸素、窒素、遷移金属元素を含む液体、固体などの界面を実環境で解析出来るシステムが完成し、拡張ナノ空間の水、電気化学反応系の水、さらに酸素が吸着した燃料電池触媒中の鉄不純物など、材料性能を考察する上で不可欠な電子状態解析が可能になった。

③長尺アンジュレータからのコヒーレント軟X線を用いてナノ界面イメージングの開発を行った。ピンホールによる干渉縞で評価した結果極めて高品質のコヒーレント軟X線が得られることを確認した。現在、実試料での解析を行っている。

④高輝度放射光を用いた「投影型光電子顕微鏡 PEEM システム」によって半導体界面、金属/光触媒界面などの電子状態イメージングを行い、円偏光切り替えによって埋もれた磁性ナノ構造中の磁区構造動的变化を観測することに成功した。その結果、このシステムが磁性デバイス開発につながる武器となり得ることを実証した。

⑤界面電子構造の制御・設計の方では、強相関酸化物 SrVO₃を用いた量子井戸構造を設計、MBE 法により積層構造を調製し、世界に先駆けて強相関電子の2次元量子閉じ込めとその制御に成功した。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果

CREST への採択が呼び水になり、本研究課題に対する東大および文部科学省からの資金援助も獲得した。これらの重層的援助のお蔭で SPring8 に東大アウトステーションを完成させ、世界最高クラスの空間分解能をもつ放射光施設を完成させた。

3次元ナノESCAで世界最高の70nmという理論値に近い空間分解能の達成には、放射光をナノビーム集光するためのフレネルゾーンプレート(FZP)を用いた集光光学系と、光電子スペクトルの放出角度依存性を広い範囲で一括取得する角度分解型光電子アナライザの開発が必須要素として挙げられる。いずれにおいても、研究代表者の強いリーダーシップにより、知恵が結集された結果として結実したものである。また、マイクロ発光分光においても、世界最高となるエネルギー分解能 $E/\Delta E \sim 10,000$ を達成するとともに、超高真空環境と試料環境の間を薄膜で仕切ることによって、真に大気圧環境下にある試料の測定も可能となった。これにより水など液体を含む界面の微細構造の観測も可能となったことは大きな成果である。

このステーションの装置群における有効性が検証され、各種電子デバイスのナノ界面における元素組成、電子状態、化学結合状態、磁気的環境などにおいて、従来ブラックボックス的な状況にあったナノ領域の現象がいくつも明らかにされ、本研究課題の有効性が実証されつつある。

研究成果は、原著論文として実に264報発表され、質的にもレベルが高く、成果公表への積極的な姿勢が評価できる。一方、特許出願はわずかに1件であるが、これは、研究代表者の方針に依るものと理解している。即ち、今回の一連の開発は、極めて特殊性の高い装置群であるため特許を取得することよりも論文等により技術を世界に開示することに重点を置いたためである。

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

本研究は、X線集光による70nmに至る空間分解能の向上を放射光分光に持ち込み、研究のフロンティアを大幅に広げたのが、最大の功績と言える。世界トップレベルの装置が幾つか開発されているが、それぞれが得意とする測定対象、測定領域が存在するが、各々が補完関係あるいは棲み分けにより、強力な総合測定ステーションとなっている。今後、ものづくり側との協働により、電子デバイス以外にもエネルギーデバイスや、さらには、有機物、液体など幅広い分野での展開が期待される。とくに、動的観察、実使用時の観測の手法が確立されれば、デバイスや機能材料開発に与えるインパクトは絶大なものになるであろう。

また、SrVO₃を用いた量子井戸構造の成果は、原子オーダー制御薄膜成長技術と、その場放射光角度分解光電子分光技術の確立によって得られたものであり、まさにこのステーションの威力を立証するものである。この成果そのものはKEK-PFでなされたものであるが、今後、高温超伝導体の開発にもつながることが期待されるので、SPring8のステーションでの詳細な解析が待たれる。

本研究は、この分野のトップクラスの共同研究者をチーム内に配し、研究代表者の強いリーダーシップの下に進められた結果、研究を担当した研究者の中から7名の昇進者を輩出し、人材育成の面でも貢献度は大であった。

さらに、研究スタート時から総括チームから期待されたことであるが、“もの作り”を標榜する多数の研究グループとの共同研究を実施し、本研究領域にあっては共同研究遂行の“ハブ的存在”として活躍した。現在進行中の共同研究計画も幾つかあるので、今後一層の求心力を期待したい。

4-3. 総合的評価

本研究課題の目的とするところは、CRESTが配分できる資金を越えているのではないかと選考時点においてはやや議論になった。しかし、「天は自ら助くものを助く」の諺のごとく、CRESTへの採択が呼び水になり、本研究課題に対する東大および文部科学省からの資金援助が得られることになった。これらの重層的援助を基に、SPring8に東大アウトステーションを完成させ、世界最高クラスの空間分解能をもつ放射光施設を完成させた功績は大である。もちろん、研究は資金だけで成り立つものではなく、同時に優秀な「人」と金で買えない「もの」が不可欠である。これらを調和させて研究のフロンティアを開拓した研究代表者のリーダーシップは評価に値する。また、考えようによっては「雑用」とも言える他のグループの測定にも積極的に装置を開放し、本領域における共

同研究の「ハブ」的な存在となった点も特筆に値する功績である。装置開発は日進月歩であり、「世界 No.1」のみが生き残る宿命にある。CREST 終了後も本研究テーマが成長し続けることを期待している。