

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名: ナノ光電子機能の創生と局所光シミュレーション

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

堀 裕和(山梨大学 大学院医学工学総合研究部 教授)

主たる共同研究者

大石 進一(早稲田大学 理工学術院 教授)

小林 潔(東京工業大学 大学院理工学研究科物性物理学専攻 COE21 特任教授)

成瀬 誠(情報通信研究機構 情報通信部門超高速フォトニックネットワークグループ 主任研究員)

北原 和夫(国際基督教大学 教養学部 教授)

塚田 捷(早稲田大学 理工学術院ナノ理工学専攻 教授)

根城 均(物質・材料研究機構 ナノマテリアル研究所ナノデバイス第二サブグループ 主席研究員)

3. 研究実施概要

ナノ領域で真の機能を発現しマクロ機能に接続する構造を、物理と情報理論研究から探索し、これを実現する半導体ナノ量子構造デバイスの開発と近接場光励起輸送機能の計測に成功した。さらに、機能原理の理論基盤構築とシミュレーション手法確立に基づくナノ光電子機能の創生に挑戦し、科学技術基盤の構築を完了した。

ナノ光電子機能の特色と科学技術基盤の開拓

ナノ領域での「真の機能」探索には、物理、数学、情報理論が融合したデバイス創成と機能評価の研究が不可欠である。本研究では、分野融合的研究により、「近接場光相互作用の階層性」と「散逸とコヒーレンスが共存する局所光励起輸送」が「ナノ光電子機能」のエッセンスであることを見出し、新概念機能構造実現の基盤開拓を行った。すなわち、マクロな散逸過程に基づく「従来型電子デバイス」と、外界と隔離された「量子デバイス」との中間に、ナノからマクロに至る空間的階層ごとに独立の多様な機能をもつ「ナノ光電子機能デバイス」が実現可能であることを明らかにした。これに基づき、希薄磁性半導体ナノ量子構造を用いたデバイスの開発と、位置再現性を極限まで高めた近接場分光イメージング技術の開発を行い、光電子機能の基本特性を実験的に解明し、デバイス・システム構築の基本構造が実現した。さらに、ナノ光電子機能に関する物理・数学・情報理論の分野融合研究を、ナノからマクロに至る階層ごとに分析し発展させ、「近接場光励起の素過程を記述する相互作用モデル」、「コヒーレンスと散逸が共存する光電子融合機能を記述する理論」、「ナノとマクロを接続する機能評価適した積分方程式系に基づくシミュレーションと精度保証計算」、「新機能探索に向けた数理モデル」を総合的に開拓し、ナノ光電子機能を基盤とするデバイスやシステム構築の体系を確立した。

研究背景と研究推進

ナノ光電子機能は、配線型の電子デバイスから脱却し、エネルギー散逸を最小限に抑え、従来型電子素子では実現し得ない新機能を開拓する、次世代機能デバイス・システムの必須諸要件を具体化する新科学技術基盤である。本研究では、光と電子系の科学技術の融合研究により、ナノ光電子機能の本質を解明し、これに基づいて材料開発、機能評価実験装置開発を行い、ナノ機能構造の情報理論的探索と、物理素過程の研究、数学構造および数値計算の研究とシミュレーション開発を連携させて展開した。

研究内容と成果の概要

物理、数学、情報理論の分野融合によるナノ光電子機能探索により、

□近接場光相互作用の階層性

□散逸とコヒーレンスが共存する局所光励起輸送

に際立った特徴を有し「従来型電子デバイス」と「量子デバイス」との中間に位置する「ナノ光電子機能デバイス」が実現可能であることを明らかにした。

この成果に基づき、下記の3項目を大きな要素として総合的に研究を発展させ、目標をほぼ達成する成果をあげた。

◇デバイスおよびシステム開発と機能評価

「ナノ光電子機能デバイス」のコンセプト具現化のため、外部磁場でナノ領域の電子輸送と近接場光励起輸送の経路を制御する「スピンチェーン励起移動制御素子」を、磁性・非磁性半導体結合量子井戸構造によって実現し、強磁場下での励起子発光偏極計測によるスピン依存励起移動過程の実証と、ナノ領域の機能評価に成功した。ナノ領域機能評価のために、ナノ平坦表面の STM 表面形状イメージを数 nm の位置再現性の絶対基準とし、内部に埋め込まれたナノ構造の低温・強磁場環境下での近接場発光を、階層的に3次元分光イメージングする、世界的に類を見ない STM 支援走査型近接場光学顕微分光システムを開発した。これにより、量子井戸幅と磁性原子濃度分布に起因する数 10nm の構造を持つ励起子発光パターンの外部磁場制御に成功し、さらに、ナノレベル平坦表面に埋込んだ金ナノロッド構造のイメージングにより、近接場光相互作用の階層性の直接的検証に成功した。これらの世界に類を見ない成果により、ナノ光電子機能構造の最重要基盤技術が実現した。これに基づく情報処理機構研究では、近接場光相互作用の階層性に基づく新機能を、エネルギー散逸が生じる空間スケールに注目して解析する、世界に先駆けた研究を行い、散逸の少ない耐盗聴性(耐タンパー性)の高い素子構造が、ナノ光電子機能で実現し得ることを世界に先駆け解明した。これに基づき、次世代情報処理機能を目指す、多層化素子作製、機能計測装置の開発を展開した。

◇ナノ領域固有の機能を記述し設計する数理機構開発

融合研究で構築したナノ光電子機能のコンセプトに基づき、ナノとマクロの接続に着目した電磁界理論の数理的検討を行い、Maxwell 方程式に対応する Lippmann-Schwinger 方程式に基づく近接場光シミュレーションの精度把握の原理を明らかにし、また、計算技術研究では、既存の浮動小数点演算機構を巧妙に利用した高速高精度ベクトル内積計算技術を確立し、極めて悪条件かつ巨大な線形方程式の解法に新たな道を拓いた。さらに、FDTD シミュレーションをシンプレクティック差分法の観点から分析し、近接場光の取り扱いとマクロへの接続に適した FDTD シミュレータの実装化を行い、標準的例題により計算速度の改善を確認した。あわせて、数値シミュレーション技術を補完する階層性に着目した逆問題のための数理モデル構築と、局所環境系を考慮した機能理論等、幅広い研究を連携して推進した。

◇ナノ領域固有の機能を評価する物理理論構築

光電子系の励起輸送理論研究として、電子系理論と近接場光学理論に基盤を置く研究を連携して推進し、散逸とコヒーレンスが共存する輸送過程の理論基盤を構築した。電子系理論から、電子と輻射場の共存系を解析し、分子架橋、分子薄膜層を対象にトンネル過程、電子や励起子のコヒーレント型および散逸型輸送過程の競合、電子レベルにおける発光過程などの光電子融合研究を発展させた。さらに、近接場光相互作用にフォノン自由度を取り入れ、励起ホッピングの時間発展、緩和、局在過程、スピン自由度の関与を解明した。ナノ光電子機能に係る局所環境系評価の観点からは、励起輸送素過程となる古典量子結合系、局所平衡に基づく線形応答、局所環境という束縛条件下での階層性の理論研究を推進し、ナノ光電子機能の機能表現の理論的基盤を構築した。

まとめと展望

本課題では、ナノ光電子機能に関わる新科学技術創出と、新学術領域創生に取組み、光と電子系の科学技術の融合を、物理、情報、数学と数値計算との連携によって実現する、新学術領域創成の基盤構築を行った。今後、これらの基礎技術や科学基盤の広範な展開研究が推進され、実用化においても新概念に基づく多様な新機能デバイスおよびシステムの創出を導くものとする。

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(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

本研究では、高機能情報処理システム実現のためのナノ光電子機能の創生を目指して、ナノ空間固有の近接場移動で機能し、これをマクロに接続する階層的相関構造をもつ新概念デバイスを実現することを目指して研究を進めたが、必ずしも研究期間の終了時において十分な成果が出ていないと思われる。

また、近接場光が生み出す機能に焦点を絞ったシミュレーション技術を開発することを目標とし、具体的に、「デバイスおよびシステム開発と機能評価」、「ナノ領域固有の機能を設計する数理機構開発」、「ナノ領域固有の機能を評価する物理理論構築」の三つの研究項目を掲げ、当初の目標を概ね達成しているが、実験に生かすまでには至っていない。

研究開始時において、ナノ光電子機能の階層化というハード的な研究と、それらを繋ぐ数理機能研究、さらにそれらに意味づけを行う物理機能研究が組み合わされることで、新しい情報処理機能が生まれるという

提案趣旨であった。しかしながら、研究期間終了を迎えた段階において、これらの研究融合がなされておらず、独立に研究されたことになっている。結果として、磁性半導体を用いたハード的なデバイス研究が中心となってしまっている

個別研究についての外部発表は、適切になされているといえる。しかしながら、研究プロジェクトとしての総括、すなわち個別研究の成果を融合した研究の発表がほとんどなされていない。また知的財産権の出願および活用に向けた取り組みについても、特許出願する状況まで研究が進展していない。

本研究プロジェクトは、研究開始当初より、他分野の研究者を組織して、それらが融合することで新しい研究スタイルを作ることが期待された。上述のとおり、研究が十分進展しなかったため、結果的には、ハード開発的な研究に終始した印象が強く、せっかくのチーム研究が必ずしも実を結んでいないことは残念であると言わざるを得ない。

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

個々の要素技術については、科学的・技術的意義が認められるが、本研究が目指している近接場光相互作用の階層性を活かした信号処理系をもつ光電子機能システムの構築については、抽象的な部分も多く、評価が難しい。研究の進展が遅れたため、社会的インパクトを議論する状況にはないのは残念である。

しかしながら近接場光による励起移動で機能する、全く新しい概念のナノ信号処理システムはサイエンティフィックには非常に興味深いものであるので、今後、具体的提案がなされることを期待したい。

4-3. 総合的評価

当初は、これまでの情報処理にはエネルギー多消費、無駄な計算を繰り返す欠点があり、ナノ光電子の強い相互作用を利用すれば、それらの階層化によってより合理的で低消費な情報処理ができるという壮大な研究提案であった。現状で提示されたのは、相関相互作用、エネルギー移乗を利用した多層イメージ相関係であり、一般的な意味での情報処理装置とはほど遠い。

この励起輸送デバイスがどのように機能するか、理論的にも実験的にも十分には示されておらず、「新しい信号処理システム」として機能するとは判断しがたい。今後その可能性が示されることを期待したい。