

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286067

研究課題名(和文) ナノ光電子融合機能デバイスにおける階層的励起輸送過程の研究

研究課題名(英文) Hierarchical structure of excitation transport in nano-optoelectronics functional devices

研究代表者

堀 裕和 (HORI, Hirokazu)

山梨大学・総合研究部・教授

研究者番号：10165574

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：ナノメートル空間の光と電子の融合的振る舞いを基盤とする階層的機能システムの機能を創出するために、信号伝達経路をナノメートル分解能で安定にトレースし解析できる世界初の走査型上下プローブ近接場光学顕微鏡を開発し、半導体量子井戸および光相転移分子からなるナノ構造に対する機能評価を行った。非ノイマン型の革新的情報処理機構の基盤となる、機能設計理論を圏の数理に基づいて構築し、フォトニック知能の機能理論を構築し、その有用性を実証する成果を挙げ、出版論文も注目を集めた。

研究成果の概要(英文)：Functional properties of multilayered semiconductor quantum wells and photochromic molecular crystals have been investigated based on development of the world premier top-to-bottom type scanning double-probe near-field optical microscope as the basis of innovation of optoelectronics functionality in nanometer-scale. Based on the first experimental demonstration of photonic intelligence, the theoretical foundations of functionality aiming at construction of novel computational systems beyond von Neumann-type have been established based on category-theoretical model of functionality which reveals the potential applications of optoelectronics intelligence.

研究分野：ナノオプティクス

キーワード：先端機能デバイス ナノオプティクス 走査プローブ顕微鏡 ナノ機能材料 量子光学 機能理論 圏
論 自然知能

1. 研究開始当初の背景

(1) 情報処理システムの限界

情報処理の速さや密度を向上させる科学技術展開も越えられない壁に近づいている。電子系の物理的振る舞いを利用した半導体の機能素子の主体とし、電磁気学的な作用を独立した信号伝達経路や入出力として組み合わせる考え方では、配線ボトルネックと呼ばれる限界が生じる。これは、基本的にマクロな電源から供給された電気エネルギーが微細構造を持つ基本素子で消費されスイッチが切り替わるといふ、散逸過程に基づいて機能が構成されているためである。また、散逸構造に依拠するチューリングマシンを基本とするノイマン型計算機構も、巡回セールスマン問題などの解探索問題に対しては計算量の指数的爆発を起こし、真の人工知能を実現に踏み込む手段となりえない。散逸過程を基本とする演算構造は、マクロからナノへの全階層で外乱に対する頑強性を保持するために、生命機能と比較して桁違いのエネルギー消費を伴い、放熱限界をもたらす。限界を超える手段として、量子計算機構が研究されているが、孤立系状態空間の完全な制御を基盤としており、外乱を完全に遮断する高度かつ複雑な環境制御が必要となる。古典的計算機構と量子計算機構の中間に位置し、配線ボトルネック等の限界を回避し、エネルギー消費を生命現象に近づくほど低下させ、ノイマン型計算機構からも脱却する、革新的な情報処理機能システム開拓が必要である。

(2) 革新的高度情報処理システム探索

本研究課題は、このような現代科学技術の背景に基づき、情報処理機能の基本が励起輸送にあり、電子系と電磁場の相互作用が機能の素過程を担い、非平衡開放系の輸送現象が機能発現の環境条件であるとし、相互作用の多様化と階層化に基づいて機能発現を可能とする革新的システムの素過程と、ノイマン型計算機構を質的に変える機能理論構築を目指した。チューリングが暗号解読に用いたのも自然界の動的振る舞いを基礎としたポンペと呼ばれる機構であった。近年、粘菌の振る舞いや相関を持った物理的実体の性質を用いた利用した解探索機構の研究が進展し、チューリングポンペに対応する機構であり、本研究では理論モデルの探索を推し進めた。

(3) ナノ光電子機能に基づく革新的高度情報処理システムの基盤構築

本研究の基盤科学技術は、近接場光学に基づき、電子系と光系とを一体として扱う科学技術と、相互作用の階層性を基盤としたナノとマクロの接続構造を基礎とする。実験研究では、素過程を解明するため、ナノ領域での相関計測を可能にする、世界に類を見ない多プローブ計測システム開発を課題とした。これにより、半導体量子構造および光によって分子構造を特徴的に変化させるフォトクロミック材料を基盤とする、機能システムの基

盤研究を推進することを目指した。さらに、機能解析のために、自然機能を活用した粘菌計算機、および基本モデルであるバンディット問題のアルゴリズムなどを分析し、非平衡開放系において、環境系の多様な振舞いを取り入れた革新的な機能理論構築を行うことをもう一つの目的とした。本研究では、研究期間中に、現代数学の中心を構成する圏や層の理論と代数的位相幾何学の考えを基盤として、多様な分野の研究者との交流を加えて課題の展開を図り、このような機能理論の構築を目指した。非平衡開放系における機能発現の構造、局所環境系の階層構造を、圏のホモロジーの公理や定理に基づいて解析する方法論の構築に成功し、新たに自然知能という考え方を導入するとともに、粘菌計算機構の原理的解明などの未解決課題に取組んだ。

2. 研究の目的

ナノ空間において励起子輸送と近接場光励起輸送を結合させ外部磁場で制御する、配線を用いない光・電子融合の階層型新機能の基本構造に基づき、物質輸送系(励起子移動)と信号輸送系(近接場光励起輸送)が結合した階層的機能システムの機能評価を行い、非ノイマン型の情報処理機構構築を念頭において、粘菌など生命系の振舞いにならった充足可能性問題(SAT)解探索法等を活用した、新機能発現の基盤研究を推進することが本研究の目的である。独自の素子作製技術、ナノスケールで絶対的空間位置再現性を有する走査顕微分光技術、励起輸送経路トレース技術等により機能の物理過程を分析し、新機能構造確立とナノ光電子機能発現の学術基盤の構築を目指した。

情報処理科学技術の限界を超えるために、励起子と近接場光励起の融合的輸送過程を情報処理の素過程とし、これを外部磁場等で制御することで、配線を用いない階層型新機能の科学技術基盤を構築するため、新規のナノ領域の相関計測装置を開発し、機能素過程の実験的解明と数理物理的機能理論の構築を推進した。

新規情報処理システムの可能性を探求し、既に協働で成果を挙げている、粘菌など生命系の振舞いにならった解探索法等をモデルとして機能構造を明らかにし、汎用的な機能モデル構築によって、ナノ光電子結合系における新機能発現研究を推進が大きな目標である。

3. 研究の方法

(1) 上記目的のもとに、以下の項目の研究を実施することを、当初目的とした。

ナノ構造を持つ単層磁性半導体量子井戸デバイスおよび磁性非磁性結合量子井戸デバイスを多様な条件で作製し、磁場制御ナノ発光イメージング分光計測を行い、励起子輸送経路と励起子発光過程の統計数理的分離抽出により素過程の明確な分析を行う。

外部磁場により階層的にポテンシャルを制御できる多層構造の量子井戸デバイスを作製し、磁場制御ナノ発光イメージング分光計測を行い、階層間の近接場光励起輸送経路の解析に基づく共鳴的励起輸送機能の素過程分析を行う。

充足可能性問題 (SAT) における粘菌を用いた解探索機構やセルオートマトン等との比較研究に基づき、可能な機能構造を模索する。

開発したデバイスにおいて、ナノ分解能の局所光励起を実現し、これに基づく励起輸送経路および共鳴的近接場光励起輸送過程の特性を明らかにする。

デバイス表面にナノ構造の磁性原子層薄膜を形成し、磁場の局所変調によるデバイス機能変調機構を開拓するとともに、磁性非磁性結合量子井戸におけるスピン選択キャリア注入過程を利用したデバイス研究に発展させる。

上記研究課題を統合し、ナノスケールでの光・電子融合機能デバイスおよびシステムの設計原理研究と新機能探索研究を展開する。

これらの課題と並行して、励起輸送経路トレース技術に基づき素子の物理過程を詳細に分析し、統計数理的方法によって励起子輸送系と近接場光励起輸送系の素過程の物理を明らかにするとともに、そのモデル化を行い、非ノイマン型情報処理機構を念頭に置いた機能構造探索を行う。

上記項目の は、機能評価実験に必要な液体ヘリウムの入手に国際的な問題が生じたこともあり、磁性原子層幕の形成による制御に替えて、室温動作が可能で階層的相互作用の複雑構造を実現できる、光相転移分子結晶 (フォトクロミック材料) における経路探索実験に切り替え、研究課題とした。

(2) 実験研究においては、現有の絶対的空間位置を長時間ナノメータースケールで再現できる走査型トンネル電子顕微鏡 (STM) 援用の近接場光学顕微分光システム (SNOM) の主要部を改良し、薄い試料の上下両表面から同時に光の入力と検出をナノメータースケールで計測し、励起輸送経路をトレースする、新技術開発を、(株)ユニソクの技術者と協働で開発した。STMと近接場光計測を両立させる透明導電性膜つき光ファイバプローブの作製環境改善等を合わせて実施した。これにより、多層構造の量子井戸局所励起と励起輸送経路探索の実験研究を推進し、種々のパラメーター制御により設計製作した希薄磁性半導体量子井戸構造の磁場依存発光イメージング計測を行った。電子系の振舞いを強く反映した励起子移動過程と、近接場光相互作用に基づく励起輸送過程を、統計的手法と局所光の計算に基づいて抽出する研究を推進した。これまでに埋込金ナノロッド構造に発生する光近接場において実験的に明らかにしたように、近接場光相互作用の階層性は、励起子発光と共鳴的近接場光相互作用

に基づくポテンシャル井戸間の励起子のトンネル輸送過程の多重性をもたらす。本研究では、新たな装置の高度な性能を駆使して、埋め込み金ナノロッド構造のさらに詳細な計測を行い、物質内で起こる階層的電磁相互作用の複雑性を反映した近接場の電気力線の接続構造に着目した新たな解析を行った。これらの結果と、本研究で構築した圏や位相幾何学に基づく機能モデルにより、計測結果の新たな評価を行い、非平衡開放系や保存系の力学と、場の複素構造の相関を改めて見直し、近接場光学理論を新たなステージに展開する新規理論研究を実施した。

(3) 理論研究では、粘菌計算機やバンディット問題と呼ばれる解探索の基本問題に、新しい解釈を加え機能理論の整備を行った。新機能構造が、従来の配線型デバイスでは実現不可能な複雑性と多重性を持つことを検証するとともに、素過程の実験的検証に基づくシステム研究を通じての、ナノ光電子機能学術基盤の確立を行った。これらを、パターン認識等の目的に適したエキスパート素子を構成するなど、多様な応用可能性探索を行った。

得られた結果をとりまとめ、論文や国際会議等を通じての成果発表を行った。

4. 研究成果

以下に、研究目的の項目 から とその成果を、内容ごとにまとめる。

(1) ナノ光電子機能デバイスの基本構造の開発と評価 (項目 、)

ナノ構造を持つ単層磁性半導体量子井戸デバイスおよび磁性非磁性結合量子井戸デバイスの多様な条件での作製を、本学の松本俊名誉教授との連携のもとに行った。磁場制御ナノ発光イメージング分光計測を行い、スピン依存の電子輸送を確認するなど新しい成果を挙げるとともに、フォノンを介した励起子輸送などの素過程の実験的解明は、他研究者の理論的研究に基礎的データを与えるなどの、新機能素子開拓を目指す幅広い研究に波及的發展をもたらす、広くその成果が公表されている。本研究においては、励起子輸送経路と励起子発光過程の統計数理的分離抽出により素過程の明確な分析を行った。この基盤として、埋め込み金ナノロッドシステムの表面の近接場分布を、プローブを表面鉛直方向に上下させながら操作するという、新装置の高安定性と高精度位置再現性を多様に活用した世界に類を見ない計測を行い、光近接場を表面における電気力線の接続構造の多様性としてとらえる新しい解析に成功し、これに基づいて、近接場光学を相互作用の本質を位相幾何学的に捉え直した紐理論等によって再構築する可能性を探索し、後述の理論の発展やこれに基づく外部研究者と協働の各種ナノ構造の近接場を利用した応用機能の評価につなげる成果を挙げた。

(2) 外部磁場で制御する多層構造の作製と

評価(項目、 、 、)

多層量子構造間での励起輸送過程研究においては、本学の松本俊名誉教授との連携のもとに、希薄磁性半導体量子井戸の励起子のエネルギー準位のゼーマン効果シフトを、超格子の構成原子層数と磁性原子の混入密度等から精密に制御することにより、近接場光を介しての井戸間の励起子の輸送が、特徴的な磁場の値において共鳴的に発生する多層量子井戸デバイスの構造設計を行い、これに基づいて各種3層量子井戸を有するデバイスを作製した。本研究で開発した、STM-SNOMシステムにより、励起輸送の波長選択性と近接場計測の距離選択性を駆使して、二重量子井戸間の双方向の励起子輸送過程を分解する画像処理法を新たに開拓し、これによって異なる井戸間の双方向の励起子輸送過程を表面近傍の多層的光近接場分光計測に基づいて分離し評価することに成功し、設計された構造と整合する励起輸送過程を検証することに成功した。多数の階層的量子井戸構造における、複雑な励起輸送過程を、外部磁場と電子スピンの状態に応じて制御し、配線を持たないナノ光電子機能構築するための基盤構造と動作原理が確立した。

より直接的に励起輸送経路を探索する研究は、表面上での量子井戸内励起輸送のトレースと試料の厚さ方向の励起輸送過程のトレースの二つの主要な評価がある。表面プローブにおいては、本学で協働した研究を行っている酒井優准教授が、独立して進めている研究プロジェクトにおいて表面上の3プローブ近接場光学顕微鏡システムの開発に成功し、励起輸送の時間分解分光に基づく励起輸送経路とポテンシャル構造の可視化などの先駆的な成果が挙げられている。本研究ではこれに双対となる、厚さ方向の励起輸送過程のトレースを実現する基盤技術開拓を行った。半導体量子構造は分子線エピタキシーによって、比較的厚い基板上に作製されるため、部分的に基盤を除去するエッチング技術の開発手法の検討と評価を行った。さらに、上下探針を一致させる絶対位置の制御のために、電気的手法による粗動機構の開発と、プローブ同士の直接の位置合わせ技術、および資料の挿入技術等を開発した。これに基づき、フォトクロミック結晶薄片試料において、裏側探針から入力された近接場光によってナノメータ領域の局所透明化と、その結果できた光の透過経路の自発的な枝状拡張がおきる、パーコレーション的振る舞いを表面探針の走査によってきわめて再現性良く計測することに成功した。これらの成果を通じて、多探針プローブ計測の基盤技術を構築し、自然知能と呼べる革新的解探索構造を実現する実験的基盤が確立した。

(3) 解探索機構の機能モデルと設計基盤の構築(項目、 、 、)

巡回セールスマン問題や充足可能性問題(SAT)における粘菌を用いた解探索機構や

セルオートマトン等との比較研究に基づき、可能な機能構造を模索することを目指して研究を開始し、これらの基礎にある多本腕バンディッド問題を解析する中で、その数理解物理の本質を解明することに成功した。具体的には、圏のホモロジーに関わる定理や公理を用い、代数的位相幾何学の考え方を問題解決の数理的基礎とする、新しい機能構造のモデルを構築した。

はじめに、粘菌における解探索機構を、ナノ光電子機能を量子ドット系等に制限したナノフォトニクスデバイスにおいて実装する基盤となる理論体系を、粘菌計算機構の研究を牽引する青野真士東工大准教授、バンディッド問題の理論研究を推進する金成主物質材料研究機構研究員、長年にわたりナノフォトニクス機能の協働研究を実施している成瀬誠情報通信研究機構主席研究員らと協働で開拓するとともに、ナノカオスの発生や特殊偏極状態の発生などのナノフォトニクスの基礎研究を推進した。これらの基礎研究に基づいて、バンディッド問題のフォトニクスにおける実装を国際協働研究のもとに実施し、単一光子意思決定装置の開発に成功したことから、本研究における圏論に基づく理論モデル研究が急速に進展し、非平衡開放系で機能する階層的機能構造の数理解物理的な理論を構築することに成功するとともに、単一光子意思決定装置の仕組みを紐のモデルにより解明し、成果を報告した。

これらの理論展開を基礎として、自然知能という概念とその理論的枠組みを探索し、現在広く展開する各種研究に発展しつつある。(4) 本研究から展開した自然知能の構造モデルと理論体系の構築

自然知能は、莫大な内部自由度を背景に自律的な活動をする自然系が、生存や繁栄などの価値観のもとに発現する機能である。粘菌計算機等で実証されているように、問題が設定された低次元の空間において断片的に与えられた解探索の手がかりを、莫大な自由度の自然系の内部状態が包含する複雑な幾何学的構造に適合させ、結果として外界に表出される自然系の身体表現を、問題の幾何学構造の分析に基づいて探索された解であると解釈することができる。自然知能の描像構築のために、幾何学的な構造を保つ準同型射の働きを図式によって明快に表現する、圏論を基盤とすべきことを着想した。圏論によれば、物理的実体が何であるかを完全には把握できない場合にも、諸概念の関係性とその特徴および導き出される機能を解析し、諸現象の実態を明らかにすることが可能となる。特に、非平衡開放系の中で環境系との継続的・階層的な関わりに基づいて発現する諸現象の記述に圏論は真価を發揮する。物理的直感のみでなく、明確な数学的構造に基づいて複雑系の諸現象のモデル化がなされ、異なる物理的実体の間での機能構造の転写も関手によって明快に記述される。

自然知能による意志決定と、その外界への表出である身体表現、これに対する外界の応答と誘導される自然知能の次の意思決定の機能連鎖に対応する現象論な描像として、加法圏における鎖ごとに完全な複体が導くホモロジーの長完全列の図式を当てはめることで、圏論による記述の有効性を実証することに成功した。ホモロジーは、自然知能の機能連鎖のそれぞれの段階において局所環境として取り込まれた諸現象を、それを顕に表現し得ない場合においても、漏れなく包含する器の役割を果たす。非平衡開放系の物理現象と、複雑な機能を支える局所環境系のダイナミクスと階層的構造を、圏の図式によって明確に捉え、自然知能の多様な発現を予測することが可能になること本研究で見出し、その有用性を各種モデルにおいて示した。一般には理解が難しい圏の定理を、ヴィジュアルに表現する手法を独自に開拓し、圏論に馴染みのない研究者にもホモロジーの長完全列が導く機能構造の理解を容易にし、有効な応用を探索できる基盤を構築した。あわせて、数学における短完全列条件の物理的な意義を、熱力学的な準定常状態と外部基準の設定という観点から考察し、機能構造解明の鍵となる汎用概念を抽出した。

圏論的考察から、自然知能は、関係なさそうなことを無視する能力、都合のよい尺度からものごとを表象する能力、似たようなものごとを同一視する能力、ものごととその来歴を同一視する能力を備える構造であると推察される。これは、導来圏(derived category)を構成する数理的手続きに対応する。完全な物理的記述が不可能な複雑系である自然知能を、導来圏や三角圏の公理に基づいて抽出する数理物理的手法に基づき、単一光子意思決定機械の動作原理分析を行い、これが導来圏を基本とする三角圏の八面体公理に適合することを示すとともに、八面体構造におけるマヤー・ヴィートリス列の諸定理、および代数的位相幾何学の構造に基づいて、機能発現の構造を解明する手法を研究した。その成果を単一光子意思決定装置の機構解明に適用し、バンディッド問題の解探索過程を表す組み紐が解ける構造に対応することを明らかにした。このモデルは、成瀬博士による単一光子意思決定装置の数値シミュレーションで実証され、その成果を報告した。

これらの基盤に基づいて、ナノ光電子系による機能構造の創生などを題材とする、物理的複雑系のシステム化による半人造の自然知能系構築の可能性を考察し、多本腕バンディッド問題に関わる解探索機構に研究を展開している。特に、光波長よりも小さい空間に埋め込まれた多数の物質構造が関与する階層的機能構造の複雑性を活用し、その入出力間に形成される相関関係を用いた一括処理過程をアナログデバイスとして用いる等によって、パターン認識等の目的に適したエキスパート素子を構成するなど、多様な応用

開発の可能性探索および機能設計を引き続き展開している。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計14件)

成瀬 誠、青野真土、葛西誠也、堀 裕和、S. Huant、金 成主、フォトニックインテリジェンス、応用物理学会フォトニクス分科学会誌「フォトニクスニュース」、査読有、第1巻、第2号、pp. 51-57、2016年1月

M. Naruse, S.-J. Kim, M. Aono, M. Berthel, A. Drezet, S. Huant, H. Hori: Category theoretic analysis of single-photon decision maker, arXiv:1602.08199

S.-J. Kim, M. Naruse, M. Aono, H. Hori, T. Akimoto: Accelerated diffusion by chaotic fluctuation in probability in photoexcitation transfer system, arXiv:1601.03587

M. Naruse, M. Berthel, A. Drezet, S. Huant, M. Aono, H. Hori, and S.-J. Kim, “Single-photon decision maker”, Scientific Reports, 査読有, Vol. 5, Article number 13253, 2015. DOI: 10.1038/srep13253 [Nature Japan ハイライト論文]

M. Naruse, T. Tani, T. Inoue, H. Yasuda, H. Hori, and M. Naya, “Local circular polarizations in nanostructures induced by linear polarization via optical near-fields”, Journal of Optical Society of America B, 査読有, Vol. 32, No. 9, pp. 1797-1803, 2015. DOI: 10.1364/JOSAB.31.002404

M. Naruse, S.-J. Kim, M. Aono, H. Hori, and M. Ohtsu, Chaotic oscillation and random-number generation based on nanoscale optical-energy transfer. Scientific Reports, 査読有, Vol. 4, 6039, 2014. DOI: 10.1038/srep06039

K. Uchiyama, S. Kubota, T. Matsumoto, K. Kobayashi, H. Hori, “Magnetic-field-dependent excitation transfer in quantum wells of diluted magnetic semiconductor”, Appl. Phys. A, 査読有, Vol. 115-1, pp 99-104, 2014, DOI 10.1007/s00339-013-8005-8

T. Suwa, A. Ishikawa, K. Uchiyama, T. Matsumoto, H. Hori, K. Kobayashi, “Coherent-phonon-assisted excitation transfer via optical near fields in dilute magnetic semiconductor nanostructures”, Applied Physics A, 査読有, Volume 115, Issue 1, pp 39-43, 2014, DOI 10.1007/s00339-013-7929-3

T. Matsumoto, F. Iwasaki, S. Konaka, M. Hishikawa, S. Fukasawa, T. Muranaka, Y. Nabetani, A. Ishikawa, K. Uchiyama, K. Kobayashi, and H. Hori, “Energy relaxation process in exciton transfer between (Zn, Cd, Mn)Se and (Zn, Cd)Se quantum wells”, Phys. Status Solidi C, 査読有, 1-4, 2014, DOI 10.1002/pssc.201300599

M. Aono, M. Naruse, S.-J. Kim, M. Wakabayashi, H. Hori, M. Ohtsu, M. Hara, "Amoeba-inspired nanoarchitectonic computing: Solving intractable computational problems using nanoscale photoexcitation transfer dynamics," *Langmuir* 査読有, 29, 7557-7564, 2013, DOI 10.1021/la400301p

〔学会発表〕(計 26 件)

成瀬誠、堀裕和、青野真土、Serge Huant、金 成主: 単一光子意思決定の理論: 幾何学及び圏論による構造分析、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、2016 年 3 月。

成瀬 誠、M. Berthel, A. Drezet, S. Huant、青野真土、堀 裕和、金 成主: 単一光子を用いた意思決定の実証、日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan、講演予稿集 CD、30aE6 (2015.10.30 東京)

K. Uchiyama, N. Nishikawa, S. Kubota, T. Matsumoto, K. Kobayashi, and H. Hori, Near-Field Optical and Electronic Processes in Nano-Optoelectronic Functional Layered System, , The 10th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, Jul. 10, 2015, (Hakodate)

M. Sakai, Y. Miwa, A. Syouji, A. Ishikawa, K. Uchiyama, K. Kobayashi, T. Matsumoto, K. Kishino, and H. Hori, Development of Multi-Probe SNOM for Investigation of Carrier Dynamics in Semiconductor Quantum Wells, The 10th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, Jul. 9, 2015, (Hakodate)

堀裕和、圏論による自然知能の基盤構築 ~ 圏論によるナノ光電子系の理論と知能の圏論的解明 ~、自然知能セミナー(第 1 回)2016 年 2 月 24 日

堀裕和、"ナノオプティクスにおける機能をどう捉えるか"、日本光学会 ナノオプティクス研究グループ 第 21 回研究討論会、Mar. 5 (2015). (招待講演)

H. Hori, K. Uchiyama, M. Sakai, H. Nejo, K. Kobayashi, "Near-field multi-probe diagnosis of subwavelength-scale optoelectronics functionalities", JSAP-OSA Joint Symposia, 14p-2C-9 (2015). (招待講演)

H. Hori, Physics of Nano-Optoelectronics Functionality: Theoretical and experimental progress towards functional systems, Proc. 27th Symposium on Phase Change Oriented Science PCOS2015, Nov. 26, pp.3-6 (2015). (招待講演)

内山和治、堀裕和、小林潔、松本俊、ナノ光電子機能と局所環境における電磁相互作用と電子系の励起輸送過程の可視化と解析、2015 年総合大会、シンポジウム CI 1, 2015 年 03 月. (招待講演)

堀裕和、ナノ電子フォトン系における機能の基本構造と圏論に基づく描像、第 62 回応

用物理学会春季学術講演会、シンポジウム、2015 年 03 月. (招待講演)

西川直樹、内山和治、久保田悟、小林潔、堀裕和、二重トンネル接合された金ナノロッド系における近接場光分布と電流-電圧特性の相関、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 03 月。

西川直樹、内山和治、久保田悟、小林潔、堀裕和、二重トンネル接合された金ナノロッドにおける電流-電圧特性の近接場光による変調、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 09 月。

内山和治、西川直樹、久保田悟、松本俊、小林潔、堀裕和、希薄磁性半導体多重量子井戸における近接場光相互作用によるスピン選択的励起移動、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 09 月。

〔図書〕(計 1 件)

M. Aono, S.-J. Kim, M. Naruse, M. Wakabayashi, H. Hori, M. Ohtsu, and M. Hara, "A Nanophotonic Computing Paradigm: Problem-Solving and Decision-Making Systems Using Spatiotemporal Photoexcitation Transfer Dynamics", M. Naruse ed., *Nanophotonic Information Physics* (Springer, 2014), pp. 223-244. 6 .

〔その他〕

報道関連情報

OPTRONICS ONLINE

<http://optronicsmedia.com/news/20150819/34522/>

MIT Technology Review

<http://www.technologyreview.com/view/541196/first-demonstration-of-photonic-intelligence/>

"recommended article" in Nature Japan.
<http://www.natureasia.com/ja-jp/srep/abstracts/69008>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

堀 裕和 (HORI, Hirokazu)
山梨大学・大学院総合研究部・教授
研究者番号: 1 0 1 6 5 5 7 4

(2)研究分担者

内山 和治 (UCHIYAMA, Kazuharu)
山梨大学・大学院総合研究部・助教
研究者番号: 7 0 5 3 8 1 6 5