

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」
平成17 年度採択研究代表者

堀 裕和

山梨大学大学院医学工学総合研究部・教授

ナノ光電子機能の創生と局所光シミュレーション

§ 1. 研究実施の概要

新時代の高機能情報処理システムを構成する「ナノ光電子機能」の創生を目的として、ナノ空間固有の近接場光励起移動で機能し、これをマクロに接続する階層的インターフェースを持つ新概念デバイスの作製と、近接場光特有の機能に焦点を絞ったシミュレーション技術の開発を総合的に推進し、「ナノ空間機能の科学」および「局所光電子系の科学」の構築を目指す。

研究は、「階層型ナノ光システムにおける新機能開拓」と「情報処理機構の提案」を軸に、スピンチェーン制御励起移動デバイス作製とナノ光電子機能評価を結び付けた「ものづくり」と、ナノ光電子機能のシミュレーション技術および量子機能開拓を含む「基礎研究」を密接に結び付け、「新概念デバイス創生と新概念システム機能発現に向けたブレイクスルー」と、「ナノ空間機能の科学」および「局所光電子系の科学」の構築を目指して進展している。これまでに、デバイスの作製と機能評価実験系の整備に取り組み、素過程の解析と階層型新機能情報処理システムの提案等、光系と電子系の融合領域を開拓してきた。今年度は特に、ナノ光電子機能計測技術の進展が基盤となり、物理的素過程と階層的機能システムの理論研究で予測された新規機能に関わる諸特性が、ナノ光電子機能素子の作製とナノ分解能機能計測の融合によって、実験的に検証される段階になった。さらに、これまでの理論研究を集約し、励起輸送と局所環境系との関わりを明確にするための基盤構築が大きく進展した。今後は階層的機能創出とその情報処理システムとしての機能分析および新機能の提案をさらに推し進め、基礎研究と融合してデバイス創生研究を進展させ、研究目標の達成を目指す。

「スピンチェーン制御励起移動デバイス製作」では、量子井戸内に局在する励起子とその近傍に配列させた磁性イオンとの相互作用の外部磁界による変調を基本動作原理とし、分子線エピタキシー法で作製した希薄磁性半導体と非磁性半導体が障壁層を介して結合する二重量子井戸構造において、スピン選択的励起移動の素過程検証を行うとともに、トンネル電子制御による近接場光

プローブ顕微分光装置を開発し、STM計測レベルの平坦性を持つ試料における近接場光励起輸送の実証と階層性の実験的評価に成功した。

「シミュレーション技術の開発」では、近接場光が生み出す機能をシミュレーションするための数値計算法の基礎的研究、特に精度保証法に関する研究を行った。基礎となる Maxwell 方程式にまつわるモデリングおよびその逆問題に関する研究を行った。さらに、この方程式を解く陰的SimplecticFDTD法の実装化と従来のFDTD法との性能比較を行った。又近接場光に現れる現象に関する、これまでにない全く新しい数理モデルの構築を行った。

「量子機能創生のための分子架橋系およびスピクラスター系の基礎研究」では、ナノ光電子系を基礎づける分子架橋系等において、原子振動や電磁場環境・輻射場と強く相互作用する電子や励起子の量子移動とデコヒーレンス効果、散逸的伝導への移行を電子状態理論により解析する新しい理論解析法、およびこれに基づく数値計算法を開発し、素過程の解明と新機能開拓を推し進めた。同時に、量子光電子機能探索のため、局所環境制御に基づく発光性分子機能素子とスピクラスター形成の実験研究を展開している。

「ナノ情報通信システム設計理論の構築」では、デバイス微小化に伴う配線ボトルネックや既存技術との差異化等の問題を念頭に置いて、局在光励起輸送の物理的特徴的を活かし応用システムに必要な機能や論理構造を備える、光情報処理システムの基盤技術開発を推進し、アンギュラスペクトルに基づいたサブ波長領域での階層型光学応答の理論に情報理論開発、これに基づく情報容量や擾乱に対する耐性を評価、近接場光相互作用のネットワーク構造の観点からのナノ光電子機能システム構造の基礎づけを行った。今後、実験・理論研究との一層密な連携により、局在光励起輸送が可能にする新しい価値の実現を目指す。

さらにナノ光電子機能探索のための、励起輸送の素過程となる古典量子結合系の理論、局所平衡に基づく線形応答理論、局所環境という束縛条件を受けている自由度による階層性の取り扱いの具体例の研究を推し進め、経路積分の半古典近似を用いた運動方程式の導出、経路積分の方法でのナノにおいて有効となる熱揺らぎの効果に関する「揺らぎの定理」の定式化、全体として束縛条件を受けている自由度による運動の研究を、ナノ光電子機能の階層性と結び付けて推進している。

これらの研究に基づき、さらにデバイス創生研究を進展させ、研究目標の達成を目指す。

§ 2. 研究実施体制

(1)「堀」グループ

- ①研究分担グループ長:堀 裕和(山梨大学大学院、教授)
- ②研究項目
ナノ電子機能の創生
局在光励起輸送の理論展開

(2)「大石進一」グループ

①研究分担グループ長:大石 進一(早稲田大学、教授)

②研究項目

局所光シミュレーション

(3)「成瀬」グループ

①研究分担グループ長:成瀬 誠(情報通信研究機構、主任研究員)

②研究項目

局所光を用いた情報処理システムの基盤技術の研究

(4)「北原」グループ(国際基督教大学)

①研究分担グループ長:北原 和夫(国際基督教大学、教授)

②研究項目

局所光励起輸送の電磁界及び統計力学理論の展開

(5)「塚田」グループ

①研究分担グループ長:塚田 捷(東北大学、教授)

②研究項目

ナノ光電子系の理論とシミュレーション

(6)「根城」グループ

①研究分担グループ長:根城 均(物質材料研究機構、主席研究員)

②研究項目

電子トンネル励起型分子架橋ナノデバイスの研究

(7)「伊藤」グループ

①研究分担グループ長:伊藤 治彦(東京工業大学大学院、准教授)

②研究項目

近接場光ファネルを用いたスピン偏極原子誘導とスピクラスタ形成

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

研究全体の推進と取りまとめ

新時代の高機能情報処理システムの要素となるナノ領域での機能を実現するためには、ナノ機能素子の基本構造開発と、ナノとマクロを接続するシステム構想、ナノ空間での信号伝達を散逸過程および局所環境系とともに取り扱う物理モデル、さらに間接的にのみ計測可能な現象を評価できる正確な数値シミュレーションの研究を、総合的に展開することが必須である。本研究では、「スピントラップ励起移動デバイス製作」、「シミュレーション技術の開発」、「量子機能創生のための分子架橋系およびスピントラップ系の基礎研究」、「ナノ情報通信システム設計理論の構築」の研究項目を掲げ、局所光による励起輸送および近接場光の階層的性質に基づく新機能デバイス創生のコンセプトのもとに統合した総合的研究を展開することによって、「ナノ空間機能の科学」および「局所光電子系の科学」の構築を目指す。

今年度は、これまでの成果に基づき、ナノ光電子機能を動くデバイスで実証することに重点を置き、素子づくりとその評価の実験研究を強力に推進するとともに、デバイス創生研究と理論研究における多様な側面を貫く共通の着眼点を具体的な理論体系に発展させる研究を展開し、機能の複雑さや多様性を統括する具体的なコンセプトの確立を目指し、階層構造による機能が持つ意味を明確にする表現の創出を行った。最終目的を意識した研究活動を進展させ、「ナノ空間機能の科学」「局所光電子系の科学」の構築を含む目標達成を目指している。

ナノ光電子機能の創生

スピントラップ励起移動制御は、各種次元の量子井戸内に局在する励起子とその近傍に各種次元で配列させた磁性イオンとの相互作用の外部磁界による変調を基本動作原理とする。この動作原理による半導体ナノ構造系における励起移動現象を、結合量子井戸構造を用いて検証した[20]。希薄磁性半導体 (Diluted Magnetic Semiconductor, DMS) 量子井戸と非磁性半導体 (Non-Magnetic Semiconductor, NMS) 量子井戸が NMS 障壁層を介して結合する二重量子井戸構造を分子線エピタキシー (MBE) 法で作製し、DMS 量子井戸に注入した励起子 (Exciton) が NMS 量子井戸に移動する様子を強磁場極低温スピントラップ評価装置を活用した磁気光学的手法で観測した。DMS 井戸に注入された励起子は巨大ゼーマン効果によるダウンスピン状態への偏極、NMS 井戸の励起状態へのトンネル移動、基底状態へのエネルギー緩和を経て、 σ^+ 円偏光の放出を伴って消滅する。一方、直接 NMS 井戸に注入された励起子はアップスピン状態が優勢で σ^- 円偏光を放出する。NMS 井戸内局在励起子の基底状態からの発光の円偏光度を観測することで DMS 井戸から NMS 井戸への励起移動を検証した。井戸間励起移動は、両井戸に局在する励起子波動関数の空間的重なりとエネルギー共鳴状況に依存すると考えられる。これを実験的に検証するために、中間障壁層の厚みと両量子井戸局在励起子のエネルギーを変化させた一連の試料を準備した。DMS 井戸局在励起子の基底状態と NMS 井戸局在励起子の励起状態をほぼ共鳴状態にしておき、外部磁界によって共鳴状態に変調を加えた。NMS 井戸局在励起子発光の σ^+ 円偏光度は、DMS 井戸局在励起子エネルギーがゼーマンシフトして NMS 井戸局在励起子の励起準位と共鳴状態になるときに極大を示した。各量子井戸の基底および励起準位のダウンスピンとアップスピンの二次元的電子状態は、ファラデー配置の外部磁界によって零次元的なランダウ準位にそれぞれ分裂する。本実験で観測した DMS-NMS 結合量子井戸における励起移動は、

両井戸の零次元的なランダウ準位間のトンネル移動に支配されると考える。

上記の実験では励起子エネルギーを外部磁界によるゼーマンシフトで変調したが、外部電界によるシュタルクシフトの併用がデバイス応用の観点から有望である。結合量子構造の各井戸局在励起子の移動を量子閉じ込めシュタルクシフトを利用して有効に制御できるナノ構造を検討するためのシミュレーションプログラムを開発した。

これと並行して、スケールされない階層構造と散逸過程の分析から構築した、デバイス機能原理に基づいて、具体的に評価可能な光近接場励起輸送機構を実現する素子製作と評価技術開拓とこれに基づく機能評価実験研究を推進した。ナノ空間での局所光励起輸送過程と階層的近接場光相関特性の計測を可能にする、トンネル電子制御可能な透明導電膜コート近接場光プローブを独自に再現性よく作製することに成功し、これを用いて、平坦構造に埋め込まれたナノ構造における励起輸送と階層性実証実験を可能にする顕微分光装置の開発を推し進めた。今年度は前年度開発に成功した、STM計測レベルの平坦性を有し、近接場光分布に情報を持つ、背面光照射型金ナノロッド埋め込み構造試料の作製に基づいて、近接場光分布の階層性を示すデータの取得を行い、成瀬グループとの連携のもとに情報理論的解析を推し進め、階層的近接場光相関の実証に初めて成功した。さらに、分子線エピタキシー法で作製した半導体量子井戸構造における局在励起子発光過程を、開発したトンネル電子制御による近接場光プローブ顕微分光装置により計測し、近接場光励起輸送過程の計測にも成功するなど、これまでの理論研究を集約し、励起輸送と局所環境系との関わりを明確にするための基盤構築が大きく進展した。

局所光シミュレーション技術の開発

局所光シミュレーション構築の基盤である階層構造的デバイス構成と階層構造的計算手法に基づく局所光機能開発のコンセプトを具体化し、機能と散逸過程の理論解析、情報通信システム理論、計算機シミュレーション、相互作用モデル構築を推進した。

近接場光シミュレーションの精度を把握するための基本的計算技術を研究した。昨年度までに開発した、悪条件かつ巨大線形方程式の解法を利用した非線形微分方程式の境界値問題の新解法を開発した。これは、近接場光の効率的な数値シミュレーションのための基礎となる[10,11,21-24]。

さらに、FDTD シミュレーションがシンプレクティック差分法の一例になっているという観点から、より性能の良い拡張されたFDTDシミュレータの実装化を行い、機能比較を進めている。具体的には、吸収壁境界条件の研究を中心に Implicit FDTD 法スキームを研究し、ドルーデおよびローレンツモデルの実装を行った。

そして近接場光に現れる現象を理解するために、これまでにない全く新しい数理モデルを構築する事に成功した[12,13,25]。具体的には、近接場光に現れる階層構造を複雑性の概念を用いて解釈される可能性を示すと共に、近接場光が界面に与える機能についても明らかにした。

局所光励起輸送の理論展開では、ナノフォトニックデバイスの設計に必要な動作原理・シミュレーションの基礎理論を構築することを目的として、ナノ領域に局在する光とナノ物質の相互作用する系の特徴を抽出するとともに、光子と電子励起に加えて、励起移動の素過程におけるフ

フォノン、スピン自由度の働きに着目して研究を進めた。今年度は、ナノ領域での励起移動の素過程におけるフォノン、スピン自由度の働きに関して前年度までに得られた結果を統一的に理解する理論枠組みを考察し、ナノ領域における局所環境制御と局所散逸構造によるナノ機能発現の科学基盤を探求した[1,7]。

実験研究と連携した基礎理論研究を加速するため、毎月定期的な研究会を開催した。各種次元の量子ドット系とその配列、さらにスピン系の生み出す新機能とその評価も含め、実デバイス研究に結びつけるような、新しい信号輸送過程の研究領域への展開を開始した。

ナノ情報通信システム設計原理の構築

局在光の階層性に基づいた光学的相関の基礎理論の整備を進めるとともに、これを用いた機能システムの原理検討を進捗させた[2]。

具体的には、前年度までに開発した、アンギュラースペクトルに基づいたサブ波長領域での階層型光学応答の理論に対してさらに情報理論を適応して、階層型光システムの情報容量やシステムに加わる擾乱に対する耐性を評価分析した[3,26]。また、光近接場を介した光励起移動を実現するシステムを、要素となるナノ微粒子(量子ドットなど)間の近接場光相互作用のネットワーク構造ととらえて、最も効率よく光励起移動を実現する相互作用構造を示すとともに、適当な相互作用の組み込みによってシステムのロバストネス(頑健性)が創発することを示した[9]。これらの成果は、情報から見た局在光システムの基本構造を基礎づけるものでもある。

量子機能創生

ナノ光電子系の理論とシミュレーション開発については、原子振動や電磁場環境・輻射場と強く相互作用する電子や励起子の量子移動とデコヒーレンス効果、散逸的伝導への移行を電子状態理論により解析する新しい理論解析法、およびこれに基づく数値計算法を開発して、電磁場環境にあるナノ構造の電子状態や励起状態の寿命、輸送、散逸機構の解明、電子の電極分子間遷移にけるデコヒーレンスとその制御法の研究、励起子系の拡散と輸送現象の解明、の課題を研究した。トンネル電子による分子架橋デバイス系の機構については、分子架橋系における電界効果による非線形伝導についてそのメカニズムを解明し、分子発光系の素過程を理論的に研究した[16]。種々の励起モードの確率、脱励起過程、分子発熱、発生する光の性質について解析した。

実験研究では、量子光電子機能探索のために、ナノメートルスケールでの情報の相関を得るために新たな実験を試みた。ナノ光電子デバイスの動作に不可欠な、トンネル電子注入励起の基礎技術を開拓するために、これまでに開発してきたトンネル接合内の分子のトンネル電子注入発光の実験を発展させ、電磁エネルギー散逸と励起伝送機構の直接観測を目指している。具体的には、基板上に担持した発光分子と2次元ホールアレイから成るトンネル二重接合を形成し、2次元分光の手法によって、クーロン・ブロッケイドに伴う分子発光計測を通じて局所環境に依存する散逸過程を検出する実験研究を展開した。この原理を分子架橋構造に適用したデバイス化と、理論グループと連携した局所光が生み出す量子機能の探究を推し進めている。発光分子としてポルフィリン分子の核に六員環側鎖官能基を取り付けた誘導体を用い、これを側壁にスルホン酸誘導体を合成的に取り付けたカーボンナノチューブに吸着させる方法を用いて、局所環境が異なる分子

発光を計測する実験を推し進めている。

局所光機能に量子効果を付与するスピクラスタ創生の基礎技術開発では、スピクラスタ一創生局所光機能に量子効果を付与するために、コアグループと伊藤グループが協働し、前年度までに整備したスピクラスタ創生の基礎技術とアトムフォトンクスによる原子堆積技術の実験計測環境の複合装置の開発を進めた。冷却 ^{85}Rb 原子の光ポンピングによって、冷却原子の完全なスピン偏極を実現するとともに、 π 偏光による Spin Alignment も行った。さらに 2.1 nm^2 レベルの面密度でスピクラスタを形成するために、エバネッセント光ファネルの高フラックス化を行い、この結果に基づき、SOI 基板のフォトリソグラフィと化学エッチングを行って、所期のファネルを作製した[27]。また、密度汎関数法に基づきアルカリ金属原子のスピクラスタ形状および完全スピン偏極状態での結合エネルギーを計算した。併せて、前年に引き続き、原子密度を増加させる表面近傍での近接場光によるスピン偏極原子捕獲実験も進展させた。

ナノ空間励起輸送・散逸過程の解析と局所光・電子系のサイエンス構築

理論研究では、ナノ光電子機能をより具体化し、多数の半導体量子構造間の励起輸送と相関制御機構の開拓、局所光電子機能システム設計理論、ナノ光電子機能に関わる散逸と階層的接続による情報伝達等について、広い視野に立つ融合科学の基礎概念構築を目指す研究を進展させた。今年度は特に、以下の項目について研究を進展させた。

内部自由度が量子的遷移を伴う場合に、特に電磁相互作用による内部自由度の遷移について、電磁波を古典論で扱い、双極子相互作用を量子的に扱い、粒子の並進運動を半古典論であつかい、運動方程式を導出した。

さらに、ナノにおいて有効となる熱揺らぎの効果に関する「揺らぎの定理」を、経路積分の方法で定式化した。反応の速度論方程式から構築される確率過程の模型について、揺らぎの経路(時間発展)の実現確率の表式を経路積分で表現し、その経路の逆過程の実現確率との比をとると、エントロピー生成速度の時間積分の指数関数として表されることを示した。つまり、揺らぎの順過程と逆過程の実現確率と熱力学とが結びつくことを示した。非平衡状態に熱力学を拡張するためには局所平衡仮説を導入することが必要とされるが、むしろ揺らぎに関するダイナミクスから、順方向と逆方向の揺らぎの実現確率から新たな「エントロピー」を定義して、非平衡過程でも適応できる熱力学を構築する可能性がでてきた。

局所環境と結合した励起輸送過程を取扱う基礎として、拘束条件付き力学系の理論展開に注目した研究を推し進めているが、今年度はその具体化として、DNA 分子において電子が運動する際の「スピン・軌道相互作用」が、空間のらせん的な構造から受ける影響という問題に着目し、らせん運動による軌道角運動量の変動によるスピン緩和を古典的模型で求めた。根本的には、スピン・軌道相互作用の導出をディラック方程式まで遡って、歪んだ空間におけるディラック方程式を Foldy-Wouthuysen 変換に基づく非相対論近似でスピン軌道相互作用を導出する必要があることを見出し、今後その研究を展開する。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. 小林 潔, “ナノ領域における光近接場現象とその応用,” 表面科学 30, 638-641 (2009).
2. 成瀬 誠、堅 直也 : ナノフォトニクス of システムアーキテクチャ: 物理的基礎からシステムとしての機能へ、表面科学、第30巻、第11号、pp. 620-625、2009年11月 DOI: 10.1380/jsssj.30.620
3. M. Naruse, H. Hori, K. Kobayashi, M. Ishikawa, K. Leibnitz, M. Murata, N. Tate, and M. Ohtsu: Information theoretical analysis of hierarchical nano-optical systems in the subwavelength regime, *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 26, No. 9, pp. 1772-1779, September 2009. DOI:10.1364/JOSAB.26.001772
4. M. Naruse, T. Yatsui, T. Kawazoe, H. Hori, N. Tate, and M. Ohtsu: Shape-Engineered Nanostructures for Polarization Control in Optical Near- and Far-Fields, *Progress in Nano-Electro-Optics VII, Chemical, Biological, and Nanophotonic Technologies for Nano-Optical Devices and Systems, Springer Series in Optical Sciences, Vol. 155* (Springer, Berlin, 2009), pp. 131-145 DOI: 10.1007/978-3-642-03951-5
5. T. Kawazoe, H. Fujiwara, K. Kobayashi, and M. Ohtsu, “Visible light emission from dye molecular grains by infrared excitation based on the nonadiabatic transition induced by the optical near field,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 15, 1380-1386 (2009). DOI:10.1109/JSTQE.2009.2014781
6. K. Kobayashi, A. Sato, T. Yatsui, T. Kawazoe, M. Ohtsu, “New aspects in nanofabrication using near-field photo-chemical vapor deposition,” *Applied Physics Express* 2, 075504 (2009). DOI: 10.1143/APEX.2.075504
7. A. Sato, Y. Tanaka, F. Minami, and K. Kobayashi, “Photon localization and tunneling in a disordered nanostructure,” *Journal of Luminescence* 129, 1718-1721 (2009). DOI:10.1016/j.jlumin.2009.02.032
8. T. Yatsui, S. Sangu, K. Kobayashi, T. Kawazoe, M. Ohtsu, J. Yoo, and G.-C. Yi, “Nanophotonic energy up conversion using ZnO nanorod double-quantum-well structures,” *Applied Physics Letters* 94, 083113 (2009). DOI:10.1063/1.3090491
9. M. Naruse, T. Kawazoe, R. Ohta, W. Nomura, and M. Ohtsu: Optimal mixture of randomly dispersed quantum dots for optical excitation transfer via optical near-field interactions, *Physical Review B*, Vol. 80, No. 12, pp. 125325 1-7, September 2009. DOI: 10.1103/PhysRevB.80.125325
10. T. Ogita, S. Oishi: Tight Enclosures of Solutions of Linear Systems, *International Series of Numerical Mathematics*, 157 (2009), 167-178.
11. S. Oishi, K. Tanabe: Numerical Inclusion of Optimum Point for Linear Programming, *JSIAM*

- Letters Vol.1, 5–8 (2009).
12. Y. Ogasawara and A. Kitada: Addendum to "A Consideration of the Morphological Stability of an Interface", *Journal of the Physical Society of Japan*, 78 (2009) 57001, 10.1143/JPSJ.78.057001.
 13. Y. Ogasawara: Flattening property of a surface due to optical assisted chemical near-field etching, *Applied Physics B (Lasers and Optics)*, 97 (2009) 1, 10.1007/s00340-009-3703-9.
 14. Y. Otsuka and M. Tsukada, Theoretical Study of Crystal Structures and Energy Bands of Polyacene and Pentacene Derivatives, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 78 (2009)024713-1~11
 15. B. Masago, S.Watanabe, K.Tagami and M.Tsukada, Simulation of Non-contact Atomic Force Microscopy on Hydrogen and Methyl Terminated Si(001) Surfaces, *Jpn. J. Appl. Phys.* 48 (2009) 025506
 16. M. Tsukada, K.Mitsutake, Theory of Dissipative Electron Transfer of a Molecule at the Interface, *J.Phys. Soc. Jpn.*, 78 (2009) 084701-1~11
 17. M. Araidai and M. Tsukada, Diffusion Processes in Single-Atom Electro-migration along a Good Chain: First-Principles Calculations, *Phys. Rev. B*80 (2009) 045417
 18. H. Tamura, Coherent transfer via environment-induced vibronic resonance, *J. Chem. Phys.* 130, 214705-1-8 (2009).
 19. H. Kashiwagi, H. Ito, "Microfabricated evanescent-light funnel with high-intensity cold atom flux," *Optics Communications*, Vol.282 (2009) 4543-4547 DOI: 0.1016/j.optcom.2009.08.037
 20. T. Matsumoto, K. Omori, K. Nakamura, T. Muranaka, and Y. Nabetani, MBE growth and magneto-optical properties of ZnCdSe-ZnMnSe wire systems, *Phys. Status Solidi (c)* vol.6, p.p. 1339-1342 (2009) . DOI 10.1002/pssc.200881197
 21. T. Ogita, S. Oishi: Fast Verified Solutions of Linear Systems, *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 26(2009)169.
 22. K. Ozaki, T. Ogita, S. M. Rump, S. Oishi: Adaptive and Efficient Algorithm for 2D Orientation Problem, *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 26(2009)215.
 23. S. Oishi, T. Ogita, S. M. Rump: Iterative Refinement for Ill-conditioned Linear Systems, *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 26(2009)465.
 24. Y. Nakaya, T. Nishi, S. Oishi and M. Claus: Numerical Verification of Five Solutions inTwo-transistor Circuits, *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 26(2009)327.
 25. Y. Ogasawara: Sufficient Conditions for the Existence of a Primitive Chaotic Behavior, *Journal of the Physical Society of Japan*, 79 (2010) 15002, 10.1143/JPSJ.79.015002.
 26. N. Tate, M. Naruse, T. Yatsui, T. Kawazoe, M. Hoga, Y. Ohyagi, T. Fukuyama, M. Kitamura, and M. Ohtsu, "Nanophotonic code embedded in embossed hologram for

- hierarchical information retrieval,” *Optics Express*, 18, 7497–7505 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.007497
27. H. Kashiwagi, H. Ito, “Atom Funnel with a Micron-Sized Outlet Using Evanescent Light,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.49 (2010). 012001 DOI: 10.1143/JJAP.49.012001).
 28. K. Ohmori, K. Kodama, T. Muranaka, Y. Nabetani and T. Matsumoto: Tunneling of spin polarized excitons in ZnCdSe and ZnCdMnSe coupled double quantum wells, *Phys. Status Solidi. (c)*, in press.
 29. A. Sato, F. Minami, H. Hori, and K. Kobayashi, “Spin information achieved by energy transfer via optical near fields between quantum dots and its robustness,” *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 7, 1–10 (2010). DOI:10.1166/jctn.2010.1534
 30. Birkenes, T.Matsui, K.Tanabe et al.: Penalized Logistic Regression with HMM Log-Likelihood Regressors for Speech Recognition, to appear in *IEEE Trans. SAP*.
 31. H. Tamura, J.M. Mallet, M. Oheim, and I. Burghardt, Ab initio study of excitation energy transfer between quantum dots and dye molecules, *J. Phys. Chem. C*, 113, 7548–7552 (2009).
 32. D. Masago and M. Tsukada, Simulated Force Map of Atomic Force Microscopy on Si(111)-(5×5)-DAS Surface, *e-J. Surf. Sci. and Techn.*, in press
 33. N. S. Venkataramanan, A. Suvitha, H. Nejo, Y. Kawazoe, Electronic structures and spectra of symmetric meso-substituted porphyrin ; DFT and TDDFT - PCM investigations, *Int. J. Quantum. Chem.* Accepted
 34. T. Muranaka, S. Iizuka, M. Hishikawa, K. Kodama, K. Ohmori, Y. Nabetani and T. Matsumoto, Structural and optical properties of ZnSe-based diluted magnetic semiconductor quantum-well wire arrays by wet chemical etching, *Phys. Status Solidi. (c)*, in press.

(4-2) 特許出願

CREST 研究期間累積件数(国内 2 件)