

戦略的創造研究推進事業
発展研究 (SORST)

研究終了報告書

研究課題「ナノフォトリックデバイスとシステムの開発」

研究期間： 平成 15 年 10 月 1 日～
平成 21 年 3 月 31 日

大津 元一

(東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻、教授)

1. 研究課題名

本研究では情報キャリアとして近接場光を用いるナノフォトニックデバイスを開発する。また、近接場光を用いた新しい加工技術を開発するとともに、既存の光デバイス加工などへの応用を試みる。さらに、ナノフォトニックデバイスを用いた新しい情報伝送システムを検討する。主要な研究項目、具体的手法、進め方は下記のとおりである。

(1) ナノフォトニックデバイス

ナノ物質間の近接場光エネルギー移動にもとづくナノフォトニックデバイスを作製する。特に基本的なデバイスとして、次を開発する。

(1-1) ナノフォトニック・スイッチ：量子ドット間の共鳴エネルギー準位間での近接場光エネルギー移動を利用した微小な光-光スイッチを実現する。

(1-2) 各種の論理演算デバイス：(1-1)のデバイスを雛形とすると、AND, XOR, 遅延回路、バッファメモリなどのデバイス動作が可能であることを理論解析済みなので、これらを検証する。

これらのデバイス動作の検証のためにはポテンシャルエネルギーが深く有効なキャリア閉じ込めが可能な CuCl 量子ドットを使う予定である。さらに室温動作のためには、励起子の結合エネルギーが大きく室温でも振動子強度の大きな励起子エネルギー準位を利用出来ることなどの理由から GaN 系、ZnO 系の量子ドットが有望であると結論している。これらの材料を使うことにより、ポテンシャル障壁高さを調整し、室温動作が可能になる。なお、将来の電子デバイスとの整合性の可能性を探るために、上記材料のみでなく Si 基板上に Si ナノドットを作製し、発光、スイッチングデバイスの製作についても検討する。

上記のナノフォトニックデバイスへの光信号印加・取り出し、外部の巨視的な光デバイスとの間の光信号授受のために必要な光配線を実現する為、次のインターコネクション用デバイスを開発する。

(1-3) ナノフォトニック配線：ナノ金属微粒子列の間の近接場光エネルギー移動の寸法依存共鳴特性を利用して微小スポット径の光配線を開発する。

(1-4) ナノフォトニック集光器：ナノフォトニックデバイスと上記(1-3)のナノフォトニック配線との光信号授受の効率を上げるために、ナノ金属微粒子配列によるプラズモン集光器を開発する。また、この集光機能を引き出すために半導体量子ドット間の近接場光エネルギー移動の効果なども利用して、集光効率の増大を図る。

(2) ナノ光加工

(2-1) ナノフォトニックデバイス製作のための加工法の開発

(1)のナノフォトニックデバイスは半導体の量子ドット、金属の微粒子と細線などから構成されるが、これらの物質を加工・製作する時、その寸法精度、位置精度は数 nm 必要である。これを実現するために ERATO 大津局在フォトンプロジェクトが開発した近接場光による化学気相堆積法を用い、さらに前期核形成、および近接場光による化学エッチングを併用する。特に、近接場光固有の非断熱過程を利用した化学気相堆積法を積極的に利用する。同時に、以上の加工法を既存の光デバイスなどの製作へ応用する可能性も探る。

(2-2) 一括加工法の開発

(2-1)の化学気相堆積に関して大面積にわたる一括加工の方法を開発する。これには基板に吸着した物質における光吸収の寸法依存共鳴を利用した近接場光脱離法を開発して用いる。

(2-3)一括露光近接場光リソグラフィの開発

近接場光による一括転写の概念をより広範化するために、一括転写による近接場光リソグラフィを開発する。近接場光理論にもとづくマスク設計、電子ビーム加工によるマスク製作の後、このマスクを通した一括近接場露光によるリソグラフィ法を確立する。加工幅と深さのアスペクト比を大きくするために二段階プロセス（近接場光によるリソグラフィとプラズマエッチング）なども利用し、数 10nm のパターン描画を確立する。これらを総括して、近接場光リソグラフィ装置の実用的雛形を開発する。(2-1)と同様に、近接場光固有の非断熱過程を利用したリソグラフィの可能性も探る。

(2-4) 一括露光近接場光ナノインプリントの開発 (H16 年度追加課題)

立体形状物質表面に近接場光を発生させ、それを対象物質に密着させた上で近接場光を発生させ、それが引き起こす局所的な光化学反応を利用した新しい一括露光加工としての近接場光ナノインプリント技術を開発する。さらにその応用可能性も検討する。

(2-5) 酸化亜鉛ナノロッドを用いた近接場光触媒の開発 (H17 年度追加課題)

ZnO ナノロッド先端に発生する近接場光により、可視光領域で高効率な光触媒効果を発現させる技術を開発する。

(2-6) 近接場光化学エッチング手法の開発 (H18 年度追加課題)

化学エッチングに近接場光を援用し、フォトマスクやプローブなどが不要で、大面積にわたり自己組織的に形状・寸法が制御できる加工技術を開発する。

(2-7) GaN ナノ微結晶によるナノフォトニックデバイスの作製 (H18 年度追加課題)

光学特性の優れた GaN ナノ微結晶を作製する方法を開発し、それによりナノフォトニックデバイス作製への応用可能性を検討する。

(3) ナノフォトニックシステムの構築

ナノフォトニックデバイスによって構成される新しい光情報伝送システム、すなわち超高速光時間分割多重(OTDM)通信方式、ルータシステムの構築の可能性を探り、さらに情報処理システム、計測システムなどの応用システムの可能性も検討する。

2. 研究実施の概要

研究全体の概要

本研究は平成10年10月～15年9月に実施したERATO大津局在フotonプロジェクトのうち、ナノ寸法の光デバイスすなわちナノフォトニックデバイスの動作を検証しその加工法を開発する研究テーマを継続して近接場光の局在性に基づく固有の現象、機能のさらなる解明とその応用を展開することを目標とする。すなわちナノフォトニックデバイスを実用化するための雛形を開発する。そのための加工法としてナノ光化学気相成長などの研究成果を継続させ発展させる。さらに、新しい情報伝送システムを検討し、それを実現するためのナノフォトニックデバイスの性能向上を目指す。

近接場光は国内外で顕微鏡、分光計測に広く応用されており、バイオへの応用も盛んである。しかし本研究はその応用研究を脱却し、他に先駆けてナノフォトニックデバイス構築、ナノ光加工へと進むものである。本SORSTプロジェクト発足時点において欧米の研究機関からは本研究に相当する概念はまだ提案されておらず、本研究は純粋に日本発の概念に基づく。回折限界を超えて光デバイス寸法をナノ化するために「情報のキャリアとして伝搬光ではなく近接場光を使い、近接場光エネルギーを少数個のナノ寸法物質間で転送すること」が本研究の基本構想であり、独創的な点である。すなわちナノフォトニックデバイス内部では隣り合うナノ物質が近接場光を媒介として局所的電磁相互作用を行い、相互に結合した状態になっており、このように結合した微小な系（ナノ系と呼ぶ）が、それよりずっと寸法の大きな巨視系（ナノ物質用の基板、入射光等から成る）に囲まれている。従って伝搬光を使う場合には見られないエネルギーの移動（非共鳴エネルギー移動）がナノ物質間で起こる。すなわちナノ系のみ注目すると各種物理量の保存則からのずれが生じる。本研究ではこれらの効果を十分に活用する。

21世紀の高度情報化・高度福祉化社会は光情報通信、光情報記録、光情報表示、光情報入出力インターフェースなどのシステムの高性能化を強く要求している。それを支えるハードウェアとしてナノフォトニックデバイスの開発、そのためにナノ光加工技術の開発が必要不可欠であるが、最近国内外の産業界でこの必要性が強く認識されるようになった。たとえば我が国の光産業界の技術予測によると次世代の大容量高速光ファイバ通信システムを支える光交換機には多数の光スイッチからなるアレイが必要とされているが、そのためには各光スイッチのデバイス寸法を100nm以下まで小型化し、超低消費電力化する必要がある。しかし既存の光デバイスの性能をいかに向上させても光の回折限界のためにこの小型化は原理的に不可能である。言い換えると、情報キャリアとして通常の伝搬光を使っている限り、光デバイス寸法は回折限界を超えて微小化することはない。この限界を超えるには光技術のパラダイムシフトが不可欠である。一方、光加工では社会は100nm以下の寸法のパターンを加工できる光技術を要求している。既存の光リソグラフィでは光の回折限界の枠組みの中で100nm以下が可能と言われているが、そのための短波長光源装置が極めて高額である。一方、将来は多品種少量の新規なデバイスを製造する必要性が増大し、特にナノフォトニックデバイスのためには独創性に富みかつ安価なナノ寸法光加工技術とその装置が必須である。本SORSTプロジェクトはこれらの社会的要求に答える新技術の基礎を開発する事も構想に含める。

以上の構想のもとに本研究では情報キャリアとして近接場光を用いるナノフォトニックデバイスを開発した。また、近接場光を用いた新しい加工技術を開発するとともに、既存の光デバイス加工などへの応用を試みた。さらに、ナノフォトニックデバイスを用いた新しい情報伝送・記録システムを検討した。主要な成果は下記のとおりである。

(1) ナノフォトニックデバイス

ナノ物質間の近接場光エネルギー移動と高速緩和を利用してナノ寸法の光デバイスを提案した。それにもとづくデバイス事例として、論理ゲートの基本形態である AND ゲート（ナノフォトニック・スイッチ）、NOT ゲートを提案

し、CuCl 量子ドットを用いた低温での実験によりその動作を検証した。また ZnO ナノロッド中の多重量子井戸、InAlAs 量子ドットを用いて室温動作が可能であることを確認した。また、これらのデバイスが単一光子動作することを検証し、極めて少ないエネルギーで動作することを確認した。このゲート動作原理を応用して OR, NOR, NAND ゲートなどを考案し、論理ゲートの完備系が形成できることを示した。また、これらのデバイス間の接続、または外部の巨視的寸法（光波長以上）をもつ従来型光デバイスとの接続のための配線デバイス、集光デバイスを開発した。特にナノフォトニック集光器は光合成バクテリアの光捕獲と類似の機能をもつバイオミメティックデバイスであり、その集光効率も極めて高い。また、これを応用してナノ光バッファを提案し、その動作を確認した。

(2) ナノ光加工

我々が見出した非断熱過程を使った新しいナノ寸法加工法を開発した。非断熱過程とはナノ寸法物質において近接場光とフォノンとが結合し、そのエネルギーが被加工物質に移動するとき、フォノンによって物質中の分子振動準位が励起され、それを經由して電子励起される現象である。これにより、従来の光微細加工で必須であった短波長光源（紫外線、X線など）が不要となり、さらにはフォトマスクなども不要となる技術を開発することができた。

まず非断熱過程の原理を確認するために光化学気相堆積（光CVD）を実施し、実験結果と理論結果とが良く一致する事を示した。また、これを光リソグラフィに応用し、微細パターンの形成の実証、加工装置の実用的ひな形の構築、さらにこれを用いて上記(1)のナノフォトニックデバイスの作製、次に軟X線用回折格子やゾーンプレートを作製することによって、その実用性を示した。また、この非断熱過程を光周波数上方変換と捉えることにより半導体光検出器の受光波長範囲拡大に応用することができた。

さらにこれを光アシストのスツパタリングに応用し、寸法と間隔のそろった金属微粒子列を形成した。次に、光アシスト化学エッチングに応用し、Ga₂O₃細線を形成した。これらの2つの応用例はフォトマスクなどの不要な自己組織型の加工法であり、大面積一括加工への道を開いたと言える。

この他、関連する成果として、酸化亜鉛ナノロッドの結晶成長とそのフレキシブル基板上への垂直配向、近接場光アシストによるナノインプリントとその金微粒子析出への応用、さらには酸化亜鉛による光触媒機能の検証、光化学気相堆積による光学特性にすぐれたGa₂O₃微結晶の作製を実施して、ナノ加工技術のさらなる展開の方向を検討した。

(3) ナノフォトニックシステムの構築

ナノフォトニックデバイスによって構成される新しい光情報伝送システム、すなわち超高速光時間分割多重(OTDM)通信方式、ルータシステムの構築の可能性を探るために、光ナノCAM(Content Addressable Memory)のシステム動作実験を行った。このシステムでは入力端に Summation 機能が、出力端には Broadcast 機能が必要であるが、前者には上記(1)のナノフォトニック集光器を、後者にはナノフォトニック・スイッチをそれぞれ用いて構成した。その結果、超高集積光ノードの重要機能である光宛先検索の基本機能が実現可能である事を示す事が出来た。

この他、近接場光の空間的特徴である階層性を利用した、光メモリを提案し、ナノ寸法の金属パターンを作製してその動作を検証することができた。

個別課題毎の概要

(1) ナノフォトニックデバイス

(1-1) ナノフォトニック・スイッチ

NaCl 結晶中の CuCl 量子ドットを用いて、低温にてスイッチ動作を実現した（立ち上がり時間 25ps）。これを応用して NOT ゲートの動作を実現した。また、単一光子発生を検証し、超低エネルギー動作でバイスであることを実証した。

室温動作のために ZnO ナノロッド中の多重量子井戸を用い、スイッチ動作を実現するとともに、周波数上方変換（エネルギーアップコンバージョン）現象を見いだした。さらに ZnO のナノ微粒子を作製しスイッチ動作の基礎となる近接場光エネルギー移動を確認した。また、同じく室温動作可能な材料として InAlAs を採用しその量子ドットを作製して NOT ゲート動作を確認した。

(1-2) 各種の論理演算デバイス

ナノフォトニック・スイッチ（AND ゲート）、NOT ゲートの動作を組み合わせることであり、OR, NOR, NAND ゲートなどを提案し、論理ゲートの完備系が構築できる可能性を示した。また、システム応用のために Broadcast 型インターコネクション技術を開発した。これに関連し近接場光エネルギー移動における章動を制御して光バッファ動作を実現した。

(1-3) ナノフォトニック配線

金属ドット列の配列によるプラズモン・ポラリトン結合器を作製し、低伝送損失を実現した。また曲げ損失が低い事を確認した。さらに集光機能を付加した。

(1-4) ナノフォトニック集光器

大きさの異なる多数の CuCl 量子ドットを用い、近接場光エネルギー移動と高速緩和を利用した集光器を開発した。伝搬光エネルギーを直径 20nm の領域に集中させることができた。このデバイスを光ナノファウンテンと命名した。これを応用して光信号ディレイ機能を検証し、寸法 100nm の微小空間にて 300ps の遅延時間を得る事が出来た。

(2) ナノ光加工

(2-1) ナノフォトニックデバイス製作のための加工法の開発

我々の見いだした非断熱過程を用いて近接場光化学気相堆積（CVD）技術を開発し、光学不活性物質（ビスアセチルアセトナート亜鉛）を近接場光で解離して $5 \times 10 \times 0.3 \text{ nm}^3$ という最小体積の Zn 微粒子の堆積に成功した。これらを用いて ZnO 微粒子を作製すれば室温動作可能なナノフォトニックデバイスを構築する事が期待できる。また、成長温度を制御する事により直径 10nm 程度の極めて細い ZnO ナノロッドを基板に垂直に作製する技術を開発した。さらにこれをフレキシブル基板（ポリイミドフィルム）に成長することに成功した。これらの実験に加え、上記の CVD の特性を説明するための理論的考察を行い、実験結果とよい一致を得た。これらの結果を応用して紫外線受光素子の可視帯域への感度拡大を提案し、GaN を対象として実験を行い波長 532nm まで帯域を拡大する事に成功した。

(2-2) 一括加工法の開発

基板の広い面積にわたり一括加工するためのファイバプローブやフォトマスクなどの不要な方法として、光照射により成長中の物質表面に近接場光を発生させ、脱離を促進して自己組織的に寸法を制御する方法を開発した。これにより Al, Pt などの金属の微粒子列、さらには GaN の微粒子の寸法制御に成功した。

(2-3) 一括露光近接場光リソグラフィの開発

我々の見いだした非断熱過程の原理に基づき可視光源を用いた近接場光リソグラフィを開発した。これにより光学不活性な材料である電子線レジストにもパターンを形成できる事を示した。基礎特性として、加工深さの露光時間依存性を評価し、非断熱過程独特のしきい値特性を見いだした。この加工法を使い、(1-1)で記した NOT ゲート用 InAs 量子ドットの二次元、一次元配列を作製した。さらなる応用範囲の拡大のために、短波長光や軟 X 線を集光する為のゾンプレート作製の試みを行った。シリコン基板上の Ta 膜を加工し波長 325nm の光に対し 500nm 以下のスポット径まで集光する機能を確認した。

(2-4) 一括露光近接場光ナノインプリントの開発(追加課題)

モールドに光を照射しその先端・端部に発生する近接場光を利用したナノインプリント法を提案した。これを認証システム(鍵と鍵穴システム)の作製に応用するために、(2-1)で作製した ZnO ナノロッドを用いて塩化金酸を含有するスピノングラス中から金微粒子を析出することに成功した。

(2-5) 酸化亜鉛ナノロッドを用いた近接場光触媒の開発(追加課題)

ZnO ナノロッド先端に発生する近接場光により水中にて ZnO の窒化を確認し、光触媒効果を検証することができた。

(2-6) 近接場光化学エッチング手法の開発(追加課題)

化学エッチングにより加工される物質に光を照射し、その表面に発生する近接場光で加工寸法・形状を制御する方法を提案し、直径 10nm 以下の GaN の細線の作製に成功した。また寸法依存の量子効果による発光スペクトルのブルーシフトを確認する事が出来た。

(2-7) GaN ナノ微結晶によるナノフォトニックデバイスの作製(追加課題)

我々は GaN を低温で成長させるための光化学気相堆積法を開発したが、これを用いて紫外域で強い発光を示す GaN 微粒子の作製に成功した。これを用いてナノフォトニックデバイスを構成する為の課題についても検討した。

(3) ナノフォトニックシステムの構築

情報通信システムへの応用として複数のナノフォトニックデバイスを組み合わせて Content Addressable Memory (CAM) システムのひな形を構成した。すなわち(1)に記した CuClによるナノフォトニック集光器を用いた 3 ビットのデータ和算機能、3つのナノフォトニック・スイッチを用いた 3 チャンネルの同報機能により、ナノ寸法領域で超低消費エネルギー動作するシステムを実証することができた。さらに情報処理システムへの応用を展開する為に、近接場光相互作用における階層性を利用して痕跡記録機能を有する光メモリを提案し、金属ナノパターンを作製してその機能を実証することができた。

3. 研究構想

【研究開始時に設定した目標】

平成10年10月～15年9月に実施したERATO大津局在フォトプロジェクトでは「近接場光とは何か？ その光科学技術への寄与は何か？」についての基礎研究を行い、次の成果を得た。(1)巨視的な系に埋もれたナノ寸法系としての近接場光と少数ナノ物質との間の局所的電磁相互作用を記述する量子論を開発し、ナノ寸法デバイスの可能性を明らかにした。(2)ナノ寸法の光デバイスすなわちナノフォトニックデバイスの動作を検証しその加工法を開発した。(3)近接場光による双極子力を用いて超高真空中の気相の中性原子の熱運動制御法を開発した。

本研究では上記のうち(2)を継続して近接場光の局在性に基づく固有の現象、機能のさらなる解明とその応用を展開する。すなわちナノフォトニックデバイスを実用化するための雛形を開発する。そのための加工法としてナノ光化学気相成長、ナノ光エッチングの研究成果を継続させ発展させる。さらに、新しい情報伝送システムを検討し、それを実現するためのナノフォトニックデバイスの性能向上を目指す。

上記「2. 研究実施の概要」でも記したが、近接場光は国内外で顕微鏡、分光計測に広く応用されており、バイオへの応用も盛んである。しかし本研究はその応用研究を脱却し、他に先駆けてナノフォトニックデバイス構築、ナノ光加工へと進むものである。本SORSTプロジェクト発足時点において欧米の研究機関からは本研究に相当する概念はまだ提案されておらず、本研究は純粋に日本発の概念に基づく。回折限界を超えて光デバイス寸法をナノ化するために「情報のキャリアとして伝搬光ではなく近接場光を使い、近接場光エネルギーを少数個のナノ寸法物質間で転送すること」が本研究の基本構想である。21世紀の高度情報化・高度福祉化社会を支えるハードウェアとしてナノフォトニックデバイスの開発、そのためにナノ光加工技術の開発が必要不可欠である。しかし既存の光デバイスの性能をいかに向上させても光の回折限界のためにこの小型化は原理的に不可能である。言い換えると、情報キャリアとして通常の伝搬光を使っている限り、光デバイス寸法は回折限界を超えて微小化することはない。この限界を超えるには光技術のパラダイムシフトが不可欠である。一方、光加工では社会は100nm以下の寸法のパターンを加工できる光技術を要求している。既存の光リソグラフィでは光の回折限界の枠組みの中で100nm以下が可能と言われているが、そのための短波長光源装置が極めて高額である。一方、将来は多品種少量の新規なデバイスを製造する必要性が増大し、特にナノフォトニックデバイスのためには独創性に富みかつ安価なナノ寸法光加工技術とその装置が必須である。本SORSTプロジェクトはこれらの社会的要求に答える新技術の基礎を開発する事も構想に含める。

【研究計画と進め方の概要】

本研究では情報キャリアとして近接場光を用いるナノフォトニックデバイスを開発する。また、近接場光を用いた新しい加工技術を開発するとともに、既存の光デバイス加工などへの応用を試みる。さらに、ナノフォトニックデバイスを用いた新しい情報伝送システムを検討する。主要な研究項目、具体的手法、進め方は下記のとおりである。

(1)ナノフォトニックデバイス

ナノ物質間の近接場光エネルギー移動にもとづくナノフォトニックデバイスを作製する。特に基本的なデバイスとして、次を開発する。

(a)ナノフォトニック・スイッチ：量子ドット間の共鳴エネルギー準位間での近接場光エネルギー移動を利用した微小な光スイッチを実現する。

(b)各種の論理演算デバイス：(a)のデバイスを雛形とすると、AND ゲート, NOT ゲート, バ

ップメモリなどのデバイス動作が可能であることを理論解析済みなので、これらを検証する。

これらのデバイス動作の検証のためにはポテンシャルエネルギーが深く有効なキャリア閉じ込めが可能な **CuCl** 量子ドットを使う予定である。さらに室温動作のためには、励起子の結合エネルギーが大きく室温でも振動子強度の大きな励起子エネルギー準位を利用出来ることなどの理由から **GaN** 系、**ZnO** 系の量子ドットが有望であると結論している。これらの材料を使うことにより、ポテンシャル障壁高さを調整し、室温動作が可能になる。

上記のナノフォトニックデバイスへの光信号印加・取り出し、外部の巨視的な光デバイスとの間の光信号授受のために必要な光配線を実現する為、次のインターコネクション用デバイスを開発する。

(c)ナノフォトニック配線：ナノ金属微粒子列の間の近接場光エネルギー移動の寸法依存共鳴特性を利用して微小スポット径の光配線を開発する。

(d)ナノフォトニック集光器：ナノフォトニックデバイスと上記**(c)**のナノフォトニック配線との光信号授受の効率を上げるために、ナノ金属微粒子配列によるプラズモン集光器を開発する。また、この集光機能を引き出すために半導体量子ドット間の近接場光エネルギー移動の効果なども利用して、集光効率の増大を図る。

(2) ナノ光加工

(2-1) ナノフォトニックデバイス製作のための加工法の開発

(1)のナノフォトニックデバイスは半導体の量子ドット、金属の微粒子と細線などから構成されるが、これらの物質を加工・製作する時、その寸法精度、位置精度は数 nm 必要である。これを実現するために ERATO 大津局在フォトンプロジェクトが開発した近接場光による化学気相堆積法を用い、さらに前期核形成、および近接場光による化学エッチングを併用する。特に、近接場光固有の非断熱過程を利用した化学気相堆積法を積極的に利用する。同時に、以上の加工法を既存の光デバイスなどの製作へ応用する可能性も探る。

(2-2) 一括加工法の開発

(2-1)の化学気相堆積に関して大面積にわたる一括加工の方法を開発する。これには基板に吸着した物質における光吸収の寸法依存共鳴を利用した近接場光脱離法を開発して用いる。

(2-3) 一括露光近接場光リソグラフィの開発

近接場光による一括転写の概念をより広範化するために、一括転写による近接場光リソグラフィを開発する。近接場光理論にもとづくマスク設計、電子ビーム加工によるマスク製作の後、このマスクを通した一括近接場露光によるリソグラフィ法を確立する。加工幅と深さのアスペクト比を大きくするために二段階プロセス（近接場光によるリソグラフィとプラズマエッチング）なども利用し、数 10nm のパターン描画を確立する。これらを総括して、近接場光リソグラフィ装置の実用的雛形を開発する。(2-1)と同様に、近接場光固有の非断熱過程を利用したリソグラフィの可能性も探る。

(3) ナノフォトニックシステムの構築

ナノフォトニックデバイスによって構成される新しい光情報伝送システム、すなわち超高速光時間分割多重(OTDM)通信方式、ルータシステムの構築の可能性を探り、さらに情報処理システム、計測システムなどの応用システムの可能性も検討する。

以上のように ERATO 大津局在フォトンプロジェクトで推進した基礎研究成果のうち、実用化が有望なものを継続させ発展させるが、これらは産業界から注目され、要望されている。この状況のもとに、本研究では、特に(2-3)については産業界からの参画があるので、共同研究を行う。

【その後の新展開から生まれた目標等】

上記のうち「(2)ナノ光加工」の研究の遂行とともに、新たに一括露光近接場光ナノインプリント、酸化亜鉛ナノロッドを用いた近接場光触媒、近接場光化学エッチング手法、GaN ナノ微結晶によるナノフォトニックデバイスの作製の構想を得たので、これらの可能性を検証することを新たな目標とし、追加課題として研究を行った。

【サブグループ毎の役割分担】

ERATO 大津局在フォトンプロジェクトで推進した基礎研究成果のうち、実用化が有望なものを継続させ発展させたが、これらは産業界から注目され、要望されている。この状況のもとに、本研究では、特に「一括露光近接場光リソグラフィの開発」については産業界からの参画があったので、共同研究を行った。

研究チームの構成としては研究代表者のもとに研究員が研究開発に従事するが、材料、加工、デバイス、システムに関する本研究課題は互いに密接に連携している。従って各研究員をグループ化し、個別の研究課題に従事させることは避け、相互に有機的に協力して研究を推進させた。この理由によりグループを設けなかった。各研究員の研究項目などは下記のとおりである。

(1) 八井 崇

(研究項目) インターコネクション用光デバイス、ナノフォトニックデバイスの作製、ナノフォトニックシステムの検討。

(2) 川添 忠

(研究項目) ナノフォトニックデバイス、そのための加工法確立、一括転写近接場光リソグラフィ、ナノフォトニックシステムの検討。

(3) 折出秋儀

(研究項目) 研究チーム管理。ナノフォトニックシステムの検討。

(4) 福田 浩章 ((株) リコーとの共同研究による派遣研究員)

(研究項目) ナノフォトニックデバイスとその加工。

(5) 納谷 昌之 ((株) 富士写真フイルムとの共同研究による派遣研究員)

(研究項目) 一括露光近接場光リソグラフィとナノ周期構造光デバイス。

(6) 大川 秀樹 ((株) 東芝との共同研究による派遣研究員)

(研究項目) 近接場光リソグラフィ用のレジスト材料、プロセス開発。

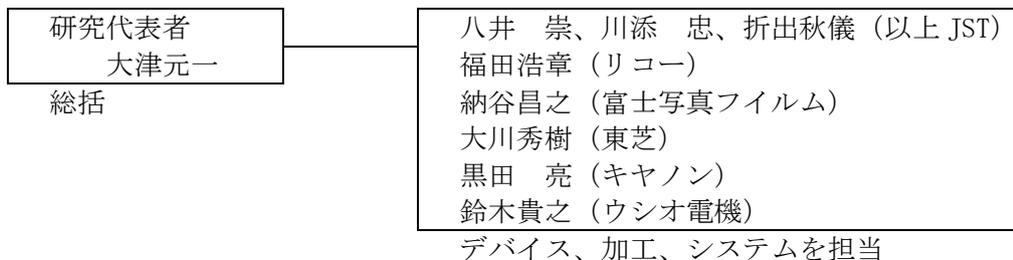
(7) 黒田 亮 ((株) キヤノンとの共同研究による派遣研究員)

(研究項目) 近接場光リソグラフィの露光装置開発。

(8) 鈴木貴之 ((株) ウシオ電機との共同研究による派遣研究員)

(研究項目) ナノ光加工、近接場光リソグラフィのための光源開発。

研究員の構成の概略は下図のとおりである。



4. 研究実施内容

4. 1 ナノフォトニックデバイス

(4.1.1) ナノフォトニック・スイッチ

(1)実施の内容

平成15年度はNaCl結晶中に分散成長させたCuCl量子ドットを用いたナノフォトニックスイッチの動的動作特性を評価した。これは、本研究テーマにて作製を進めるナノフォトニックデバイスの性能の指標を得るための重要な案件である。近接場顕微鏡分光装置を用いた発光ポンプ・プローブ法によって実験結果を得た。その結果、25psの高速動作（立ち上がり時間）を観測した。また、スイッチ信号の減衰時間を高速化するための指針を与える実験結果を得ることが出来た。

平成16年度はナノフォトニックデバイスを演算などより高機能なデバイスとして動作させるために必要となる”NOT”ゲートの動作に成功した（図1,2）。その動作特性はナノフォトニックスイッチの特性に準じており、高集積光回路を構成する素子として適していることが分かった。

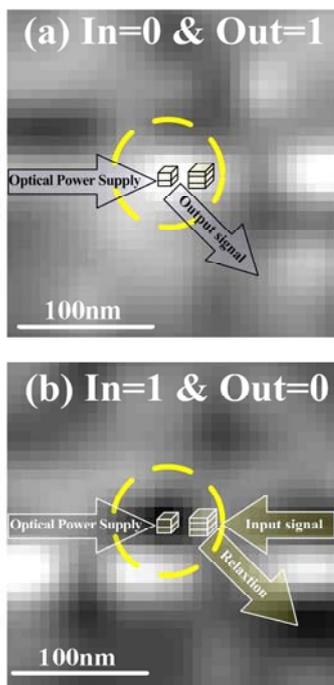


図 1. ナノフォトニック NOTゲートの静的動作特性

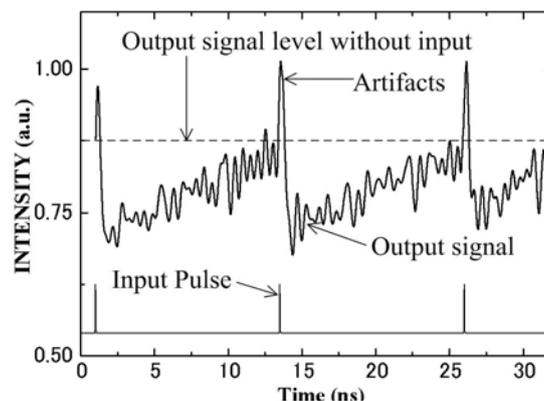


図 2. ナノフォトニック NOTゲートの動的動作特性

平成17年度は、より作製の自由度が高く、製造手法が確立しているIII-V族半導体を用いたナノフォトニックデバイスを作製・評価を行った。その結果、InAlAs量子ドットを用いる事により、NOTゲート動作を確認する事に成功した。（図3,図4）

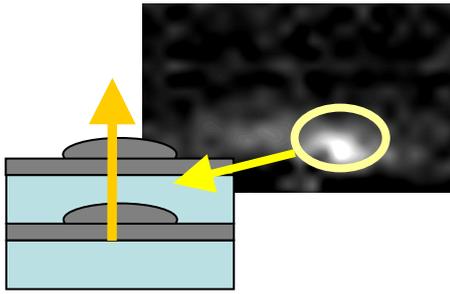


図3. ナノフォトニック NOTゲートの近接場測定

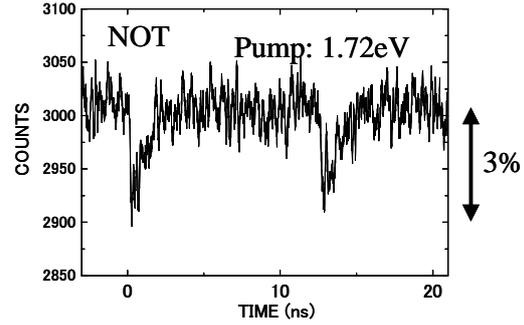


図4. ナノフォトニック NOTゲートの動特性

平成18年度は新たなデバイス材料として酸化亜鉛 (ZnO) を用いた研究を行った。ZnO はナノフォトニック・スイッチの室温動作を可能にする材料として有望である。まず、ZnO の2重量子井戸構造を ZnO ナノロッド先端に作製し (図5(a))、近接場光顕微鏡装置により ZnO 量子井戸間でのスイッチング動作の検証を行った。ここで作製された2重量子井戸は、大きい井戸の第一励起準位 (E_{B2}) が狭い井戸の基底準位 (E_{A1}) とエネルギー的に共鳴状態となっている (図5(b))。この試料に対して、 E_{A1} に励起されたエネルギーは E_{B2} を介して、 E_{B1} にエネルギー移動するため、 E_{A1} からの発光を観測することはできない (図5(c)の曲線 NF_{オフ})。そこで、大きい井戸の基底準位 (E_{B1}) を共鳴励起した状態で、障壁層を光励起したところ、 E_{A1} からの発光を観測することに成功した (図5(c)の曲線 NF_{オン})。この結果は、 E_{B1} を励起することにより、 E_{A1} から E_{B2} への近接場エネルギー移動が阻害されたためであり、近接場光による波長変換スイッチが実証された。

以上は、我々がこれまで提唱していたナノフォトニックデバイスとして、理論通り設計し人工的に試料を作製することで、その現象が初めて実験的に示された非常に重要な成果である。

また、ゾルゲル法により作製した ZnO ナノ微粒子、および CdSe/ZnS のコア・シェルドットそれぞれにおいて、共鳴するドット間での近接場光エネルギー移動を確認する結果が得られた。

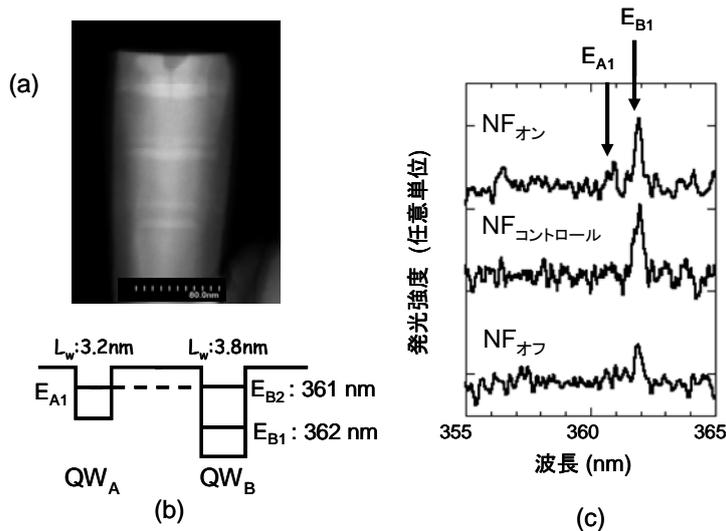


図5. (a) ZnOナノロッド先端に作製された2重量子井戸構造。(b)ナノフォトニックスイッチの概念図。(c) 近接場分光スペクトル。NF_{オフ}: 入力光のみ入射、NF_{パルス}: 制御光のみ入射、NF_{オン}: 入力光および制御光入射。

さらに平成18年度には CuCl 量子ドットの低温における優れた光学特性を用いて、先見的デバイスである単一光子発生素子の動作実験を行った。これによりナノフォトニックデバイスが単一光子で動作することも同時に実証した。

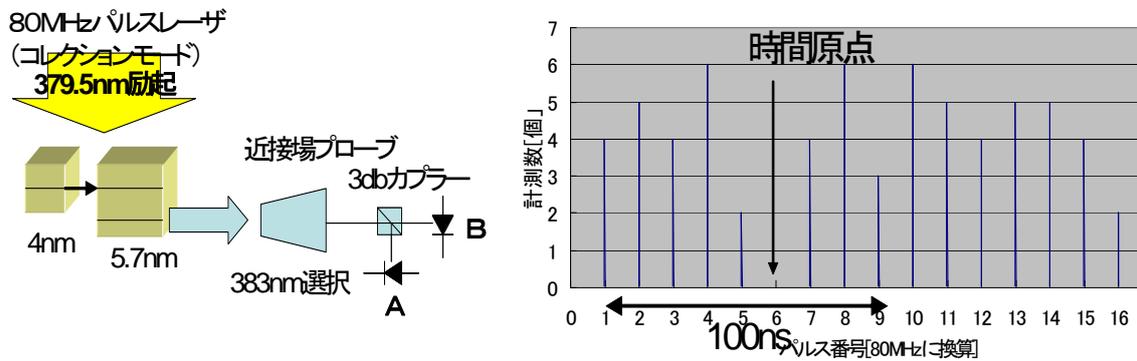


図6．実験配置と実験結果。4nm の量子ドットから 5.7nm の量子ドットにエネルギー移動後発光した光子を近接場プローブによって集光し、1:1 の分岐カプラーによって、2 つの高速ディテクターによって光子計数を行った。この実験の統計的確かさは 98.4%であった。

図6に実験配置と実験結果を示す。実験結果はディテクタAとBが同時に光子計数することがないことを意味しており、これは単一光子が5.7nmの量子ドットより出力されていることを示す。すなわち、量子ドット間のエネルギー移動は1光子（1励起）でおきており、ナノフォトニックデバイスが予想通り、単一光子デバイスであることが分かったとともに、単一光子性を利用したセキュリティなどへの応用検討が期待できる。

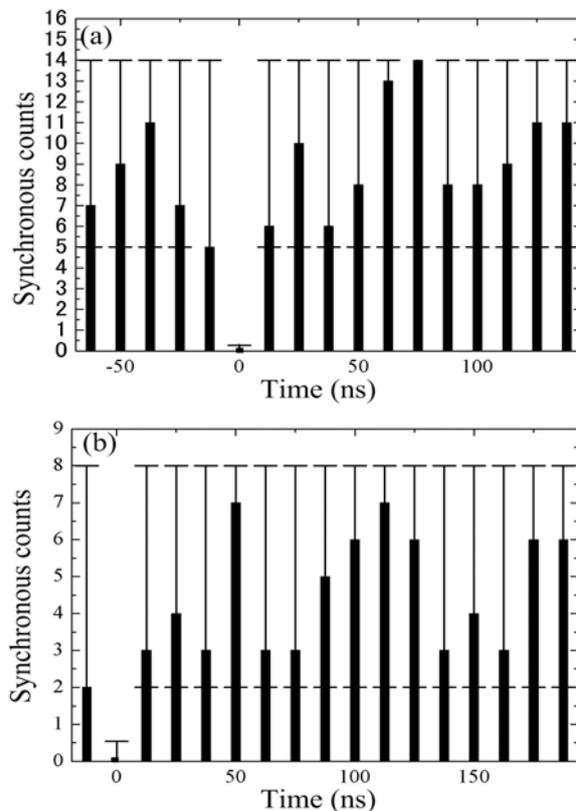


図7．単一光子発生を示す相関光子計数の結果

単一光子発生の研究はさらに平成19年度から20年度にかけて平成18年度に行った単一光子発生の実験精度を向上させ図7に示すような結果を得た。これにより、99.98%の統計的精度で単一光子発生の確認がなされた。

また平成20年度には、有望な室温動作ナノフォトニック・スイッチの材料の酸化亜鉛(ZnO)を用いた光の短波長化に成功した。ここでは量子井戸構造に発生するフォノンモードと量子構造間のエネルギー移動を利用し、図8に示すような短波長化動作の検証に成功した。

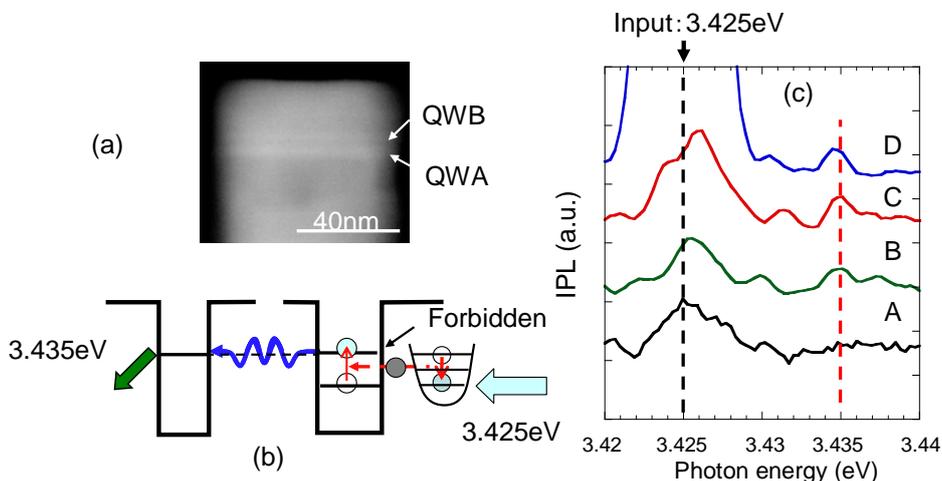


図8. (a) ZnO二重量子井戸。(b) フォノンモードを利用したナノフォトニックエネルギーアップコンバージョンの概念図。(c) ZnO二重量子井戸間でのエネルギーアップコンバージョンの様子。

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

本テーマの研究成果は近接場光を介したエネルギー移動という重要な物理現象に基づくため多岐に広がる。平成15年度の成果により、ナノフォトニックデバイスの基本的特性が明らかになり、平成16年度に成功したNOTゲート動作は論理素子演算における完備系を提供した。平成17年度以降は室温動作を目指し、素子材料を広げ、幾つかの素子材料にて量子ドット間の近接場光を介したエネルギー移動の確認、及び素子としての動作検証が行われた。また平成19年度、20年度にはこれらの素子が単一光子で動作していることを確認し、超低消費電力素子であることが示された。これらは今後ますます要求が厳しくなる省エネルギー化にナノフォトニックデバイスが対応する事を意味する。さらに平成20年度に行われたエネルギーのアップコンバージョンは、太陽光発電に大きな波及効果が期待される。従来半導体微結晶を用いた太陽光発電としては、エネルギーのダウンコンバージョンのみであり、いわば紫外線の有効利用であった。これに対して、我々が実現したアップコンバージョンは、赤外線の有効利用活用である。これは、太陽光として利用されていな波長域として非常に広いために、太陽光発電効率の大幅な向上が期待される。

(4.1.2) 各種の論理演算デバイス

(1) 実施の内容

平成 15 年度にはナノフォトニックシステムを構築するために、近接場光を介して結合した複数個の量子ドットを用いた論理デバイスの可能性について議論した。まず、最初に行うべき事は近接場光を用いたナノフォトニックデバイスの利点と問題点を明確にすることである。下記の表 1 は実験結果などから理論的に求めた値であり、比較のため、既存の光デバイス及び電子デバイスを併記する。なお、「既存の光デバイス」の項目は既に研究が行われている多様な方式から最も良好なデータを記しているため、この表にあるような光デバイスが存在しているわけではない。

表 1. ナノフォトニックデバイスと他デバイスとの比較

	ナノフォトニックデバイスの利点			ナノフォトニックデバイスの問題点とその解決法	
	サイズ/集積度	消費電力ロス(発熱)	1 素子あたりの機能性	スイッチング速度	ON/OFF 比
ナノフォトニックデバイス	10-100nm 10 ¹⁰⁻¹² 素子/cm ²	10 ⁻¹⁹ J/clock 10 ⁻²¹ J/clock	高機能 D/A 変換 や演算・ 論理ゲート等	100ps 程度 (振動子強度の増大などエネルギー散逸を大きくする事で高速化)	低い: 10 程度 測定系の問題を含む、素子の並列化当で対応。
既存の光デバイス	数 μm-1mm 10 ²⁻⁶ 素子/cm ² 以下	10 ⁻¹⁷ J/clock 10 ⁻¹⁷ J/clock	高機能 D/A 変換 や演算・ 論理ゲート等	高速(10fs) ただし、消費電力と相殺される関係。	高い 100 以上 ただし、小型化により、 ON/OFF 比は小さくなる。
電子デバイス	100nm 10 ⁸⁻⁹ 素子/cm ²	10 ⁻¹⁵ J/clock 10 ⁻¹⁵ J/clock	トランジスタ動作(ゲート動作)のみ	100ps ただし、消費電力と相殺される関係。	高い 100 以上 ただし、小型化により、 ON/OFF 比は小さくなる。

表 1 から分かるように、ナノフォトニックデバイスは素子サイズや消費電力の点で他の方式より優れている。一方スイッチング速度や ON/OFF 比など改善すべき点、またその具体的な方法を幾つか提案することが出来た。

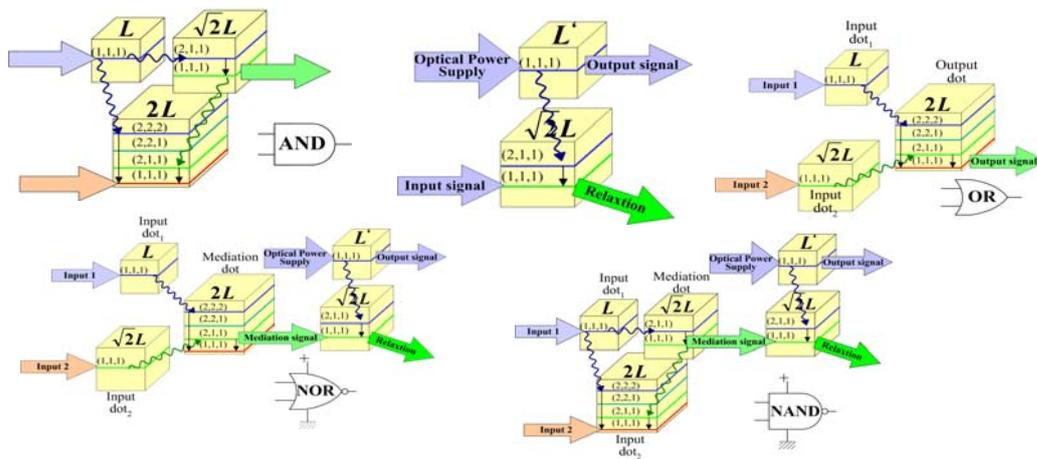


図 9. ナノフォトニック論理回路

平成 16 年度には研究テーマ(4.1.1) ナノフォトニック・スイッチで示した NOT ゲートを用い、論理回路の完全系が得られることの提案を行った。図 9 はそれぞれ、AND, NOT, OR, NOR, NAND を構成する量子ドット配置になっている。また、近接場光のコヒーレンスを利用することで OR, XOR が実現可能である事が分かっており、具体的な実験について議論を進めた。

平成 17 年度にはナノフォトニックデバイスのインターコネクションに関する研究を進めた。量子ドット等の微小粒子間の近接場光による相互作用を用いることで、ナノスケールに膨大な量のデバイスが構築されることになる。しかし、マクロスケールの外部デバイスとの通信等に必要な配線（インターコネクション）が新たな重要な技術課題あるいはシステム設計の制約要因となる。我々が提案し、一部を実験的に実証しているメモリーベースアーキテクチャでは（テーマ 4. 3 ナノフォトニックシステムを参照のこと）の構築「ナノスケールに配置された全ての機能ブロックが同一の入力信号によって動作する」という特徴的構造を有する。すなわち、個別のデバイスに独立した配線を設ける必要はなく、同一の信号の Broadcast（同報）機構が極めて重要となる。そこで我々は、量子ドット間の近接場相互作用が伝搬光では禁制であることに着目し、(I)個々のナノフォトニックデバイスの動作を近接場光相互作用によって保証しつつ、(II) Broadcast に用いるチャンネルの周波数においては伝搬光に対しても結合するような、量子ドットのサイズ並びに入力光周波数を選択することによる Broadcast 型のインターコネクション技術を開発した。

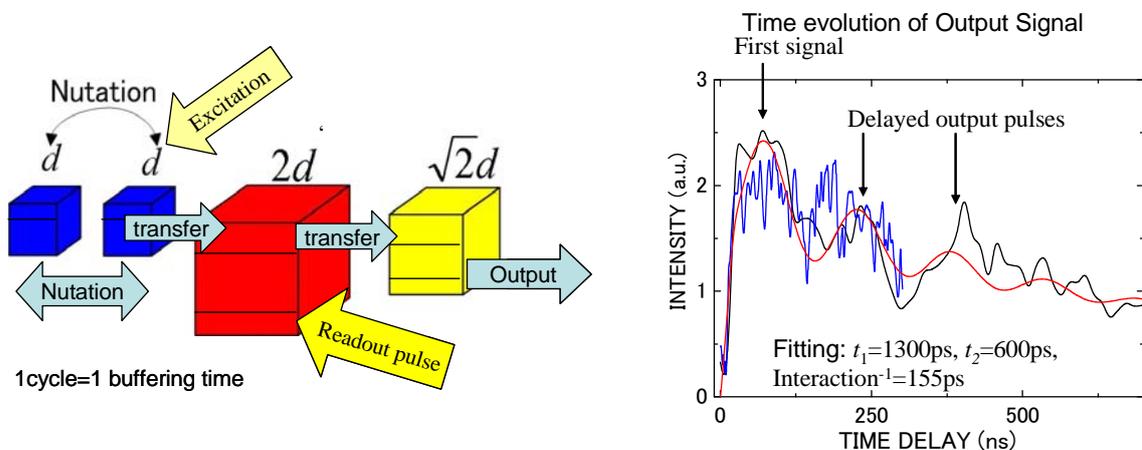


図 10. ナノ光バッファの量子ドット配置と実験結果

平成 18 年度にはナノフォトニック光バッファについて研究を行った。光バッファ回路は

演算・通信などデータの授受が行われるデバイスには必須である。図 10 に示されるような量子ドット配列を利用し、章動によるバッファリングと NOT ゲートによる信号の取り出しの実験を行った。

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

平成 15 年に示したナノフォトニックデバイスの原理的特徴はその後の研究（(4.1.1) ナノフォトニック・スイッチ）における単一光子動作の検証（平成 19 年度）によって証明された。また、平成 16 年度には既存の論理演算に対応可能な素子についてその提案を行い、現在の通信システムアーキテクチャにおいてもナノフォトニックデバイスは柔軟に対応可能であることを示した。一方でナノフォトニックデバイスの特徴を生かした新しいデバイスに関して平成 17 年度に提案を行い、平成 18 年度にはナノフォトニックデバイスによってのみ構築可能なナノ寸法光バッファの提案に至っている。

既存のシステムアーキテクチャに沿った論理演算デバイスはナノフォトニクスの特徴を生かしきれないため、現在は新しいシステムの構築（(4.3) ナノフォトニックシステムの構築）と融合する形で研究が進んでいる。また、現実に既存の光通信システムにどのように組み込んでいくか、そのために必要な増幅や変調に関する研究も進んでいる。ナノフォトニックデバイス（システム）は動作そのものの省エネルギー化に加え、高機能・新機能素子として高いポテンシャルを有している。

(4.1.3) ナノフォトニック配線

(1)実施の内容

ナノフォトニック・スイッチへの近接場光の入出力素子としてナノメートルサイズの光伝送路の開発を行った。この素子として、ERATO で開発した金属コア光導波路に対してより低損失で、より微細化が可能であると考えられる金属ドット列を用いたプラズモン・ポラリトン結合器を提唱し、動作検証実験を行った。金属ドット列を、収束イオンビーム加工機により作製し、これにおける近接場光強度分布を測定したところ、金属コア導波路と比較して、一桁の伝送損失の低減が確認された。さらには、直角に伝送路を曲げた場合でも、伝送損失が殆ど観測されなかった (図 11)。

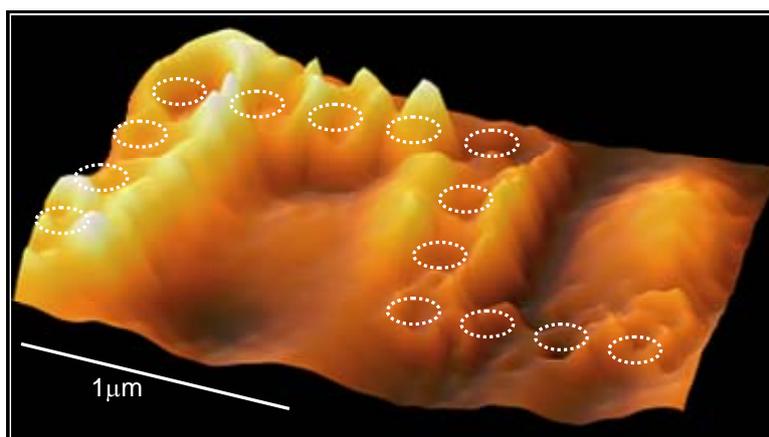


図11. ナノドットカプラー上における近接場光学像用

(2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

従来のシリコンフォトニクスなどの導波路では、曲げ損失が大きいため、曲げ部の曲率半径は10ミクロン程度であった。これに対して、我々が開発した金属微粒子列伝送路では、垂直に伝送路を曲げた場合でも、損失が殆ど見られたなかったため、伝送路の高集積化が可能になると予測される。

本デバイスは、よりフォノン準位との結合の弱い半導体微結晶を用いることで、さらなる伝送効率の向上が期待される。またエネルギー移動と散逸の効果を利用することで、反射損失のない、一方向光伝送が実現されると期待される。

(4.1.4) ナノフォトニック集光器

(1)実施の内容

平成15年度には伝搬光を近接場光と結合するための素子の研究を行った。ナノフォトニック配線に外部からの伝搬光を高効率に結合させるためには、伝搬光を集光させることが必要である。この素子として、伝搬光から変換された表面プラズモンを複数の突起散乱体により集光器の開発を行った。数値シミュレーションにより散乱体の数及びサイズ、位置の最適化を測ると同時に、収束イオンビームによる再現性の高い突起散乱体の作製法の条件出しを行った。その結果、図12に示すように数値シミュレーションとほぼ一致するプラズモンの集光を確認し、ナノフォトニック配線の入出力素子としての十分な特性が得られる事が明らかとなった。

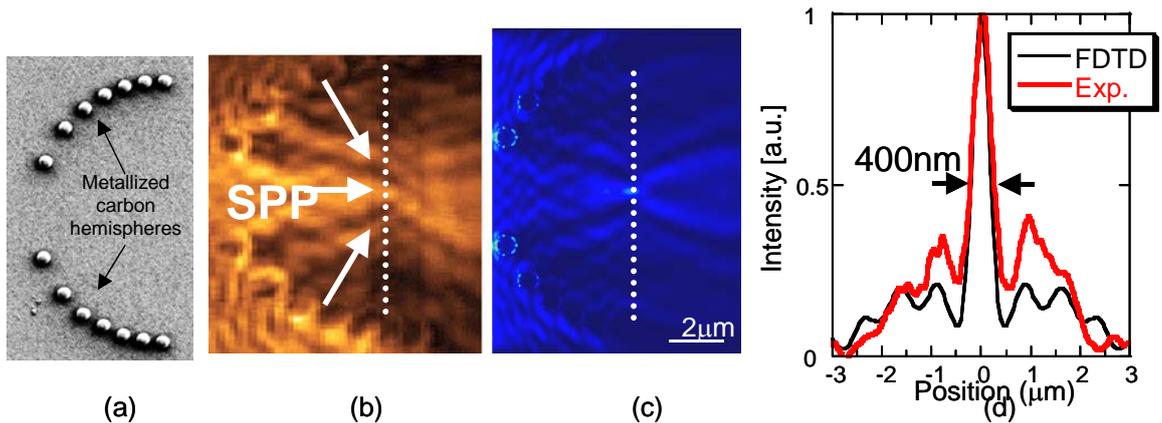


図 12. ナノフォトニック集光器の実験結果。(a) プラズモン集光器の電子顕微鏡像、(b) 図(a)の近接場光顕微鏡像、(c) FDTD 法による解析結果、(d) 図(b)、(c)における断面図

平成 16 年度には量子ドット間のエネルギー移動を利用したナノフォトニック集光器の研究を行った。量子ドット間のエネルギー移動により直径 20nm の領域に光エネルギーを集中することが出来る。我々はこのデバイスを動作形態から光ナノファウンテンと名づけた (図 13)。

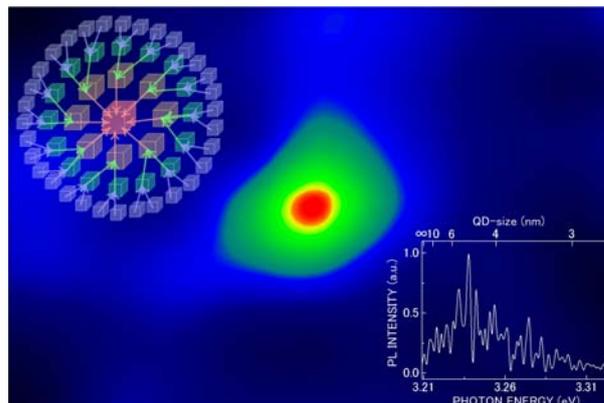


図13. (APL表紙図)ナノフォトニック集光器中心の明点の直径は20nm。

平成17年度にはナノフォトニック集光器の動的特性を評価し、ナノ光バッファとして機能する可能性を示した。既存の光デバイスではバッファメモリや伝送信号の同期のため、一度電気信号に変換する、または光ファイバを通すなどの方法が取られているが、デバイスが大型である、消費電力が大きいなどの問題点を持つ。我々が提案し、動作の検証実験に成功しているナノフォトニック集光器 (光ナノファウンテン) をうまく利用すれば、わずか100nm程度の空間に数ナノ秒光信号を蓄えることができ、消費電力を数桁小さく出来る。そこで、ナノフォトニック集光器を用いたナノ光信号ディレイの動作原理検証を行った。

実験結果は波長よりも小さいわずか100nm程度の空間で300psのディレイタイムを得る事が出来た(図14)。

平成 18 年以降はナノ光集光器をシステム等に応用する議論を行った。

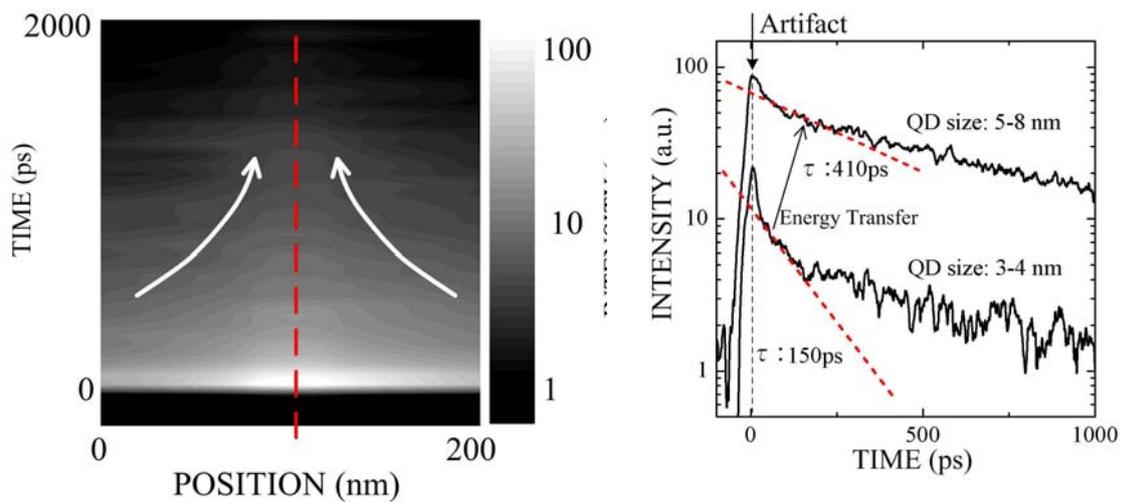


図 14. ナノフォトニックディレイ（バッファ）の実験結果。

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

平成 15 年度に示した伝搬光-近接場光変換素子はデータをナノフォトニックデバイス間でやり取りするための方法を提供した。また平成 16 年度に提案したナノファウンテンは高く評価され、米国科学雑誌 **Applied physics letters** 3 月 7 日号の表紙に選ばれている。平成 17 年度にはナノファウンテンを利用したナノ寸法光バッファを提案し、ナノファウンテンはその後の研究で高効率なナノフォトニックシステムを構築するための重要なデバイスとしての地位を固めつつある。光合成分子をまねたロスの小さいナノ領域への集光は太陽電池や光受光素子等への応用が可能であり、今後ますます研究の重要性が高まっていくと思われる。

4. 2 ナノ光加工

(4.2.1) ナノフォトニックデバイス製作のための加工法の開発

(1)実施の内容

平成15年度はナノフォトニックデバイス製作のための加工法の第一候補として近接場光を用いたCVD法の研究を進めた。特に非断熱過程による近接場光CVDは近接場光特有の現象を利用した方法として有望であり、物理的機構の解明につながる研究成果を得ることが出来た。本年度の研究で、近接場光CVDへの使用する基板の影響は小さく、使用する近接場ファイバプローブの影響が大きい事、従来の光では起こりえない化学反応を起こせる事（ビスアセチルアセトナート亜鉛の近接場光解離現象）などが分かった。図15はビスアセチルアセトナート亜鉛を最適化された条件で近接場光CVDによって分解・堆積した亜鉛ナノドットのトポ像及び横・縦方向の断面図である。サイズは $5 \times 10 \times 0.3 \text{ nm}^3$ でこれまで近接場光CVDによって作製されたナノドットで最小であり、室温動作型ナノフォトニックデバイスの構成部品として利用できるサイズである。

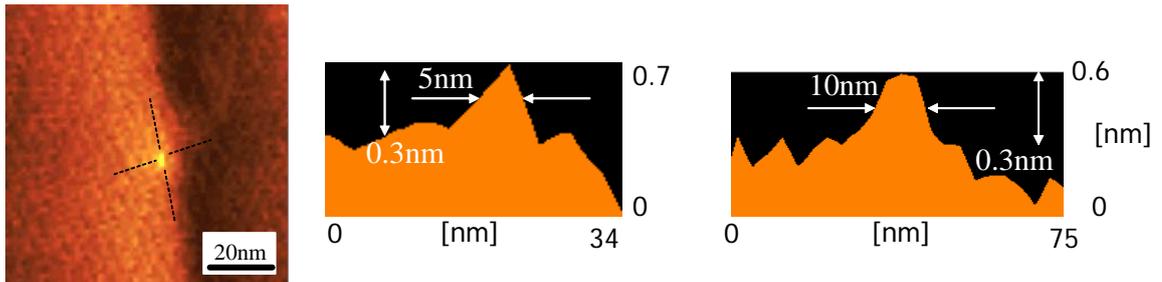


図15. 堆積された亜鉛微粒子の形状。（左）上面図。（中）、（右）は左図の黒線に添った断面形状。

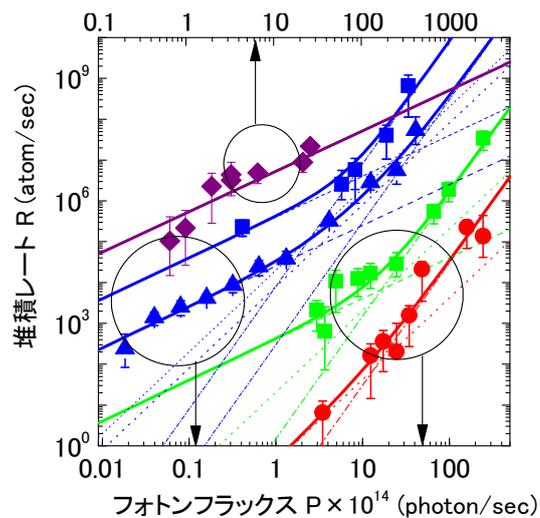


図 16. 近接場光 CVD における光強度と反応速度の関係実線はすべて理論曲線

平成 16 年度は励起子・フォノン・ポラリトンモデルによる非断熱近接場光化学反応の理

論を強固にするための研究を推進した。非断熱近接場光化学反応は近接場光でのみ起きる特異な物理現象であり、この現象を定量的に扱えるモデルとして励起子・フォノン・ポラリトンモデルを提案している。異なる波長、異なる材料においても我々の提案しているモデルが適応できる事が分かった (図 16)。

本プロジェクト後半では実際の動作を視野に入れたナノドット配列を目指し、サイズ・位置などの制御性を向上させて行くためにより適した CVD 材料と思われる $Zn(acac)_2$ を用い、その励起強度依存性などを観測、議論した。

また、非断熱近接場光 CVD において光化学気相堆積速度の近接場光プローブと基板の距離間距離依存性を調べ、その反応速度が非断熱光化学反応によって説明できることを示した (図 17)。

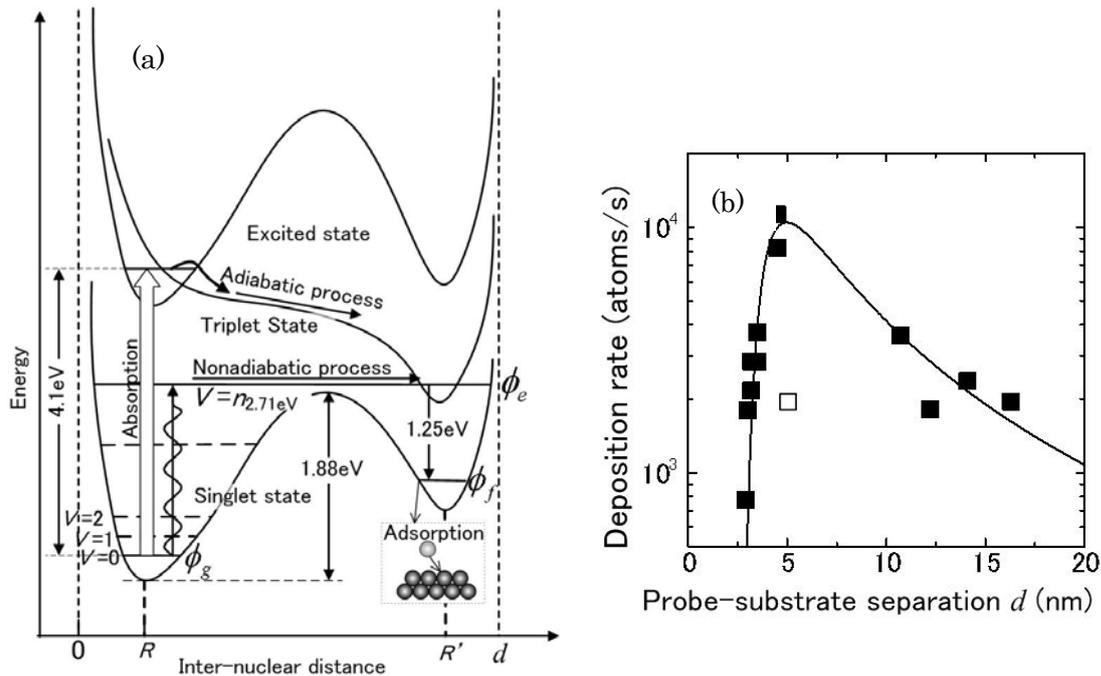


図 17. 光化学気相堆積速度の近接場光プローブと基板の距離間距離依存性を説明するための反応過程(a)と実験結果(b)

さらに、これら非断熱過程を利用した紫外受光素子の可視帯域への感度拡大が成功している。この成果は加工法ではないが物理機構の起源が同じであるので本テーマの成果とし

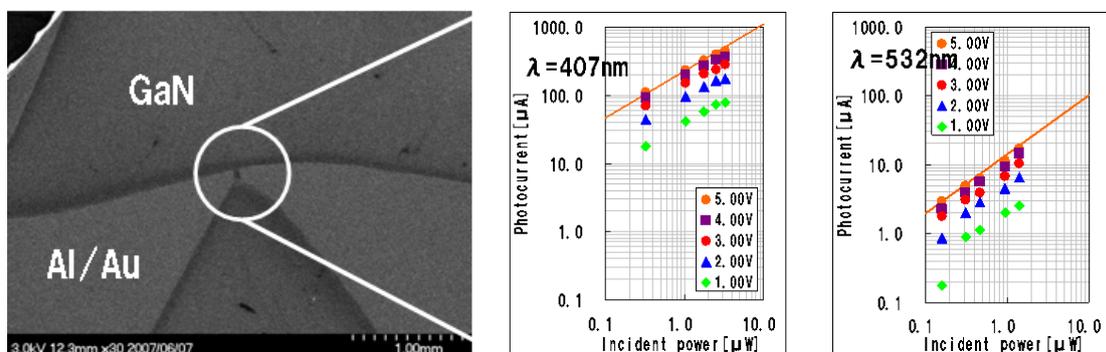


図 18. GaN とナノ寸法電極による非断熱過程を利用した新規受光素子

てここで報告に加えておく。図 18 に作製した紫外受光素子の SEM 像と測定結果を示す。本

来は測定感度のないはずの波長 532nm の緑の光にも受光感度を持ち、やはり、ほとんど受光感度を持たない波長帯域である波長 407nm の青色光に対してはほとんど紫外光と同等の感度を有していることが分かった。

特に、平成 20 年度には ZnO の単結晶ナノロッドの柔軟樹脂基板への堆積にも成功している。これはナノロッド堆積中に光を導入することにより、従来技術よりも低温で可能になった単結晶ナノロッドの堆積により実現した。このような技術を用いることで、プラスチック基板上に、ZnO の単結晶ナノロッドの作製に成功した (図 19)。

また、ナノロッド堆積中に、成長温度を制御することで、直径 10nm 程度の極細ナノロッドを基板に対して垂直に堆積することに世界で初めて成功した。

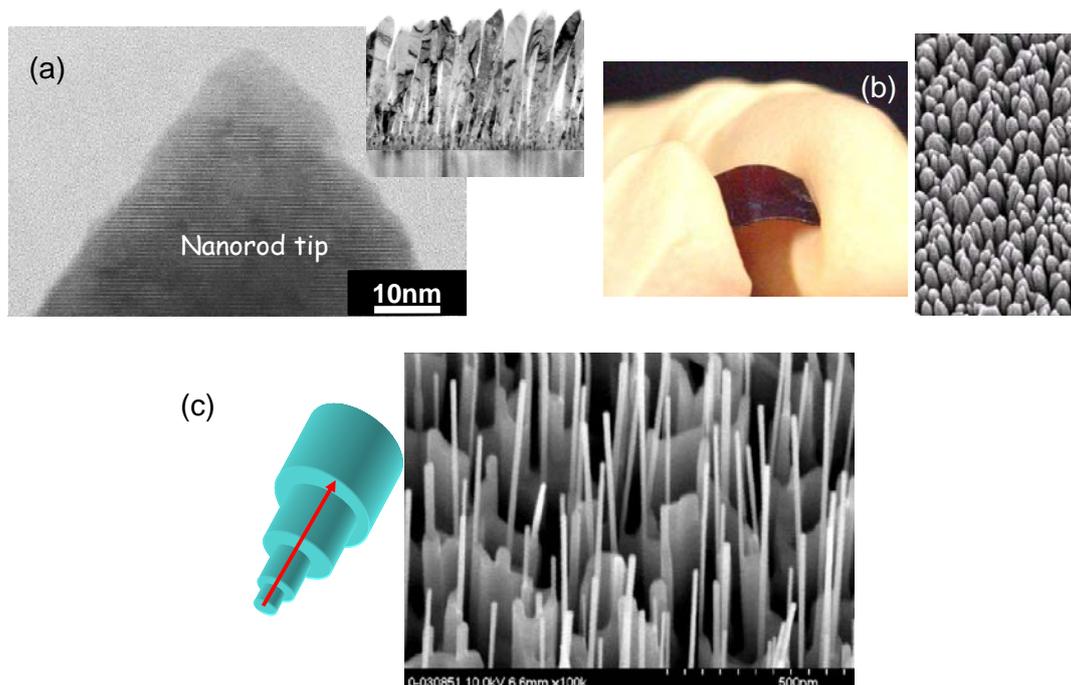


図19. (a) 光化学気相堆積法により低温で形成された単結晶ZnO。(b) ポリイミドフィルム上に堆積された単結晶ZnO。(c) 基板に対して垂直に堆積された極細ナノロッド

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

平成 15 年に行った非断熱近接場光 CVD の堆積実験は本手法がナノフォトニックデバイスで現在用いられている寸法数 nm の量子ドットに対しても有効であることを示している。非断熱近接場光 CVD は、我々が発見した近接場光特有の光化学反応過程の現象の理解に適した環境が用意できる。すなわち、ほぼ真空であるチャンバー中での希薄な分子と近接場光の相互作用が再現される。このことを活用し、非断熱光化学反応の理解を深める研究を平成 16 年度に行い、励起子・フォノン・ポラリトンモデルによる現象の説明が異なるガス、異なる波長の光でも成り立っていることを見出した。さらには平成 19 年、20 年度の研究において、異なる観点から、励起子・フォノン・ポラリトンモデルによる現象の理解が正しいことを示した。

これらの成果の一部は ((4.2.3)一括露光近接場光リソグラフィの開発) へと展開され、さらには発光素子や受光素子として、あるいは新たな光を用いた加工法として花開きつつある。

また、平成 20 年度に行ったプラスチック基板への ZnO 単結晶作製の成功はフレキシブルデバイスの実用化に向けて大きな一歩になると期待される。また、ナノロッド長さ方向に沿って、直径を変化させる技術も開発した。この構造は、1次元状のナノファウンテンとしてあるいはナノフォトニックデバイスの多段化への利用が期待される。

(4.2.2) 一括加工法の開発

(1) 実施の内容

我々が提唱するナノフォトニック・スイッチを大面積渡り均一に作製するためには、プローブを用いずに、自己組織的に堆積を行う方法が必要となる。このような手法として、ERATO 局在フォトプロジェクトでの成果により明らかとなった、近接場光のサイズ依存共鳴による脱離効果の利用が有効である。この現象を、スパッタリング法に応用することで、アルミニウム (図 20(a),(b)) やプラチナ等の金属だけでなく GaN (図 20(c)) などの半導体においても、粒径を制御し大面積に渡り配列させることに成功した。また、電子ビーム描画装置を用いた加工基板を用いることで、大面積に渡り位置を制御して GaN の微結晶を選択的に配列させることに成功した。

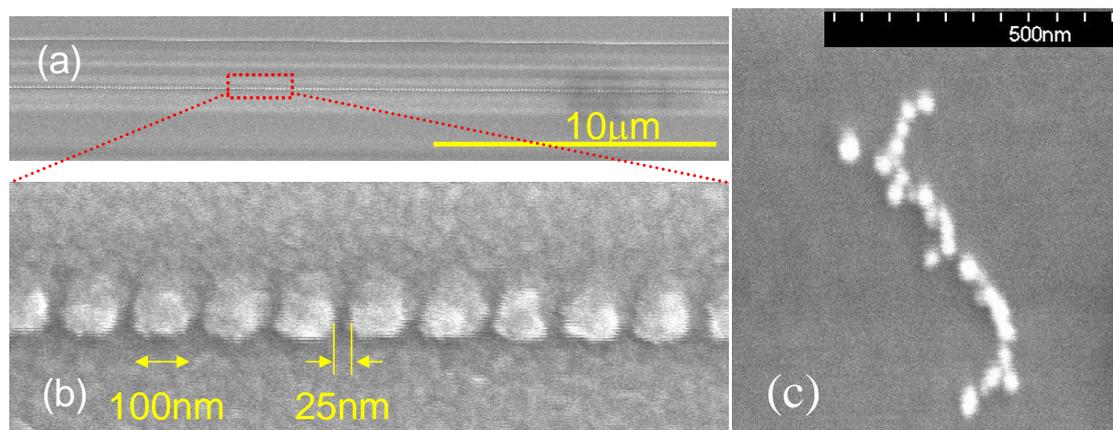


図 20. レーザ照射スパッタにより配列されたアルミニウム ((a),(b)) および GaN ((c)) 微粒子

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

ナノ寸法のデバイスを作製する場合には、従来電子線ビーム描画装置が用いられる。しかしデバイス寸法がナノ化すると、そのような手法では作製のための時間が大幅にかかるため、実用化には大きな問題があった。これに対して、本研究で示された自己組織化堆積手法は、ナノ寸法デバイスの量産化に向けて大きな一歩になると期待される。また、堆積されたドット配列は、ドット間のエネルギー移動が最も効率良い形状となっており、ナノフォトニック配線としての利用が期待される。

(4.2.3) 一括露光近接場光リソグラフィの開発

(1)実施の内容

平成15年度は近接場光リソグラフィの要素技術について議論した。研究テーマ(4.2.1)「ナノフォトニックデバイス製作のための加工法の開発」で示した近接場光特有の光化学反応は光CVDのみに留まらず、すべての光化学反応に適応しうる。近接場光を用いた光リソグラフィも例外でない。この研究の目的は安価であり、既存の露光装置を使って光の回折限界を大きく越える微細構造を作製することである。実験の結果、通常は全く露光感度を有さない赤色レーザ光源を用いてフォトレジスト上に波長の1/5のサイズのパターンを作製することに成功し、波長依存性や露光時間依存性など貴重なデータを得た。その結果を踏まえ、近接場光リソグラフィ用のマスク設計を行った。特に光源に関し、豊富な知識を有するウシオ電機(株)との共同により、優れた性能を持つと理論的に予想されるマスクの構想、設計を行うことが出来た。

平成16年度は、近接場光を用いることで通常は感光しない光子エネルギーの低い光によってフォトレジストが感光される事、適当な波長の光源を選択することで、大量生産に対応可能な露光速度が得られることなどを発見した。この研究によって、通常は光リソには利用不可能と思われる電子線レジストを用いても近接場光により感光できることが分かった。またウシオ電機との共同研究により、近接場リソグラフィに適したマスク、フォトレジストの照明方法の提案と基礎実験を行い、伝搬光の干渉の影響を受けない露光法を提案した。

平成17年度は本年度は、ウシオ電機との共同研究でキセノンランプを光源に用いた場合の露光速度の波長依存性の観測やナノ寸法デバイス作製のための2層レジスト法などを行った。

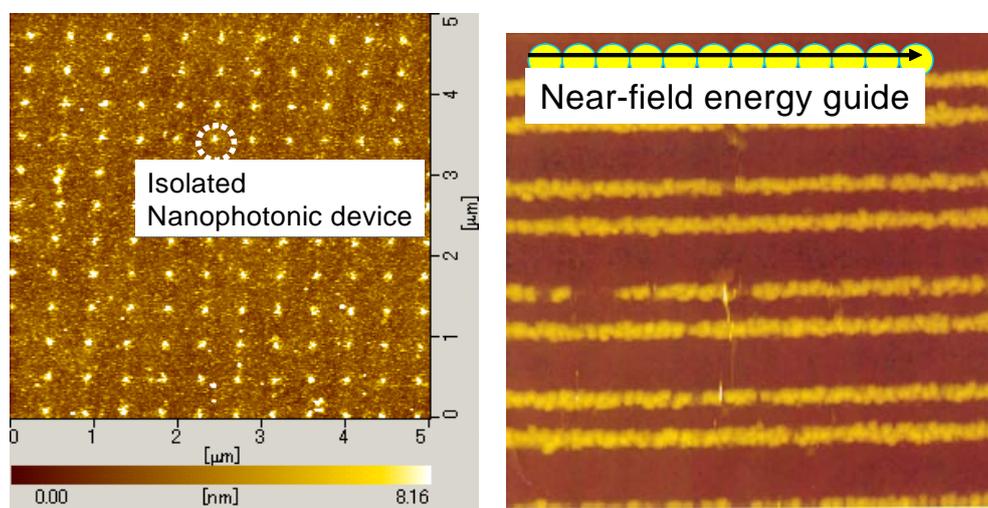


図 21. 非断熱近接場リソグラフィによって加工された III-V 族量子ドット試料

平成18年度は非断熱近接場リソグラフィによって実際の半導体デバイス加工を行った。これは、非断熱近接場リソグラフィの実用化に近づけるために大変重要なテーマである。2層レジスト法の利用や、露光時間・波長・レジスト膜厚など諸条件の最適化により図21に示すような半導体量子ドットデバイス加工手段に有効であるような加工結果を得た。

平成19年度は蓄積された非断熱近接場リソグラフィ技術を用いた光学部品の作製に着手し、その要素技術を明らかにし、100nm以下のパターンに対する非断熱近接場光リソグラフィ特有の露光時間依存性を明らかにした。

平成20年度は平成19年度の成果を生かし、ゾーンプレートを用いた集光光学部品の作製に成功した。この素子は波長325nmのレーザ光を500nm以下のスポットサイズまで集光できる性能を有することを確認した(図22)。

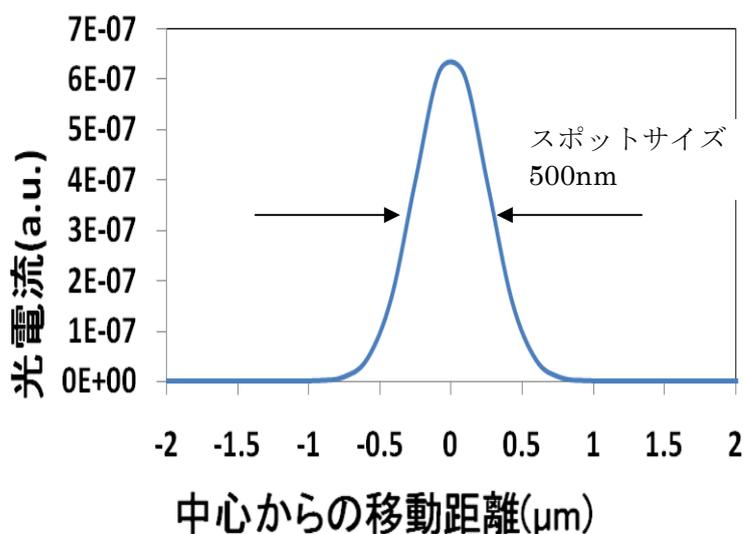
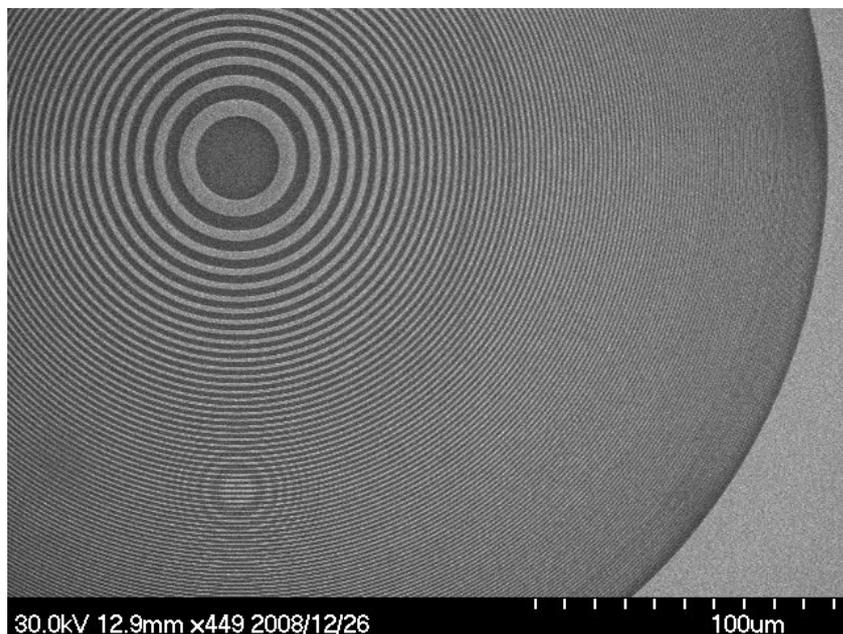


図 22. 非断熱近接場光リソグラフィにより作製されたゾーンプレートと素子性能を示す光の集光結果

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

平成15年度～17年度には、非断熱近接場光リソグラフィ法をナノ構造体作製手法として確立させるための要素技術の研究が行われた。その結果、通常の光リソグラフィでは到底作製不可能な構造が作製できること、回折限界によらない微細パターンを安価な機器で作製できることが分かった。

平成18年度以降は非断熱近接場光リソグラフィ法によって実用デバイスを作製することに重点が移され、半導体デバイス加工や光学素子作製が行われた。現在室温動作するナノフォトニックデバイスの開発を進めているが、素子加工の最も有望な手法の一つになっている。また、既存の手法では作製コストが高くなるために従来技術では困難であったフレ

ネルゾーンプレート型レンズの作製を行った。既存の方法（電子線ビーム描画）と比較し1/10以下のコスト、10-100倍の速度で生産できることが分かった。なお、通常の光学露光法ではフレネルゾーンプレートの刻線間隔が連続的に変化しているため、伝搬光の干渉が生じ作製が困難である。この問題は非断熱近接場光リソグラフィにより克服された重要なポイントである。なお、このゾーンプレートは通常の光学用としてだけでなく、軟 X 線など今後重要度が増していくであろう事が予測される波長領域の光学部品としても重要視されており、今後の発展が望まれる。

(4.2.4) 一括露光近接場光ナノインプリントの開発(追加課題)

(1)実施の内容

光デバイスの新機能としての情報セキュリティ応用を目指して、近接場光情報を複製するナノフォトニックレプリカの開発を行った。レプリカ作製のための型として、これまでの研究で得られた ZnO ナノロッドを用いることで、ナノロッドの先端曲率、長さ等のばらつきがもたらす多様なランダム性が利用可能であり、より高いセキュリティ性が期待される。

金微粒子の光析出には塩化金酸を含有したスピノンガラス材料（東京応化，OCD T-7）を用いた。本材料をシリコン基板上にスピコートし、真空デシケータ内でゲル状に乾燥させた。60秒間の HeCd レーザ照射により、形成された金微粒子の SEM 像を図 23 (b) に示す。直径数十 nm 程度の金微粒子がナノロッドの押し付けられた周辺に析出していることがわかる。この結果はナノロッドエッジ部に発生した近接場光によって金成長のための核が優先的に形成され、その核を元にエッジ部に金微粒子析出が発生したと考えられる。

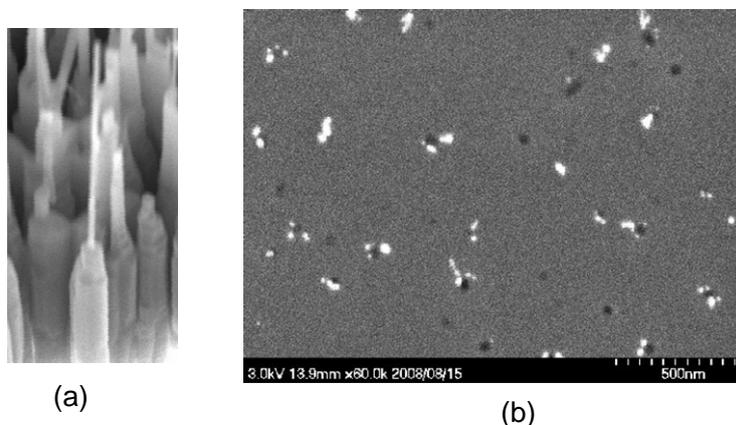


図23. (a) モールドとして利用したZnOナノロッド。(b) 近接場光ナノインプリントにより加工された表面形状のSEM像

(2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

インプリントにより形成されたパターンは金微粒子により形成されているため、伝搬光への変換効率が高く、認証デバイスとしての応用が期待される。

(4.2.5) 酸化亜鉛ナノロッドを用いた近接場光触媒の開発(追加課題)

(1)実施の内容

近接場光を用いた光触媒の開発を行った。触媒効果を発生させる材料として酸化亜鉛ナノロッドを用いた。このようなナノロッド形状は表面積も大きいため、大幅な触媒効果の促進が期待される。この酸化亜鉛ナノロッドを純水中において He-Cd レーザ ($\lambda=325\text{nm}$) を照射したところ、触媒効果による酸化亜鉛の窒化が確認された (図 24)。

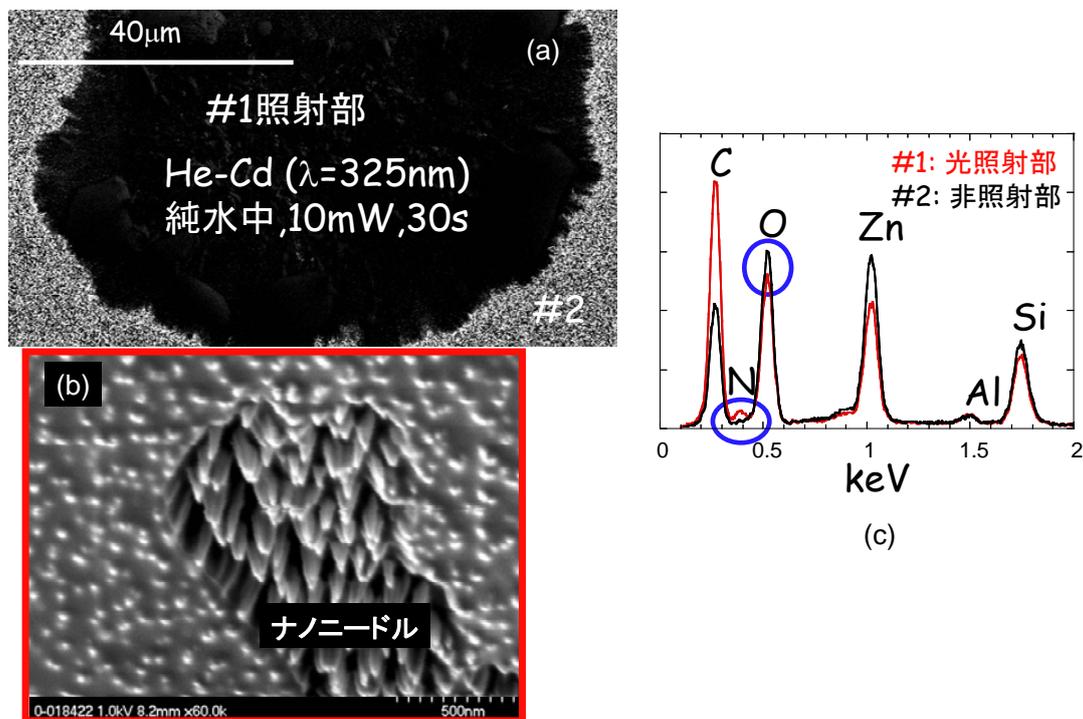


図24. (a) 光照射後のナノニードル表面のSEM像。(b) 図(a)の拡大図。(c) XRD解析結果。

(2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

(4.2.1)で示したように、さらに細いナノロッドの成長が可能であるため、さらなる効率向上が期待される。ZnO ナノ構造としては、ナノ微粒子の作製も可能であるため、より高効率な光触媒効果が期待される。また、酸化チタン同様、水の電気分解による水素発生が可能であり、エネルギー問題を解決する手法として期待される。

(4.2.6) 近接場光化学エッチング手法の開発(追加課題)

(1) 実施の内容

GaN バルクの光化学エッチングによるウィスカーの作製と、ウィスカーからの量子サイズ効果の発現に成功した。

GaN 上にはスパッタリング法により一部 Cr 電極を作製した。Cr 電極での触媒作用を利用することにより、エッチング速度の向上を図っている。この試料を HF(50%):H₂O₂(30%)=1:1 の混合溶液中で、室温においてエッチングを行った。紫外光源としては、He-Cd レーザ(波長 325nm、出力 6mW)を用いた。

30 分間のエッチングを行った結果、GaN の表面に壁状の構造が形成された(図 25(a))。図 25(b)に壁状構造の模式図を示す。また、壁の側面の拡大図を図 24 (c)に示す。これより、直径 10nm 以下のウィスカーが存在していることが確認できる。

さらに本試料に対して、近接場分光測定を行った。その結果、10nm 程度のウィスカーに対応して、ブルーシフトした発光スペクトルが観測された (図(d))。

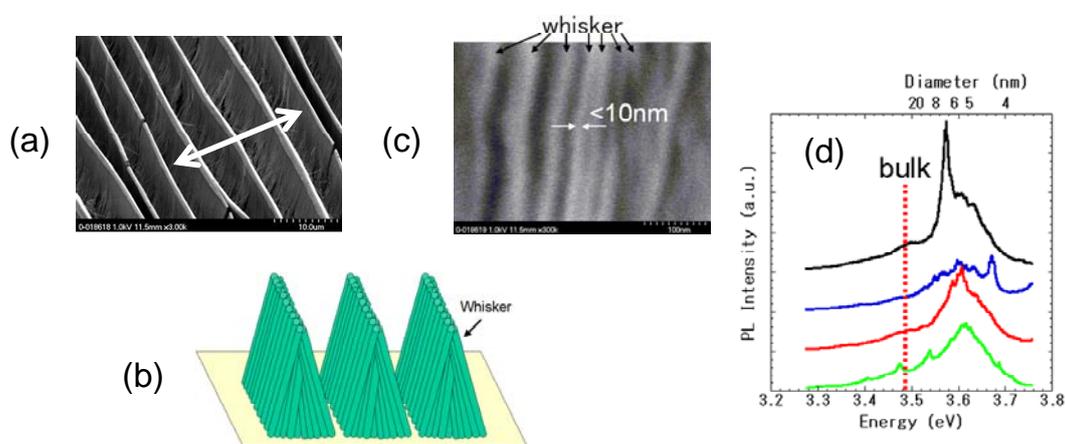


図25. (a) 光化学エッチングにより作製されたGaNウィスカー。(b) 図(a)の模式図。(c) 図(a)の拡大図。(d) 近接場光分光により得られたウィスカーからのPLスペクトル。

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

近接場光化学エッチングは大面積一括作製と位置制御が可能であるため、ナノフォトニックデバイスの大面積加工が可能であると考えられる。位置制御には、基板パターニングと偏光による近接場光の発生分布を、寸法制御には量子サイズ効果によるサイズ選択励起を用いることで、所望のナノフォトニックデバイスが作製可能であると期待される。

(4.2.7) GaN ナノ微結晶によるナノフォトニックデバイスの作製(追加課題)

(1)実施の内容

GaN を用いたナノフォトニックデバイスを作製させるためには、ナノ寸法で位置を制御する必要がある。これを実現させるために、光化学気相堆積法を用いて室温で GaN の堆積を行った。その結果、原料となるⅢ族・V族比を最適化することで、強い紫外発光を有する良質な GaN 微結晶の作製に世界で初めて成功した。さらには、基板を選択することにより、GaN の結晶性の制御が可能であることが確認された(図 26)。

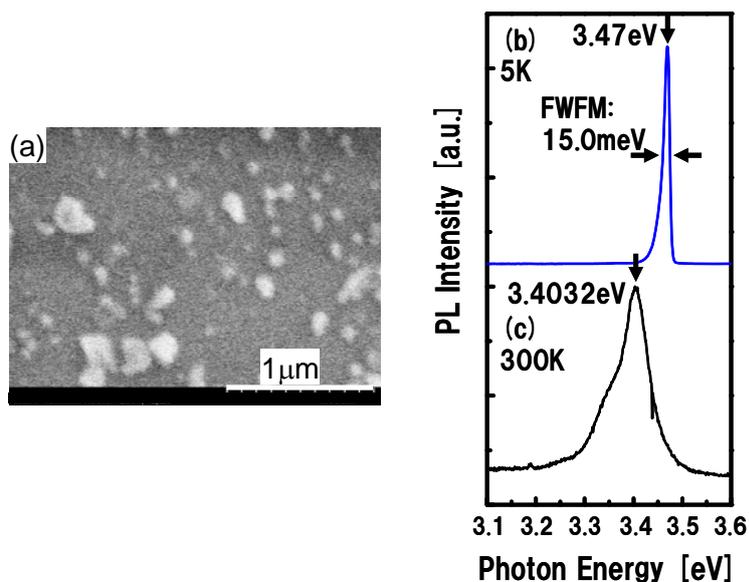


図26. (a) 室温で堆積されたGaN微結晶の電子顕微鏡像。(b)5Kおよび(c)室温で測定した発光スペクトル。

(2)得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

GaN の室温堆積としては、PLD が用いられているが、発光が観測された報告例はなく、本成果は世界的にもインパクトがある結果である。また従来 GaN の成長では 1000 度以上の基板加熱が必要であったが、本成果で示されたように室温での結晶堆積が可能になったことから、プラスチックに対する堆積が可能であると期待される。これによって、フレキシブルデバイスへの応用が開かれるであろう。

4. 3 ナノフォトニックシステムの構築

(1)実施の内容

ナノフォトニックシステムは電子デバイスのように単なるゲートの集合体ではなく、1つ1つの素子が高い機能を持つ可能性がある。さらに、単光子デバイスでもある。そこで我々は通信総合研究所との共同により、ナノフォトニックシステムのための新しいアーキテクチャについて研究し、提案を行った。それらは例えば、時間領域デュアルレール理論を用いた AND/OR/XOR 回路であり、また、CAM (Content Addressable Memory) と呼ばれる、必要なデータにアクセスするための回路である。これらの性能を現在までに得られた実験結果を利用して見積ると、特にナノフォトニックシステムにおける CAM 動作は既存の電子デバイスと比べ4桁も消費電力が小さく、また入出力に必要なアドレスチャンネルも遥かに低減できることが分かった。

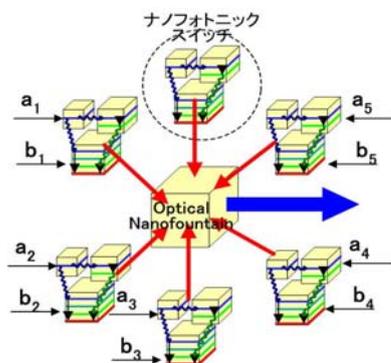


図 27. ナノ光スイッチと Optical nanofountain を組み合わせた Optical-Nano CAM

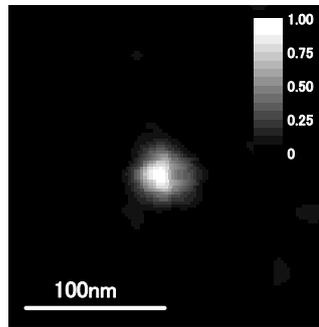


図 28. Optical-Nano CAM からの出力(空間強度分布)

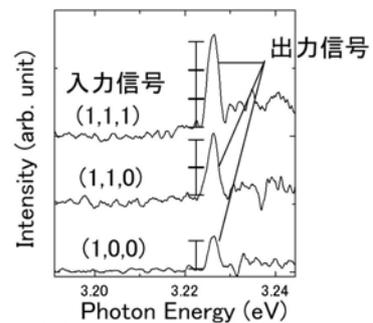


図 29. 各入力信号パターンに対する出力信号強度

平成 15 年度に我々は光ナノ CAM、すなわち、ナノフォトニクスに基づく超高集積光宛先検索機構を提案した。(4.1.4) ナノフォトニック集光器において実験に成功した光ナノファウンテンを利用し、ナノ寸法の光 CAM を実証した。ナノフォトニックスイッチに複数の入力信号 a_i および b_i ($i=1,2,\dots,M$) が入力され、ナノフォトニックスイッチによって行われた積の出力信号が光ナノファウンテンによって集められ、スイッチの出力信号に関する和算を行う。これによって、2 進数で表現された要素を持つ2つのベクトルの一致度を判定できる。すなわち、ナノフォトニクスの光宛先検索における重要基本機構である(図 27,28)。

ナノフォトニックスイッチの動作はこれまでに静特性・動特性とも測定評価が終わっているので光ナノファウンテンが和算に適しているか、すなわち入力信号の数に対し線形性を持つかどうかを評価すればよい。実験結果から入力信号が1つの場合;(1,0,0)の時の出力信号強度を1とした場合、入力信号が2つおよび3つの時には出力信号強度が2倍および3倍に線形に増加していることが分かる。この線形性の実証実験により我々が提案した量子ドットを用いた光ナノ CAM が動作することが実証された(図 29)。

平成 16、17 年度は研究テーマ(4.1.2) 各種の論理演算デバイスで示したように同一の信号を複数の受信者に配信するシステム Broadcast (同報) 機構を提案し、実証実験を行った。量子ドット間の近接場相互作用が伝搬光では禁制であることを利用し、(I)個々のナノフォトニックデバイスの動作を近接場光相互作用によって保証しつつ、(II) Broadcast に用いるチャンネルの周波数においては伝搬光に対しても結合するような、量子ドットのサイズ並びに入力光周波数を選択することによる Broadcast 型のインターコネクション技術である。

図 30 に実験結果を示す。この例では、3 個のナノフォトニックスイッチが $1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$ の極めて狭い領域に密集しているが、これらすべてが一括して供給される制御信号(IN1、IN2)によって同様に動作している。すなわち Broadcast 型のインターコネク트가実証された。メモリベースアーキテクチャに必要なもう一つの基本的機能であるデータの和算(Summation)機構は前年度までに実証しており、上記 Broadcast の実証と併せることで、超高集積光ノードの重要機能である光宛先検索のための基本機構がナノフォトニクスにより実現可能であることが示された。

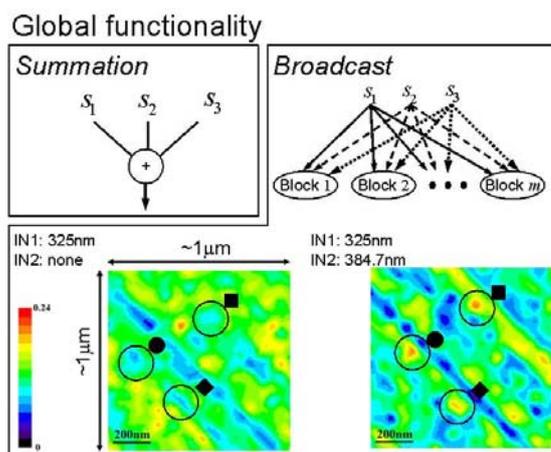


図 30. Broadcast 機構検証実験結果

平成 18 年度から平成 20 年度にかけてはナノフォトニックデバイスの特徴的動作原理に基づく新しい光情報処理システムのための提案、評価、原理実験を行った。具体的には、前年度までに開発したナノ光宛先検索などの超高集積システムにおけるセキュリティ性の解析、評価、ならびに近接場光相互作用の階層性を利用した痕跡記録機能を有する光メモリシステムを提案し、適当なナノ形状パターンを作製して検証実験を行った。

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

平成 15 年度に示した光ナノ CAM の動作機構はナノフォトニックデバイスの特徴が強く生かされており、極めて興味深い。実働のデバイスとして利用するためには既存のシステムの変革が必要であるが、現在の光通信の大容量化のペースから既存のシステムは今後 10 年程度で飽和すると考えられ、その時に代替システムとしての候補になる可能性が考えられる。同様に平成 16 年度、17 年度に行ったナノフォトニクスによる Broadcast 機構もまた重要な代替システムを提供すると思われる。平成 18 年度から 20 年度には単なる通信速度・通信容量の問題からセキュリティを意識したシステム開発を進めている。ここで得られた成果は重要度が急速に増しつつある情報の機密性、高集積性を CPU パワーが必要な、すなわち電力を消費する暗号化、データ圧縮などのソフトウェア階層ではなく、ハードウェア階層に用意し、極めて高い効率と機密性を与える。これらの利点に対するニーズが高まっていることから今後の発展が期待される。

5. 類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

ナノフォトニクスは、大津が1993年に提案し、その直後の1994年4月より約10年間にわたり、産学連携の勉強会(ナノフォトニクス懇談会)を実施し、新しい研究課題抽出、産業化の方向探索などを行ってきた。これらの議論には本研究の前身のERATOプロジェクトでの研究成果が基礎的知見として大変役に立った。これらの探索の結果、図31に示すごとく、研究代表者に関連するナノフォトニクス研究開発事業が展開した。これらのいくつかは文部科学省、経済産業省・NEDO, 総務省による産学連携事業である。すなわち、ERATO, SORSTの研究による基本概念の創出と発展が期間概念となり、計測、情報記録、加工、デバイス、システム、エネルギー変換などの技術が広がり深化した。

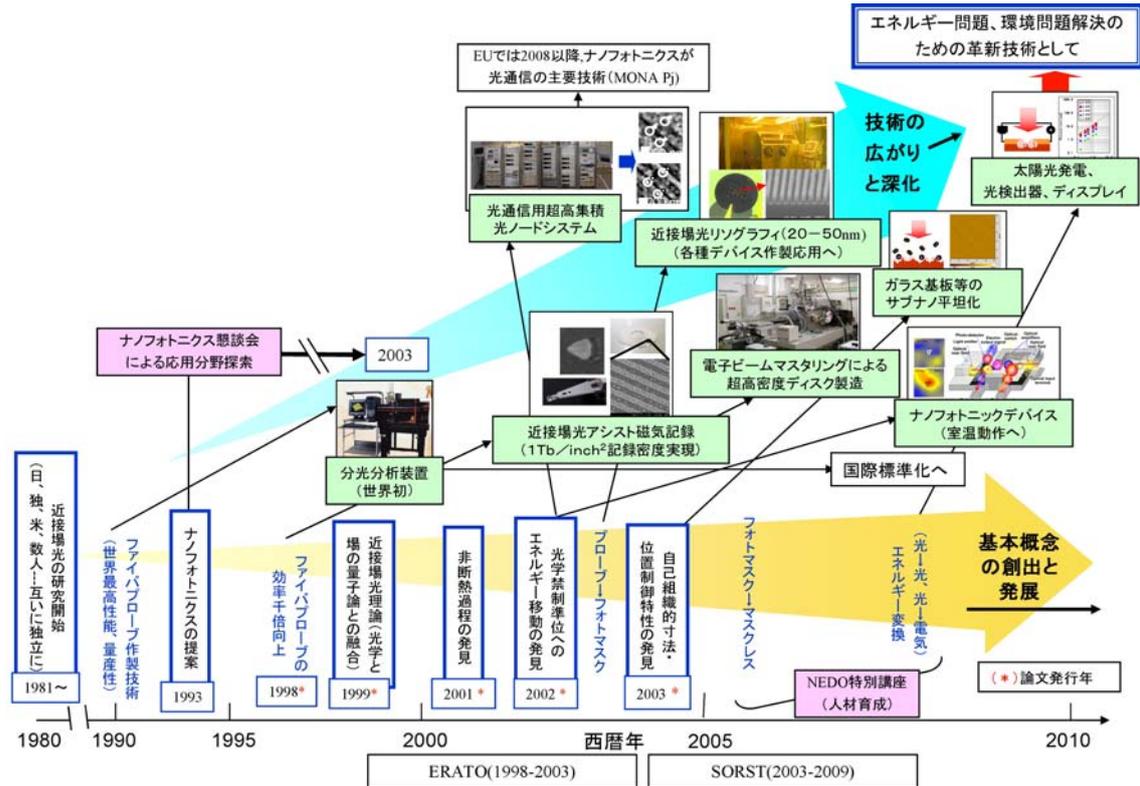


図31 ナノフォトニクスに関連する研究開発事業の推移

最近ではナノフォトニクスの研究開発が世界的に活発化し、図32にあるように光科学・技術に関する主要かつ大規模国際会議でも関連発表件数が激増している。そのうちの一部は近接場光相互作用に関連した話題であるが、その他は無縁と思われる内容である。このような無縁な話題がナノフォトニクスとして取り上げられている理由はその定義の違いからくる。すなわち大津による提案(1993)ではナノフォトニクスの定義は「近接したナノ微粒子間の相互作用を媒介する電磁場である近接場光を利用する新規な光技術」とされ、またこの技術の本質を「近接場光相互作用に基づく新機能・新現象を用い、従来の伝搬光では不可能な光デバイス、加工、システムの「質的変革」を実現すること」と指摘している。それは英文では

Novel optical technology that utilizes the optical near field, which is the electromagnetic field that mediates the interaction between nanometric particles located in close proximity to each other.

The true nature of nanophotonics is to realize “qualitative innovation” in photonic devices, fabrication techniques, and systems by utilizing novel functions and phenomena caused by optical-near field interactions, which are impossible as long as conventional propagating light is

used.

と表現されている。

M. Ohtsu, et al., IEEE Selected Topics in Quantum Electronics, vo.14 (2008) pp.1404-1417 (invited paper),

M. Ohtsu, et al., Principles of Nanophotonics, A Taylor & Francis, FL.,2008, Preface ,

M. Ohtsu(ed.), Progress in Nano-Electro-Optics, vol.V, Springer-verlag, 2006, p.VII

などを参照されたい。

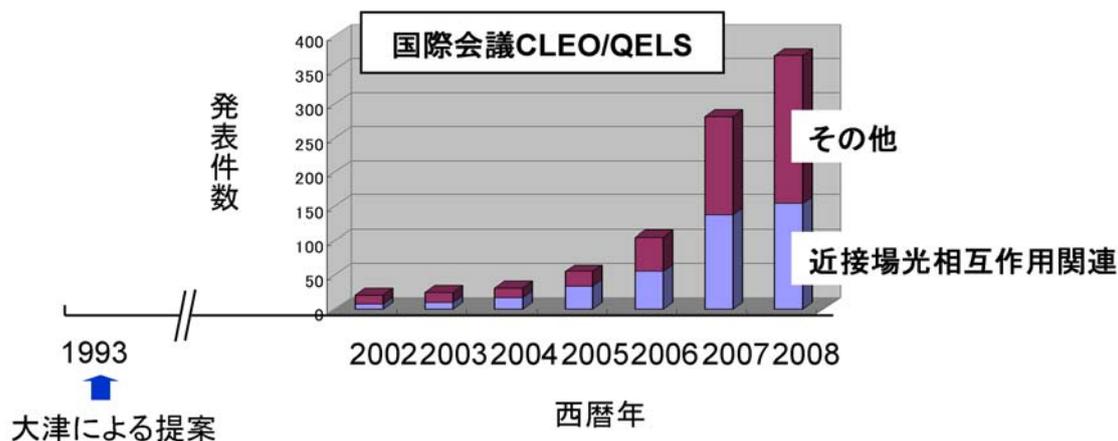


図32 ナノフォトニクスに関連する研究発表件数の推移

これに対し国外、たとえば米国でのNational Research Councilによるナノフォトニクスの定義は

Science and engineering of light-matter interactions that takes place on wavelength and subwavelength scales where the physical, chemical or structural nature of natural or artificial nanostructured matter controls the interactions. (*Nanophotonics Accessibility and Applicability*, The National Academies, , USA, 2007)

となっている。これは直訳すると「自然界に存在する物質または人工物のもつ物理的、化学的、構造的性質によって制御される、波長寸法 または波長より小さい寸法において発生する光と物質の相互作用の科学技術」となっており、具体性に乏しい。その結果伝搬光を使った技術も含まれることになり、従って、シリコンフォトニクス、プラズモニクス、メタマテリアル、フォトニック結晶などの波動（回折）光学技術もナノフォトニクスに含まれてしまっている。また「質的変革」をもたらす技術にもなっていない。このような状況下で米国は国内のナノフォトニクス研究の技術動向をまとめ、上記の文書を発表しているが、我々のナノフォトニクスに関する研究動向を気にしているようで、同文書のp. 169, p. 179で我々のSORSTプロジェクトに言及している。

一方、EUでは米国流のナノフォトニクスの定義と同様ではあるものの、現状の光情報通信システムに代わる、次世代のシステムにナノフォトニクスを応用する試みが始まっている。すでにMONA (Merging Optics and Nanotechnologies)と称するプロジェクトにおいて、ナノフォトニクスに関する技術ロードマップが策定されている。これはEUが30年後の技術としてとらえている量子情報通信よりも前に実現すべき技術として、解決すべき課題を抽出している。ただし実際には上記のシリコンフォトニクス、プラズモニクス、メタマテリアル、フォトニック結晶などの波動（回折）光学技術に留まっており、これらの波動光学技術では技術ロードマップの目標を達成することが困難と考えているようで、我々のナノフォトニクスの技術に興味を抱いていると思われる。現に大津は本年9月にオーストリア・ウィーンで開催される光通信関係の国際会議

The European Conference on Optical Communication, ECOC2009においてチュートリアル講演”Nanophotonics: dressed photon technology for innovative optical devices, fabrications, and systems”の依頼を受け、UEの研究者・技術者に対してナノフォトニクス の原理と実際を教示することになった。

以上から判断するに、図31にみられる幅広い応用技術は我が国、特に大津のグループが先導している。また、その基礎概念として、近接場光をdressed photonの描像で捉える仮説の提案、それに基づく局所エネルギー移動、非断熱的光化学反応など、新規な機能と現象の発見、その応用は他に類を見ない。最近では、これらの先導研究は国外の多数の研究者の興味を引くようになり、また我々もこれらの成果を世界的に普及すべく、国際連携を積極的に行った。すなわちいくつかのワークショップを開催し、図33に示すように欧米、豪州、台湾の大学、研究機関との情報交換を行った。この結果、平成20年度にJSTによる日独研究交流(相手方はOldenburg大学教授Ch. Lienau)が開始された。これは3年間にわたる活動で、「近接場光相互作用を介した光励起移動の探求：デバイスと評価」に関する共同研究、人物交流を行い、我々の成果を普及することとなった。今後、独国以外の国々とも交流を深め、我々が先導するナノフォトニクスを国際的に普及し、グローバル化することを考えている。

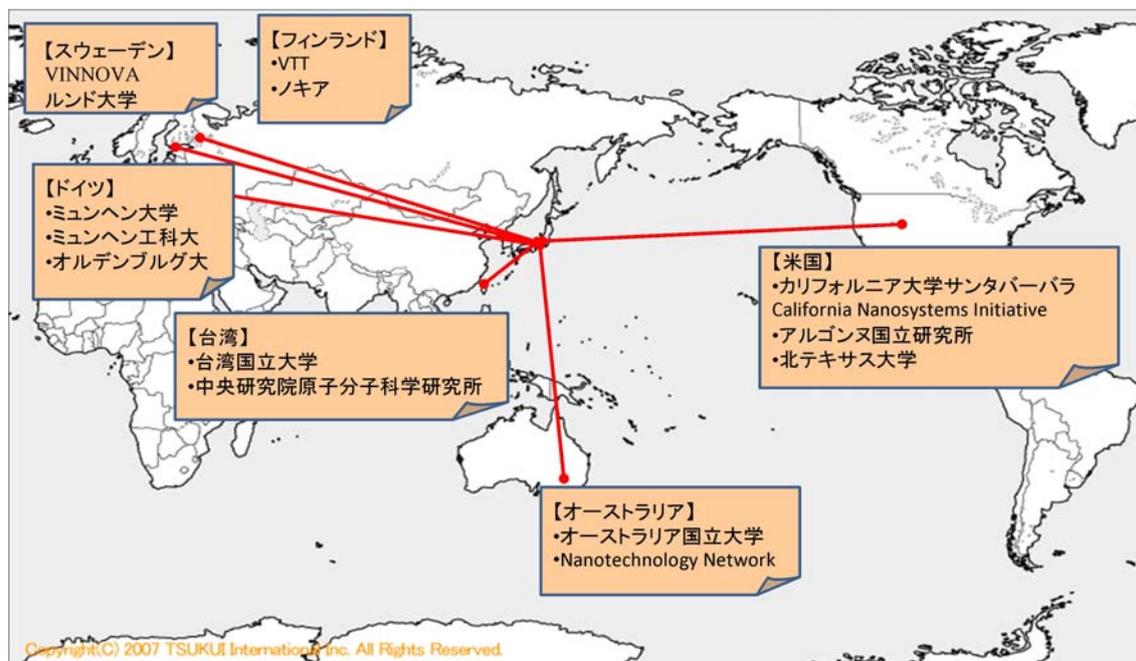


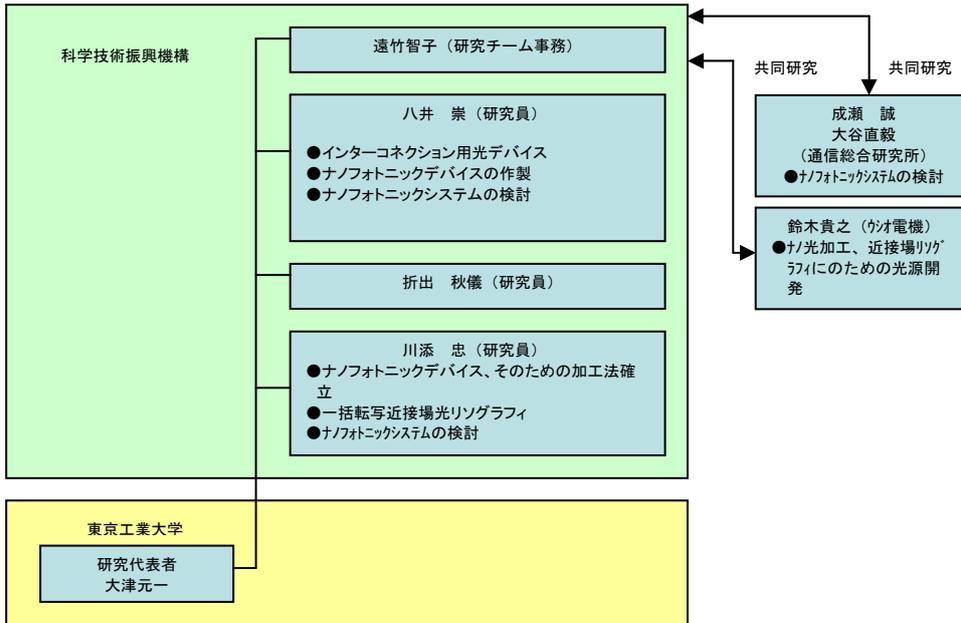
図33 国際交流の現状

一方、国内でもSORSTプロジェクトによって推進されたナノフォトニクス、特にそれをdressed photon science and technologyと捉える革新技術の重要性が認識されるようになり、その紹介と普及のために本年1月20日にJST SORST「フォトサイエンスワークショップ」“フォトサイエンスのパラダイムシフト”が開催された（於東京）。参加者は103名であり、会場が満席となる盛況であり、ナノフォトニクスに対する大きな期待と関心が感じられた。

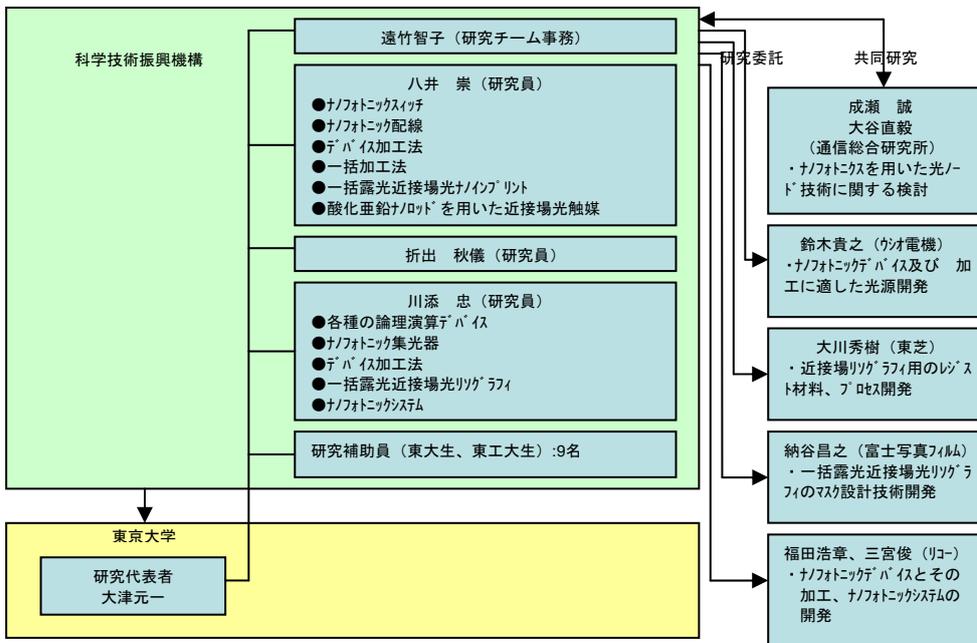
6. 研究実施体制

(1)体制

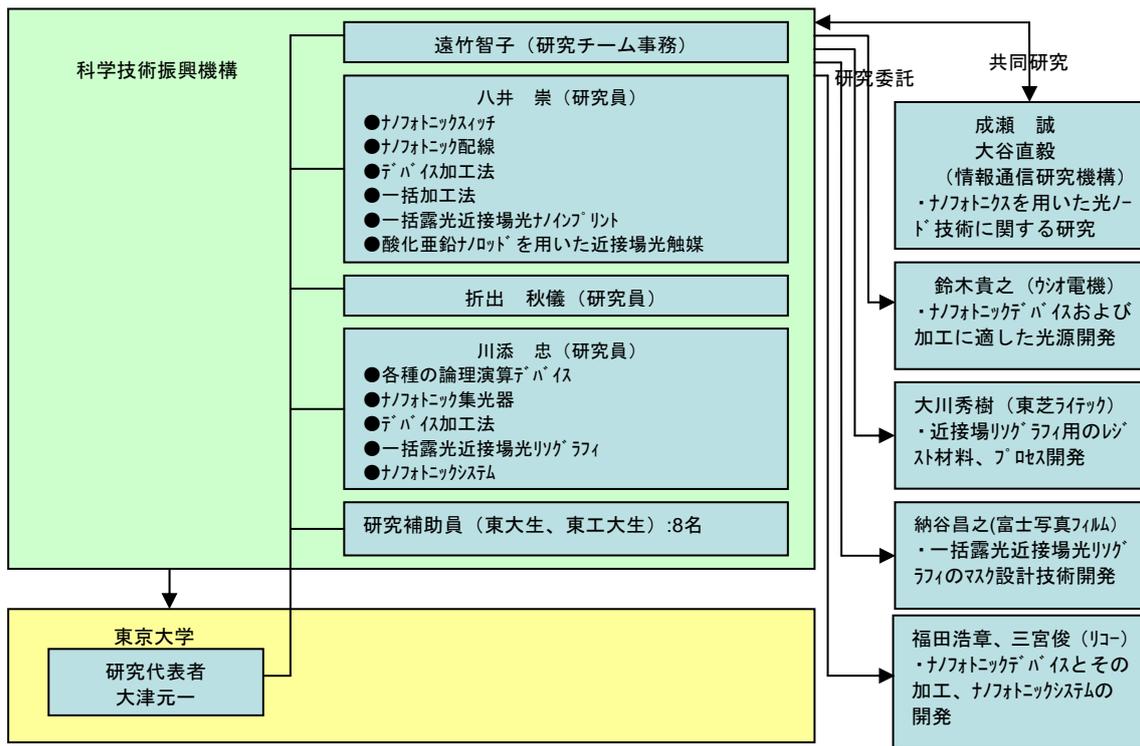
材料、加工、デバイス、システムに関する本研究チームの研究課題は互いに密接に連携している。従って各研究員をグループ化し、個別の研究課題に従事させることは避け、相互に有機的に協力して研究を推進させ、優れた成果を図った。この理由により本研究チーム内にはグループを設けなかった。



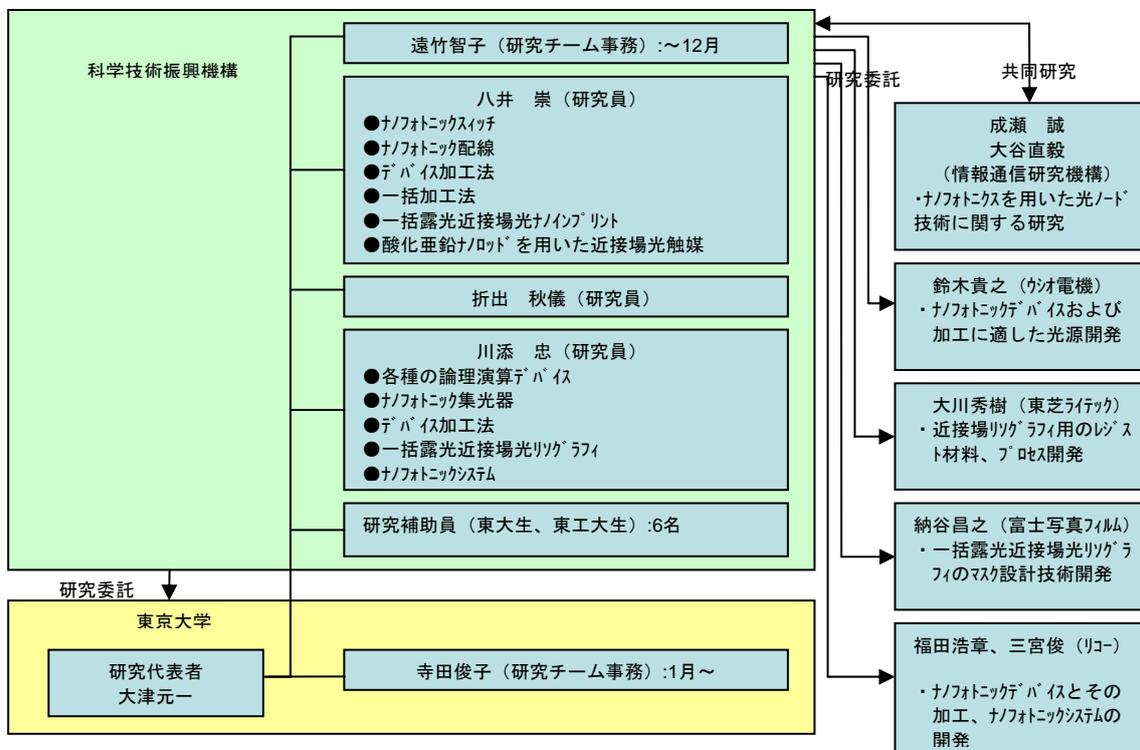
第1年次(平成15年度)の研究体制



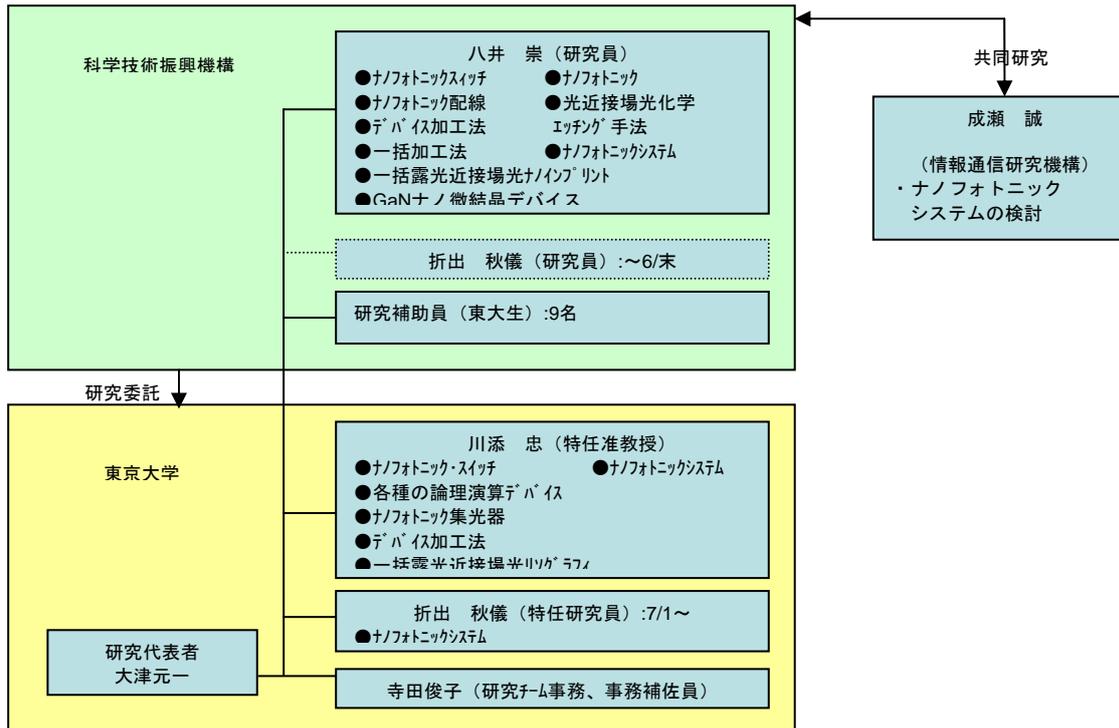
第2年次(平成16年度)の研究体制



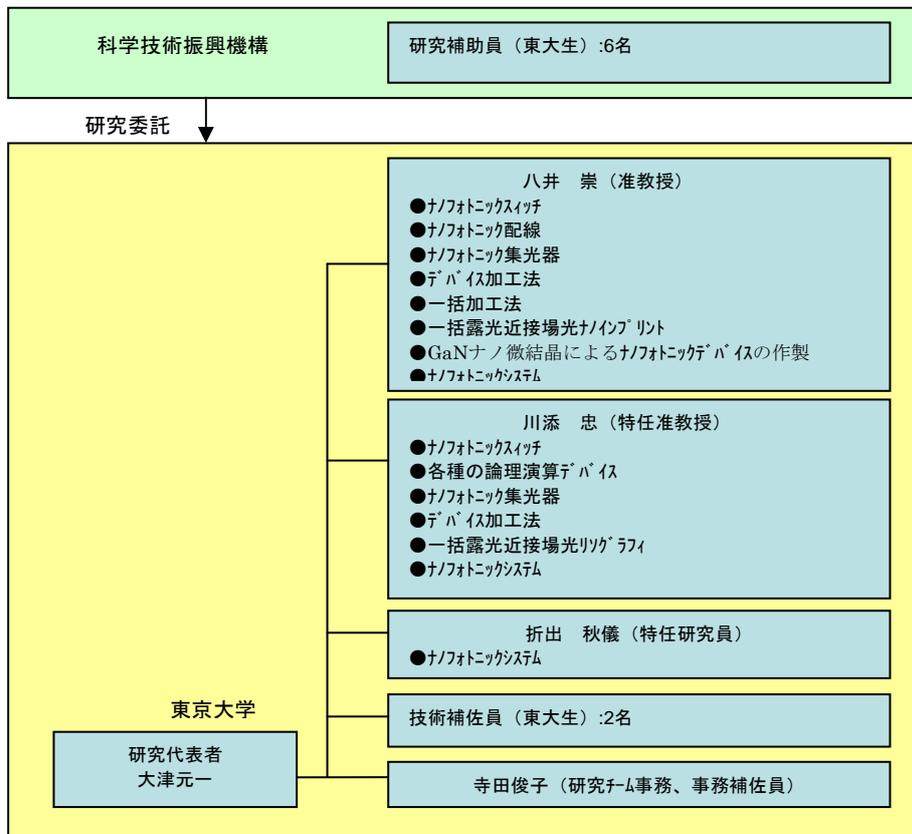
第3年次(平成17年度)の研究体制



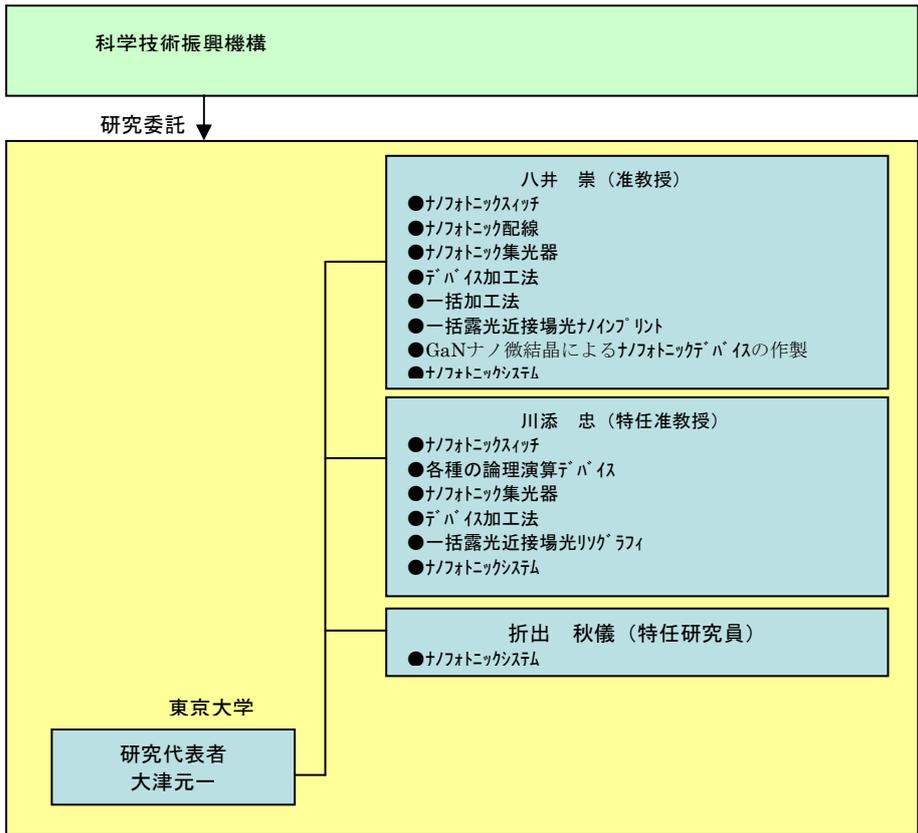
第4次(平成18年度)の研究体制



第5次(平成19年度)の研究体制



第6年次前半期(平成20年度4月~9月)の研究体制



第6年次後半期(平成20年度10月～4月)の研究体制

(2)メンバー表

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
大津 元一	東京大学	教授	研究代表者	平成15年10月～ 平成21年3月
八井 崇	科学技術振興機構	JST 研究員	(1c) ナノフォトニック配線 (2a) ナノフォトニックデバイス製作のための加工法 (2b) 一括加工法 (2d) 一括露光近接場光ナノインプリント (2e) 酸化亜鉛ナノロッドを用いた近接場光触媒	平成15年10月～ 平成20年3月
	東京大学	准教授	(1c) ナノフォトニック配線 (2a) ナノフォトニックデバイス製作のための加工法 (2b) 一括加工法 (2d) 一括露光近接場光ナノインプリント (2e) GaN ナノ微結晶によるナノフォトニックデバイスの作製	平成20年4月～ 平成21年3月
川添 忠	科学技術振興機構	JST 研究員	(1a) ナノフォトニック・スイッチ (1b) 各種論理演算デバイス (1d) ナノフォトニック集光器 (2a) ナノフォトニックデバイス製作のための加工法 (2c) 一括露光近接場光リソグラフィ (3) ナノフォトニックシステム	平成15年10月～ 平成19年3月
	東京大学	特任准教授	(1a) ナノフォトニック・スイッチ (1b) 各種論理演算デバイス (1d) ナノフォトニック集光器 (2a) ナノフォトニックデバイス製作のための加工法 (2c) 一括露光近接場光リソグラフィ (3) ナノフォトニックシステム	平成19年4月～ 平成21年3月
鈴木 貴之	ウシオ電機株式会社		●ナノ光加工、近接場光リソグラフィのための光源開発	平成16年1月～ 平成19年3月

成瀬 誠	独立行政法人通信 総合研究所		●ナノフォトニックシステム の検討	平成 16 年 3 月～ 平成 21 年 3 月
大谷 直毅				
折出 秋儀	科学技術振興機構	JST 研究員	●研究チーム管理 (3)ナノフォトニックシステム	平成 16 年 4 月～ 平成 19 年 6 月
	東京大学	特任研究員	●研究チーム管理	平成 19 年 7 月～ 平成 21 年 3 月
遠竹 智子	科学技術振興機構	JST チーム事務 員	●研究チーム事務	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 12 月
大川 秀樹	株式会社東芝		●近接場光リソグラフィ用の レジスト材料、プロセス開発	平成 16 年 4 月～ 平成 17 年 3 月
	東芝ライテック		●近接場光リソグラフィ用の レジスト材料、プロセス開発	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
納谷 昌之	富士写真フイルム 株式会社		●一括露光近接場光リソグラ フィとナノ周期構造光デバイ ス	平成 16 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
福田 浩章	株式会社リコー		●ナノフォトニックデバイと その加工	平成 16 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
三宮 俊				
林 定植	東京工業大学大学 院	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 16 年 5 月～ 平成 18 年 3 月
野村 航	東京大学大学院	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 16 年 5 月～ 平成 18 年 3 月
柳楽 崇	東京工業大学大学 院	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 16 年 5 月～ 平成 17 年 3 月
小林一智	東京工業大学大学 院	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 16 年 5 月～ 平成 17 年 3 月
河本 聡子	国際基督教大学	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 16 年 5 月～ 平成 17 年 3 月
小倉かほる	東京工業大学大学 院	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 16 年 5 月～ 平成 16 年 12 月
北村 心	東京大学大学院	JSTT 研究補助員	●酸化亜鉛ナノロッドの成長 条件とセキュリティデバイス 動作のデータ収集、整理	平成 16 年 6 月～ 平成 20 年 9 月
米満 弘樹	東京大学大学院	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 16 年 6 月～ 平成 19 年 3 月
仲島 祐樹	東京大学	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 16 年 6 月～ 平成 17 年 3 月
中俣 徹	東京大学大学院	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 17 年 5 月～ 平成 19 年 3 月
山本 巧	東京大学大学院	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 17 年 5 月～ 平成 20 年 9 月
丁 亨洙	東京大学大学院	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 17 年 5 月～ 平成 20 年 3 月
広瀬 展明	東京大学	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 17 年 5 月～ 平成 18 年 3 月

田中 俊輔	東京大学大学院	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 18 年 6 月～ 平成 20 年 3 月
安井 雅章	東京大学	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 18 年 6 月～ 平成 19 年 3 月
金 俊亨	東京大学	JSTT 研究補助員	●研究データ収集、整理	平成 18 年 7 月～ 平成 19 年 3 月
堀 裕和	山梨大学大学院	教授	●ナノフォトニックデバイス における講演及び助言	平成 17 年 4 月～ 平成 21 年 3 月
坂野 斎	山梨大学大学院	准教授	●ナノフォトニックデバイス における講演及び助言	平成 17 年 4 月～ 平成 21 年 3 月
小林 潔	東京工業大学大学院	教授	●ナノフォトニックデバイス における講演及び助言	平成 17 年 4 月～ 平成 21 年 3 月
安浦 寛人	九州大学大学院	教授	●システム VLSI の現在と光への 期待について講演	平成 17 年 4 月～ 平成 17 年 4 月
飯塚 紀夫	(株)東芝	研究主務	●GaN 系サブバンド間遷移光 スイッチ技術について講演	平成 17 年 8 月～ 平成 17 年 8 月
赤尾 佳則	科学警察研究所	研究員	●偽造防止/偽造鑑定技術・セ キュリティ技術の現状と課題 について講演	平成 17 年 10 月～ 平成 17 年 10 月
柴田 直	東京大学	教授	●生物に学ぶ情報処理とその ハードウェア化・ナノフォトニ クスへの期待について講演	平成 17 年 11 月～ 平成 17 年 11 月
竹中 充	東京大学	研究員	●集積フォトニクスと全光フ リップフロップについて講演	平成 17 年 11 月～ 平成 17 年 11 月
寺田 俊子	東京大学	事務補佐員	●研究チーム事務	平成 18 年 12 月～ 平成 20 年 9 月
杉山 博紀	東京大学大学院	JSTT 研究補助員	●電流駆動型ナノフォトニッ クデバイスのデータ収集、整理	平成 19 年 5 月～ 平成 20 年 9 月
高橋 永久	東京大学大学院	JSTT 研究補助員	●非断熱形近接場光リソグラ フィのデータ収集、整理	平成 19 年 5 月～ 平成 20 年 9 月
大政 純	東京大学	JSTT 研究補助員	●ナノフォトニックデバイスの 四波混合動作のデータ収集、 整理	平成 19 年 5 月～ 平成 20 年 3 月
金子 昌賢	東京大学	JSTT 研究補助員	●ナノ微粒子への磁性元素ド ープのデータ収集、整理	平成 19 年 5 月～ 平成 20 年 6 月
小池雅人	独立行政法人日本 原子力研究開発機 構量子ビーム応用 研究部門光量子ビ ーム利用研究ユニ ット先端光量子機 能デバイス開発研 究グループ	研究主席	●微細加工の X 線用光学素子 作製への応用可能性について 講演	平成 19 年 8 月～ 平成 19 年 8 月
青木貞雄	筑波大学数理物質 科学研究科	教授	●バイオ、医用 X 線技術と微細 加工への期待について講演	平成 19 年 8 月～ 平成 19 年 8 月
王 曉星	東京大学大学院	JSTT 研究補助員	●ナノフォトニクス原理による 情報セキュリティ動作検証 のデータ収集、整理	平成 19 年 11 月～ 平成 20 年 9 月
原口雅宣	徳島大学工学部光 応用工学科	准教授	●FDTD 計算法の現状と問題 点、将来展望について講演	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 9 月
行武壮太郎	東京大学大学院	技術補佐員	●研究データ収集、整理	平成 20 年 6 月～ 平成 20 年 9 月

太田 竜一	東京大学大学院	技術補佐員	●研究データ収集、整理	平成20年6月～ 平成20年9月
劉 洋	東京大学	技術補佐員	●研究データ収集、整理	平成20年6月～ 平成20年9月
森島 哲	東京大学	技術補佐員	●研究データ収集、整理	平成20年6月～ 平成20年9月
藤原 智史	東京大学	技術補佐員	●研究データ収集、整理	平成20年6月～ 平成20年9月
福井満壽夫	徳島大学大学院	教授	●FDTD 計算法とその近接場光分布の動的特性評価への応用について講演	平成20年8月～ 平成20年8月
小路口 暁	NEC	主任	●協同現象を利用したナノ寸法パルス光源の可能性について講演	平成20年12月～ 平成20年12月
塚田 捷	早稲田大学	教授	●固体物理の観点と Dressed photon との類似性について講演	平成20年12月～ 平成20年12月
Gyu-Chul Yi	Pohang Univ.	(准教授クラス)	●ZnO ナノロッドの近年の研究成果およびその応用について講演	平成21年2月～ 平成21年2月

7. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要(目的、内容等)
平成 15 年 12/8～12/9	研究打合せ会 (第 1 回)	天 幸 ビ ル 17(町田市)	18 名	参加社及びメンバーの研究 構想・進捗状況の発表
平成 16 年 3/8～3/9	研究打合せ会 (第 2 回)	同上	12 名	同上
平成 16 年 6/17～6/18	研究打合せ会 (第 3 回)	同上	22 名	同上
平成 16 年 9/16～9/17	研究打合せ会 (第 4 回)	同上	19 名	同上
平成 16 年 12/15～12/16	研究打合せ会 (第 5 回)	同上	23 名	同上
平成 17 年 3/7～3/8	研究打合せ会 (第 6 回)	同上	23 名	同上
平成 17 年 6/16～6/17	研究打合せ会 (第 7 回)	同上	26 名	同上
平成 17 年 9/29～9/30	研究打合せ会 (第 8 回)	同上	24 名	同上
平成 17 年 12/14～12/15	研究打合せ会 (第 9 回)	同上	20 名	同上
平成 18 年 3/29～3/30	研究打合せ会 (第 10 回)	同上	20 名	同上
平成 18 年 7/6～7/7	研究打合せ会 (第 11 回)	同上	21 名	同上
平成 18 年 9/26～9/27	研究打合せ会 (第 12 回)	同上	22 名	同上
平成 18 年 12/13～12/14	研究打合せ会 (第 13 回)	同上	23 名	同上
平成 19 年 3/19～3/20	研究打合せ会 (第 14 回)	東京大学	20 名	同上
平成 19 年 7/4～7/5	研究打合せ会 (第 15 回)	東京大学	15 名	ナノフォトニクス研究の研究 構想・進捗状況の発表
平成 19 年 11/19～11/20	研究打合せ会 (第 16 回)	東京大学	15 名	参加社及びメンバーの研究 構想・進捗状況の発表
平成 20 年 3/17～3/18	研究打合せ会 (第 17 回)	東京大学	15 名	同上
平成 20 年 6/12	研究打合せ会 (第 18 回)	東京大学	20 名	同上

平成 20 年 8/19～8/20	研究打合せ会 (第 19 回)	東京大学	20 名	同上
平成 20 年 12/1～12/2	研究打合せ会 (第 20 回)	東京大学	20 名	同上
平成 21 年 3/16～3/17	研究打合せ会 (第 21 回)	東京大学	20 名	同上

(2) 招聘した研究者等

氏 名 (所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
なし			

8. 発展研究による主な研究成果

(1) 論文発表 (英文論文 51 件 邦文論文 0 件)

第 1 年次(平成 15 年度)

・なし

第 2 年次(平成 16 年度)

- 1) Yatsui, T.; Lim, J.; Ohtsu, M.; An, S.J.; Yi, G.-C. Evaluation of the discrete energy levels of individual ZnO nanorod single-quantum-well structures using near-field ultraviolet photoluminescence spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.* 85(5), 727-729 (2004).
- 2) Yamazaki, S.; Yatsui, T.; Kim, Tae-Won.; Fujioka, H.; Ohtsu, M. Room-temperature synthesis of ultraviolet-emitting nanocrystalline GaN films using photochemical vapor deposition. *Appl. Phys. Lett.* 85(15), 3059-3061 (2004).
- 3) Kawazoe, T.; Kobayashi, K.; Takubo, S.; Ohtsu, M. Nonadiabatic photo-dissociation process using an optical near field. *J. Chem. Phys.* 122(2), 024715 1-5 (2005).
- 4) Yatsui, K.; Gunji, M.; S.C., Yang.; Suematsu, H.; Yatsui, T.; Ohtsu, M. Blue light emission from ultrafine nanosized powder of silicon produced by intense pulsed ion-beam evaporation. *J. J. Appl. Phys.* 44(2), L92-L94 (2005).

第 3 年次(平成 17 年度)

- 5) Kobayashi, K.; Sangu, S.; Kawazoe, T.; Ohtsu, M. Exciton dynamics and logic operations in a near-field optically coupled quantum-dot system. *J. of Luminescence.* 112(Issues 1-4), 117-121 (2005).
- 6) Kawazoe, T.; Kobayashi, K.; Ohtsu, M. Anti-parallel coupling of quantum dots with an optical near-field interaction. *E-Journal of Surface Science and Nanotechnology.* , Vol. 3, 74-77(2005).
- 7) Kawazoe, T.; Maruyama, S.; Kobayashi, K.; Ohtsu, M. Observation of Faraday rotation and magnetic circular dichroism in an optical near-field probe coated with Fe. *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers.* , Vol. E88-C, 1850-1852 (2005).
- 8) Kawazoe, T.; Kobayashi, K.; Ohtsu, M. Anti-parallel dipole coupling of quantum dots via an optical near-field interaction. *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers.* , Vol. E88-C, 1845-1849 (2005).
- 9) Kawazoe, T.; Naruse, M.; Miyazaki, T.; Sangu, S.; Kobayashi, K.; Ohtsu, M, et.al. Nanophotonic computing based on optical near-field interactions between quantum dots. *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers.* , Vol. E88-C, 1817-1823 (2005).
- 10) Yatsui, T.; Nomura, W.; Ohtsu, M. Self-Assembly of Size- and Position-Controlled Ultralong Nanodot Chains using Near-Field Optical Desorption. *Nano Lett.* 5(12), 2548-2551 (2005).
- 11) Naruse, M.; Yatsui, T.; Nomura, W.; Hirose, N.; Ohtsu, M. Hierarchy in optical near-fields and its application to memory retrieval. *Opt. Exp.* 13(23), 9265-9271 (2005).
- 12) Yatsui, T.; Nomura, W.; Ohtsu, M. Size-, Position-, and Separation-Controlled One-Dimensional Alignment of Nanoparticles Using an Optical Near Field. *IEICE Transactions on Electronics,* E 88-C(9), 1798-1802(2005).
- 13) Lim, J.; Yatsui, T.; Ohtsu, M. Observation of Size-Dependent Resonance of Near-Field Coupling between a Deposited Zn Dot and the Probe Apex during Near-Field Optical Chemical Vapor Deposition. *IEICE Transactions on Electronics,* E 88-C(9). 1832-1835(2005).
- 14) Nomura, W.; Yatsui, T.; Ohtsu, M. A nano-dot coupler with a surface plasmon polariton condenser for optical far-/near-field conversion. *Appl. Phys. Lett.* 86(18), 181108 1-3 (2005).
- 15) Yatsui, T.; Ohtsu, M.; Yoo, J.; An, S.J.; Yi, G.-C. Near-field measurement of spectral anisotropy and optical absorption of isolated ZnO nanorod single-quantum-well structures. *Appl. Phys. Lett.* 87(3), 033101 1-3(2005).

- 16) Jang, E.S.; Bae, J.Y.; Yoo, J.; Park, W.I.; Kim, D.W.; Yi, G.Y.; Yatsui, T.; Ohtsu, M. Quantum confinement effect in ZnO/Mg_{0.2}Zn_{0.8}O multishell nanorod heterostructures. *Appl. Phys. Lett.* 88(2), 023102 1-3(2006).
- 17) Ito, H.; Yamamoto, K.; Takamizawa, A.; Kashiwagi, H.; Yatsui, T. Deflecting, focusing, and funnelling atoms by near-field light. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 8 S153-S160 (2006).
- 18) Kawazoe, T.; Naruse, M.; Sangu, S.; Kobayashi, K.; Ohtsu, M. Optical interconnects based on optical far- and near-field interactions for high-density databroadcasting. *Optics Express*, Vol. 14, 306-313 (2006).

第 4 年次 (平成 18 年度)

- 19) H. Yonemitsu, T. Kawazoe, K. Kobayashi, and M. Ohtsu, "Nonadiabatic photochemical reaction and application to photolithography", *J. Luminescence*, Vol. 122-123, 2007, PP.230-233.
- 20) T. Kawazoe, T. Yatsui, and M. Ohtsu, "Nanophotonics using optical near-fields," *J. Non-Cryst. Soli.*, Vol. 352, Issues 23-25, July 2006, pp.2492-2495 [Invited Paper].
- 21) T. Kawazoe, K. Kobayashi, K. Akahane, M. Naruse, N. Yamamoto, and M. Ohtsu, "Demonstration of nanophotonic NOT gate using near-field optically coupled quantum dots", *Applied Physics B*, Volume 84 No. 1-2, July 2006, pp. 243 - 246.
- 22) T. Kawazoe, K. Kobayashi, and M. Ohtsu, "Near-field optical chemical vapor deposition using Zn(acac)₂ with a non-adiabatic photochemical process", *Applied Physics B*, Volume 84 No. 1-2, July 2006, pp. pp. 247 - 251.
- 23) M. Naruse, T. Kawazoe, S. Sangu, K. Kobayashi, and M. Ohtsu, "Optical interconnects based on optical far- and near-field interactions for high-density data broadcasting", *Opt. Express*, Vol. 14, 2006, pp. 306-313.
- 24) T. Yatsui, J. Lim, T. Nakamata, K. Kitamura, M. Ohtsu, and G.-C. Yi, "Low-temperature (~270°C) growth of vertically aligned ZnO nanorods using photoinduced metal organic vapor phase epitaxy," *Nanotechnology*, Vol. 18, No. 6, February 2007, pp. 065606-1 - 065606-4
- 25) T. Yatsui, M. Ohtsu, S. J. An, J. Yoo, and G.-C. Yi, "Evaluating the quantum confinement effect of isolated ZnO nanorod single-quantum-well structures using near-field ultraviolet photoluminescence spectroscopy," *Opt. Rev.*, Vol. 13, No. 4, July/August 2006, pp.218-221
- 26) K. Kitamura, T. Yatsui, and M. Ohtsu, "Near-field evaluation of a quantum size effect in self-aligned GaN whiskers fabricated by photochemical etching," *Opt. Rev.*, Vol. 13, No. 4, July/August 2006, pp.222-224.
- 27) T. Yatsui, Y. Nakajima, W. Nomura, and M. Ohtsu, "High-resolution capability of optical near-field imprint lithography," *Appl. Phys. B*, Vol. 84, No. 1-2, July 2006, pp.265-267
- 28) W. Nomura, M. Ohtsu, and T. Yatsui, "Efficient optical near-field energy transfer along an Au nanodot coupler with size-dependent resonance," *Appl. Phys. B*, Vol. 84, No. 1-2, July 2006, pp.257-259.
- 29) T. Yatsui, M. Naruse, and M. Ohtsu, "Plasmonic circuits for nanophotonic devices," *Proc. SPIE*, Vol. 6323, August 13-17, 2006, San Diego, CA, USA, pp.632300-1 - 632300-9.

第 5 年次 (平成 19 年度)

- 30) T. Yatsui, S. Sangu, T. Kawazoe, M. Ohtsu, S. J. An, J. Yoo, and G.-C. Yi, "A nanophotonic switch using ZnO nanorod double-quantum-well structures," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, No. 22, May 2007, pp.223110-1 - 223110-3
- 31) T. Kawazoe, K. Kobayashi, and M. Ohtsu, "Initial Growth Process of a Zn Nanodot Fabricated using Nonadiabatic Near-field Optical CVD," *Journal of Photopolymer Science and Technology*, Vol. 20, Number 1, June 2007, pp.129-131.
- 32) T. Yatsui, S. Sangu, T. Kawazoe, M. Ohtsu, S. J. An, J. Yoo, and G.-C. Yi, "A nanophotonic switch using ZnO nanorod double-quantum-well structures," the June 11, 2007 issue of the *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology*
- 33) T. Yatsui, S. Sangu, T. Kawazoe, M. Ohtsu, S. J. An, J. Yoo, and G.-C. Yi, "A nanophotonic switch using ZnO nanorod double-quantum-well structures," the July 2007 issue of *Virtual Journal of Ultrafast Science* (Volume 6, Issue 7)
- 34) M. Naruse, T. Yatsui, K. Kitamura, H. Hori, and M. Ohtsu, "Generating small-scale structures

- from large-scale ones via optical near-field interactions,” *Optics Express*, Vol. 15, No. 19, August 2007, pp.11790–11797.
- 35) Takashi Yatsui, Gyu-Chul Yi, and Motoichi Ohtsu, “Progress in developing nanophotonic devices driven by an optical near-field,” *Proc. SPIE* 6779, 677906 (2007).
 - 36) T. Yatsui, T. Kawazoe, K. Kobayashi, and M. Ohtsu, “Near-field components and evaluation of the photoluminescence in Si nano-structure,” *J. Nanophotonics*, Vol. 1, Sep.2007, 011570
 - 37) T. Yatsui, W. Nomura, and M. Ohtsu, “A metallized slit-shaped pyramidal Si probe with extremely high resolution for 1.5 Tbit/in² density near-field optical storage,” *J. Nanophotonics*, Vol. 1, Sep.2007, 011550.
 - 38) W. Nomura, T. Yatsui, T. Kawazoe, and M. Ohtsu, “Dissipated optical near-field energy transfer between quantum dots for impedance matching of nanophotonic signal transmitter,” *J. Nanophotonics*, Vol. 1, November 2007, 011591.
 - 39) T. Kawazoe, M. Ohtsu, Y. Inao. And R. Kuroda, "Exposure dependence of the developed depth in nonadiabatic photolithography using visible optical near fields," *Journal of Nanophotonics*, Vol. 1, December 2007, pp011595 1-9.
 - 40) M. Naruse, T. Yatsui, T. Kawazoe, Y. Akao, and M. Ohtsu, “Design and simulation a nanophotonic traceable memory using localized energy dissipation and hierarchy of optical near-field interactions,” *IEEE Tran. Nanotech.*, Vol.: 7, Issue 1, January 2008, pp.14–19.
 - 41) N. Tate, W. Nomura, T. Yatsui, M. Naruse, and M. Ohtsu, “Hierarchical Hologram based on Optical Near- and Far-Field Responses,” *Optics Express*, Vol. 16, Issue 2, January 2008, pp.607–612.

第 6 年次 (平成 20 年度)

- 42) 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," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 94, No. 9, Mar. 2009, 083113 1-3.
- 43) S. Yamazaki, T. Yatsui, and M. Ohtsu, "Room-temperature growth of UV-emitting dendritic GaN fractal nanostructures using photochemical vapor deposition," *Appl. Phys. Exp.*, Vol. 2, No. 3, Mar. 2009, 031004 1-3.
- 44) M. Ohtsu, T. Kawazoe, T. Yatsui, and M. Naruse, "Nanophotonics: Application of dressed photons to novel photonic devices, and systems," *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 14, No. 6, (November/December 2008), 1404-1417 [Invited Paper].
- 45) T. Yatsui, H. Jeong, and M. Ohtsu, "Controlling the energy transfer between near-field optically coupled ZnO quantum dots," *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, Vol. 93, No.1, Oct. 2008, 199-202.
- 46) T. Yatsui, K. Hirata, W. Nomura, M. Ohtsu, and Y. Tabata, "Realization of an ultra-flat silica surface with angstrom-scale average roughness using nonadiabatic optical near-field etching," *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, Vol. 93, No. 1, Oct. 2008, 55-57.
- 47) K. Kitamura, T. Yatsui, and M. Ohtsu, "Optical and Structural Properties of ZnO Nanorods Grown on Polyimide films," *Appl. Phys. Exp.*, Vol.1, No.8, Aug. 2008, 081202 1-3.
- 48) K. Kitamura, T. Yatsui, M. Ohtsu, and G-C. Yi, “Fabrication of vertically aligned ultrafine ZnO nanorods using metal-organic vapor phase epitaxy with a two-step temperature growth method,” *Nanotechnology*, Vol. 19, No. 17, April 2008, pp.175305 1-3.
- 49) T. Kawazoe, S. Tanaka, and M. Ohtsu, “A single-photon emitter using excitation energy transfer between quantum dots”, *J. Nanophoton.* Vol. 2, Oct. 2008, 029502 1-6.
- 50) T. Kawazoe and M. Ohtsu, “Dependence of the Deposition Rate on Probe-Substrate Separation in Nonadiabatic Near-Field Optical CVD”, *Journal of Photopolymer Science and Technology*, Volume 21, No. 6, Dec. 2008, 741-745.
- 51) T. Kawazoe, H. Fujiwara, K. Kobayashi and M. Ohtsu “Visible light emission from dye molecular grains via infrared excitation based on the nonadiabatic transition induced by the optical near field”, *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Nanophotonics and Optical MEMS*, to be published, September/October 2009 (出版予定), 1-7.

(2) 口頭発表

①学会

国内 108 件, 海外 87 件

②その他

国内 15 件, 海外 5 件

(3) 特許出願 (SORST 研究の成果に関わる特許 (出願人が JST 以外のものを含む))

	件数
国内出願	30(注 1)
海外出願	0
計	30(注 1)

(注 1) 他に出願審査中の 1 件有り。

(4) その他特記事項

特に無し。

9. 結び

【研究の目標等から見た達成度、得られた成果の意義等の自己評価】

1960年にレーザーが発明されたことを契機に大きく進展した光科学技術に関して、その基本的概念に関する仮説の設定と検証は欧米の研究者に負うところが多い。我が国では半導体レーザーなどの「モノづくり」で貢献したものの、1990年代以降は光技術の限界（その最大かつ基本的要因が回折限界である）が見え始め、現在は飽和期に達している。そのような中、大津の基礎研究から生まれ、ERATO, SORSTを経て成長したナノフォトニクスは、近接場光の存在とその理論モデル(dressed photon 描像)の提案(すなわち仮説の設定)、その実験による検証、それらに基づいた、新たな現象(光学禁制準位へのエネルギー移動、非断熱過程)の発見とそのデバイス、加工、システム応用といった一連の基礎科学から技術、産業化へと至る研究開発を行うことが出来た。これは冒頭にのべた光科学技術の歴史の中で、我が国発の先導的な研究としてきわめてまれな例である。これらの研究開発課題ははSORSTの目標設定時点で先導的・独創的であり、5年間の研究活動を通じ当初の目標が十分達成された。また研究実施期間中に生まれた新たな発想により、追加目標も複数設定され、それも優れた成果を生んだ。さらに、これらの研究活動が他省庁の大型プロジェクト研究開発事業、産学連携研究開発事業を生み、これらも大津が代表を務めるなど、国内での波及効果は著しく大きい。

材料、デバイス、加工、システムに至るまで、得られた成果は当初の構想どおり、従来の伝搬光を使ったのでは原理的に不可能なものであり、まさにナノフォトニクスの本質である「質的変革」が実証された。このことはまさに基本的概念から応用まで、欧米に追いつかず、自分たちの頭で考え、多くの理論的・実験的、さらに社会的困難を乗り越えて得られた結果であり、優れた成果が得られたと自己評価している。

【今後の研究の展開】

これまでは光科学技術の方法論としてナノフォトニクスを研究してきた。その結果、従来の光技術の多くの分野をナノフォトニクスで置き換えることが出来る可能性を見出した。それらは情報伝送・処理・記録、加工、計測、表示、エネルギー変換、化学・バイオ技術などにわたる。ナノフォトニクスは今後の社会を支える基盤となり、使用者が気づかなくとも日常生活の至る所で使われるようになると思われる。なぜなら近接場光は自然界の至る所に発生する普遍的な概念だからである。

先のERATOプロジェクトでは場の量子論、光科学、凝縮系の物理の概念を融合し、近接場光をdressed photonの描像でとらえる基礎的研究を行った。本SORSTプロジェクトではそれを発展させ、dressed photonのエネルギー交換を利用することにより、図34に示すように、新たな光学自由度および局所反応場を創生し、それをデバイス、加工、システム、さらにはエネルギー変換へと応用した。今後はさらに基礎研究を推進し、ナノ寸法の局所領域での光子、励起輸送と緩和の問題、さらには非断熱的光化学反応の素過程などを究明することにより、dressed photon science and technologyと称すべき、我が国発の新しい科学技術体系を構築したい。これにより、従来未使用の光や物質が活用でき、光と物質の節約・保護、自然資源の有効活用、人類の生活の質の向上が期待される。

なお、本SORSTプロジェクトを終了するにあたり、上記の新たな光学自由度(A)、局所反応場(B)を利用することにより、今までにない太陽光利用の可能性をいくつか検討した。それらは

1. 太陽光の未使用波長成分を利用

- (1) 赤外光→可視光変換による光電変換デバイスの広帯域化 (A、B)
- (2) 太陽電池の高効率化(赤外光成分を利用) (B)

2. 今まで光を使っていなかった技術に太陽光を利用

- (1) 赤外光による光合成 (A、B) ----食用野菜生育の高効率化
- (2) 太陽光による燃料電池 (B) ----昇圧、高効率化

- (3) 太陽光による光分解 (B) ---- 空気の浄化・CO中毒防止用の壁紙・窓材、
ナノスチームエンジン、インクジェット

3. 各種技術の省エネルギー化のために太陽光を利用

- (1) 太陽光によるガラス、結晶、プラスチック基板表面のオンゲストローム平坦化 (B)

----太陽電池の高効率化（窓材の光透過率向上）、大面積光学基板の一括平坦化

- (2) 太陽光エネルギーをナノ領域に集中 (B)

----太陽光励起レーザー（電源不要）、高開口数レンズ、屋外でも明るいディスプレイなどである。今後はこれらの方向へも研究を展開し、社会貢献していきたいので、支援をお願いしたい。

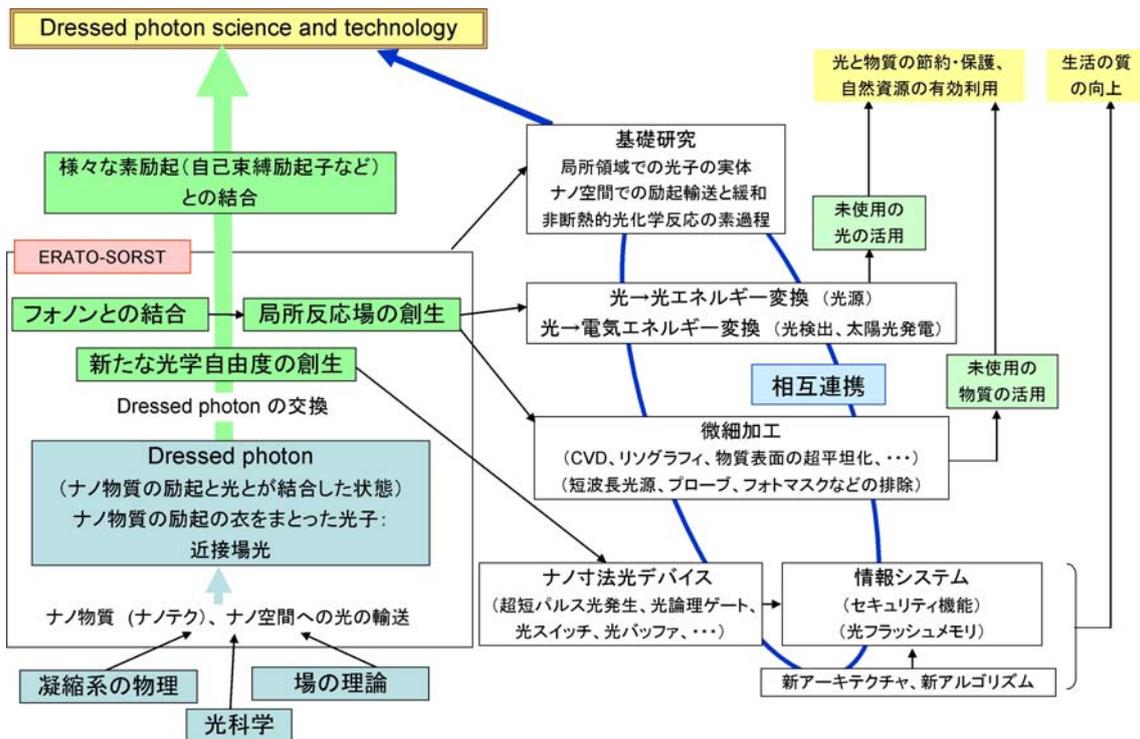


図34 今後の研究の展開の方向

【研究代表者としてのプロジェクト運営について（チーム全体の研究遂行、研究費の使い方、若手研究者の育成等）】

ERATO時代とは違い技術参事の雇用が認められなかったため、運営は研究員などの手弁当に頼らざるを得なかった。また、研究計画書の提出の頃に提示された研究費にくらべ、申請直前に再度提示された研究費はかなり少額で、申請直前になってプロジェクト構想を大幅に見直す必要が生じ、開始以前にだいたい混乱した。

複数の若手研究者を雇用できるほどの予算額ではなかったため、ERATO当時の研究者を2名のみ継続雇用し研究を推進した。この2名もプロジェクト中途から他機関へと転職させ、その後彼らにはボランティアで研究に協力していただいた。このような中で、当初の構想以上の優れた成果が得られたのは、参画した少数の研究者の献身的な努力に負うところが多い。これらの苦労を通じて、これらの研究者は成長したと思われ、これが若手研究者の育成に対応すると思われる。なお、プロジェクト途中で更に若い研究者を雇用することは予算上不可能だったので、若手研究者の直接的な育成はない。

【その他戦略的創造研究推進事業に対するご意見、ご要望】
特になし。

【実験風景】



八井准教授の実験風景

撮影日:2009年3月



川添特任准教授の実験風景

撮影日:2009年3月



研究打合せ会の風景

撮影日:2009年3月