

**(独) 科学技術振興機構  
創造科学技術推進事業  
追跡評価用資料**

**大津局在フォトンプロジェクト  
(1998-2003)**

**2009. 12. 24**

## 目次

目次.....	1
概要.....	3
第1章 プロジェクトの概要.....	6
1.1 スタート時の背景とプロジェクトの狙い.....	6
1.2 研究成果全般.....	10
1.3 近接場光理論の構築.....	10
1.4 ナノフォトニクス.....	11
1.5 アトムフォトニクス.....	15
第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況.....	18
2.1 各研究テーマの展開および現在の状況.....	18
2.1.1 SORST「ナノフォトニックデバイスとシステムの開発」(2003~2008).....	18
2.1.2 アトムフォトニクス(2003~).....	28
2.1.3 NEDO「大容量光ストレージ技術」(2002~2006).....	33
2.1.4 NEDO「低損失オプティカル新機能部材」(2006~2011).....	36
2.1.5 総務省 SCOPE プロジェクト「光通信用超高集積光ノードシステムの開発」 (2003-2005).....	37
2.1.6 JST 委託開発課題「近接場光学顕微分光システム」.....	37
2.1.7 文科省「リソグラフィ装置の開発」プロジェクト(2004-2006).....	38
2.1.8 NEDO「エネルギー使用合理化技術戦略開発」プロジェクト(2008-2011).....	39
2.1.9 その他の共同研究実施状況.....	40
2.1.10 現在の状況.....	41
2.2 プロジェクトメンバーの活動状況.....	42
第3章 プロジェクト成果波及と展望.....	43
3.1 科学技術への波及.....	43
3.1.1 2 国間交流の進展.....	43
3.1.2 ナノフォトニクス研究センターの設立とシンポジウムの開催.....	43
3.1.3 統計資料に見るプロジェクトの影響度.....	44
3.1.4 近接場光の動作原理を利用できる技術の例.....	49
3.2 社会経済への波及.....	49
3.2.1 社会面.....	49
3.2.2 経済面.....	52

Appendix.....	54
A. 論文リスト.....	54
B. 特許リスト.....	54
C. 受賞リスト.....	54
D プロジェクトメンバーの動静.....	54

## 概要

近未来の光関連技術に対する要請として、デバイスの高度集積や光リソグラフィの開発、光メモリーの高密度化などが上げられているが、従来の伝搬光を使用する限り「回折限界の壁」のためにナノ寸法の領域まで踏み込むことは困難な状況にあった。この制限に対するブレイクスルーとして、大津元一教授はかねてから近接場光の特徴を活かしてナノメートル寸法の微小なデバイスや光加工法を可能にする技術「ナノフォトンクス」を提案しており、本プロジェクト「大津局在フォトン」でその実現に向けての第一歩をスタートさせた。プロジェクトでは、まず近接場光に関する量子力学的理論を構築し、その応用としてナノ寸法間の電磁的相互作用を利用したナノ次元のデバイスや光加工法を開発した。さらに近接場光により原子操作を行う技術「アトムフォトンクス」を蓄積した。とくに種々の応用展開の出発点になった、「非断熱プロセス」および「量子ドットなどの微粒子中の電気双極子禁制順位へのエネルギー移動」は特筆すべき発見である。前者はナノ加工の基本原則として、後者はナノデバイスの設計指針として、その後の研究開発にきわめて重要な役割を果たしている。

これらの成果は、その後 JST-SORST「ナノフォニックデバイスとシステム」、NEDO「大容量光ストレージ技術」・「低損失オプティカル新機能部材」・「エネルギー使用合理化技術戦略」、文科省「リソグラフィ装置」・総務省「光通信用超高集積光ノードシステム」などの新たなプロジェクトに引き継がれて、応用面に重点を置いた検討が広範に進められた。

まず量子ドットの材質としては、モデル的な CuCl や ZnO 系から InAlAs、InAs などのより実用に適する化合物に重点が移され、デバイスの作動温度も当初の極低温から 210 K まで上昇して現実的なアクセスが可能な段階に達している（現在では 300 K も視野のうちに入っている）。デバイスの種類についても、スイッチや導波路・集光器（ナノファウンテン）・論理演算素子など幅広い領域にわたり検討が行われた。

光加工の面では、近接場光の特質を活かした非断熱プロセスの応用展開がさらに推進され、光 CVD や光解離の他に光リソグラフィやガラス、シリコンの表面平坦化処理などが加わり、種々の材料に適用されて新規なナノ構造の創出に寄与している。

さらにシステム関連でも、光情報処理、光メモリーシステム、光集計機能、CAM(Content Addressable Memory)、階層的ホログラフィ、超高集積光ノードなどの各テーマで実証を含めた開発が行われ、それぞれ一定の見通しを得るに至っている。とくに NEDO の大容量光プロジェクトで記録密度 1Tb/inch<sup>2</sup> の技術を達成したことは大きい成果である。

また独自のファイバープローブをキーテクノロジーとして日本分光と共同で開発された走査型近接場光学顕微分光システムは 1999 年に製品化され、現在国際標準化の作業が行われている。なお本製品は第 30 回井上春成賞を受賞した。

近接場光の研究は、現在「励起された物質の衣をまとった光子」、いわゆる“dressed photon”の形で扱われている。物質と光の融合した状態を光の側から考える立場であり、これにより電気双極子禁制準位への光励起やコヒーレントフォノンとの結合による非断熱的光化学反応などの新しい現象が理論的に記述可能となった。応用面では実用化に向けての大面积加工法やサブナノレベルでの表面平坦化が重点的に検討され、デバイス関連では光スイッチ・クロック発生器・メモリー、ナノ光配線—多重・自立配線が大きいテーマとなっている。

本プロジェクトの成果を国外に広めるとともに、海外からの情報を収集する目的で2国間交流を行っている。すでに米、オーストラリア、ドイツとはセミナーやワークショップの形で進めており、このうちドイツとの交流は共同研究に発展した。スウェーデンやフィンランドに対しても2009年にワークショップを開催する予定である。

本プロジェクトの波及効果として、NEDO 特別講座「ナノフォトニクス総合的展開（ナノフォトニクスを核とした人材育成、産学連携等の総合的展開）」が開設され(2005～2011)、さらに「ナノフォトニクス工学推進機構(2005)」や「ナノフォトニクス研究センター(2008.4)」が設立されるとともに、「ナノフォトニクス総合的展開シンポジウム」が開催された(2008.7)。

近接場光の動作原理を利用できる分野は光情報通信、光情報処理、光情報記録、光加工、光計測、入出力インターフェイス、ディスプレイシステム、化学・バイオ・医薬応用分野、メカニカル分野(MEMS)、エネルギー分野と多岐にわたっている。このうち近い将来に実用化される見通しの大きいものに、表面平坦化、可視光の利用（太陽電池・光触媒の高効率化）、白色 LED、クロック発生器、バイオマーカーなどが上げられ、それによりもたらされる市場の規模としては、2015年7兆円、2020年26兆円と予測されている。

なお ERATO のテーマのうち、アトムフォトニクスの部分は SORST や NEDO の応用プロジェクトには入ることなく、すべて東京工大の伊藤（治彦）研究室で現在まで継承されている。ここでは原子の検出やファネル・偏向・捕獲など ERATO の結果を基礎レベルでさらに掘り下げる研究を行い、それぞれのデバイスについて、将来の実用化に向けたデータを蓄積するとともに、原子レンズや原子堆積、原子トンネル、スピנקラスタなどの新たなテーマへの拡大を進めている。

プロジェクトの展開状況 (まとめ)

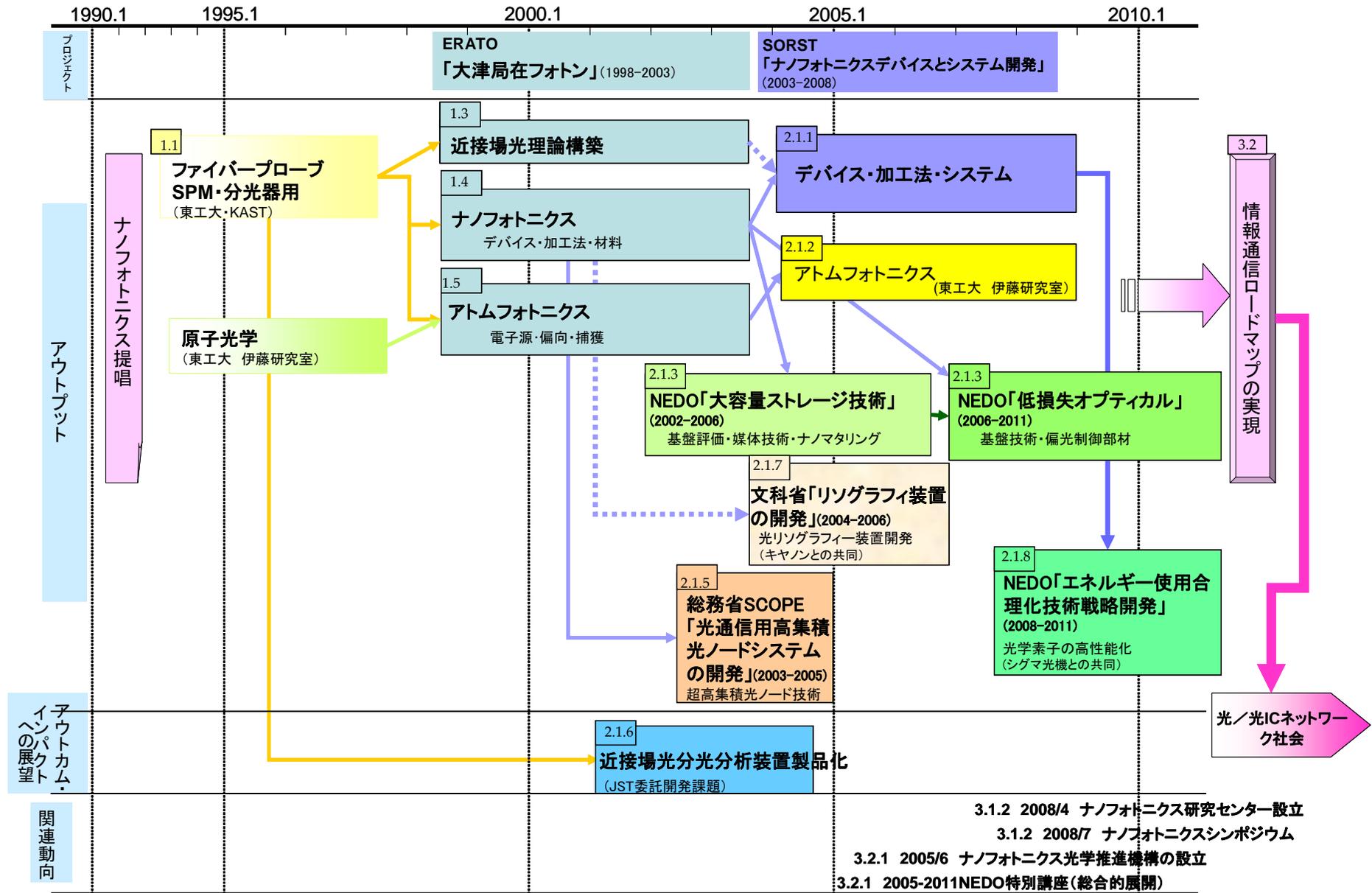


図 プロジェクトの展開状

## 第1章 プロジェクトの概要

### 1.1 スタート時の背景とプロジェクトの狙い

未来の情報化社会へ向けたアクセスの一環として、光情報通信・記録技術の視点から以下の三つの課題があげられている<sup>1</sup>。

- (1) 光ファイバー伝送システムにおける光デバイスの高度集積化
- (2) DRAM の技術革新—光リソグラフィーの加工精度向上
- (3) 光記憶システムの高密度化

これらの課題はいずれも既存の伝搬光を使った光技術では、「回折限界の壁」のためクリアすることが困難である(図 1, 図 2)。これを克服する有力な手段として、本プロジェクトの総括責任者大津から、「ナノフォトニクス」—ナノ寸法の超微細な物質と近接場光との局所的な電磁相互作用を利用する技術(図 3)—が提案された。この技術を使いこなすことにより、ナノ規格のデバイスやそれらを組み合わせたシステムを創製し、それにより前述の諸要請に応えることが本プロジェクトの狙いであった。より具体的には、近接場光の性質および物質との(電磁的)相互作用を明らかにし、その結果を用いた物質の超微細加工法や原子操作法の基盤を確立し、さらには新機能を備えたナノ寸法の光デバイス(光源・スイッチ・導波路他)やシステムへ(究極的にはナノフォトニック IC(図 4))の応用を図ることにあつた。この基本構想を実現するためのテーマとして、(1) 近接場光理論、(2) ナノフォトニクス、(3) アトムフォトニクス の研究課題を設定し、それぞれに対応するグループ編成を行って研究を推進した。

近接場光を光学顕微鏡の技術に活用することはすでに 1928 年に示唆されていた<sup>2</sup>が、その内容は古い光学体系の枠組み内での提案であり、実験的に裏付けられたものでもなかった。

1980 年代になって近接場光を利用した走査型プローブ顕微鏡(SPM)に関する研究が始められ、一定の成果があげられている<sup>3</sup>。

しかし現代的な視座の下に回折限界の制限に縛られた従来の光学から脱却し、パラダイムの転換や質的な変革につながる新しい科学・技術分野としての「近接場光学」が研究対象として定着するのは、本プロジェクトの総括責任者大津の先駆的・独創的な一連の研究成果に俟たねばならなかった。

この分野の本格的かつ正統的な発展のために必須不可欠であったキーテクノロジー

---

<sup>1</sup> (財)光産業技術振興協会編「光テクノロジーロードマップ報告書、情報通信分野」77(1998)

<sup>2</sup> Synge EA, Phil Mag 6,356, 1928

<sup>3</sup> (財)光産業技術振興協会編「極限光インフォトンクス技術に関する調査研究報告書」(2000)

としての「ナノメートルオーダーの先端部を備えた高効率ファイバープローブ」が、日本の卓越した光ファイバー技術を足場に大津らにより選択エッチング法で得られたのは1990年代前半<sup>4</sup>であり、これを一つの契機としてわが国の近接場光科学技術の分野が世界に先んじて展開されることになった（図5）。

本プロジェクトが発足した1998年までには大津（東京工大／神奈川技術アカデミー）の手で種々の機能に対応するナノファイバープローブが発表されており<sup>5, 6, 7</sup>、ナノデバイスの作製に向けての基盤も部分的に培われていた。また走査型プローブ顕微鏡（SPM）を主な対象とする実際面への応用<sup>8</sup>や近接場光を用いた分光分析の研究<sup>9</sup>も各所で進められていた。しかし量子力学をベースとする近接場光の理論づけや、“ナノフォトニクス”、“アトムフォトニクス”など、本来の意味における「近接場光の科学および技術」は本プロジェクトのスタートとともに始まったもので、まさにこの点に「局在フォトプロジェクト」の根源的な意義があったと考えてよい。

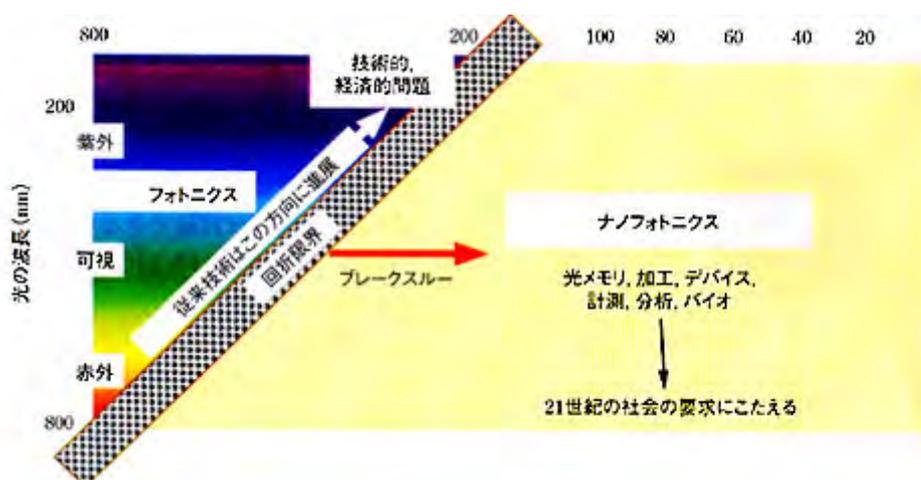


図 1 フォトニクスと回折限界(ナノフォトニクスの役割)<sup>10</sup>

<sup>4</sup> Pangaribuan T, et al., Jpn J Appl Phys, 31, L1302- L1304, 1992

<sup>5</sup> Yatsui T, et al., Appl Phys Lett, 72, 2090-2092, 1998

<sup>6</sup> Matsumoto T, et al., Opt Rev, 5, 369-373, 1998

<sup>7</sup> Kurihara K, et al., Anal Chem, 71, 3558-3566, 1999

<sup>8</sup> Saiki T, et al., Appl Phys Lett, 68, 2612-2614, 1996

<sup>9</sup> Mononobe S, et al., Opt Commun, 146, 45-48, 1998

<sup>10</sup> 電子情報通信学会誌, Vol.84 No.1 pp.26-32, 2001

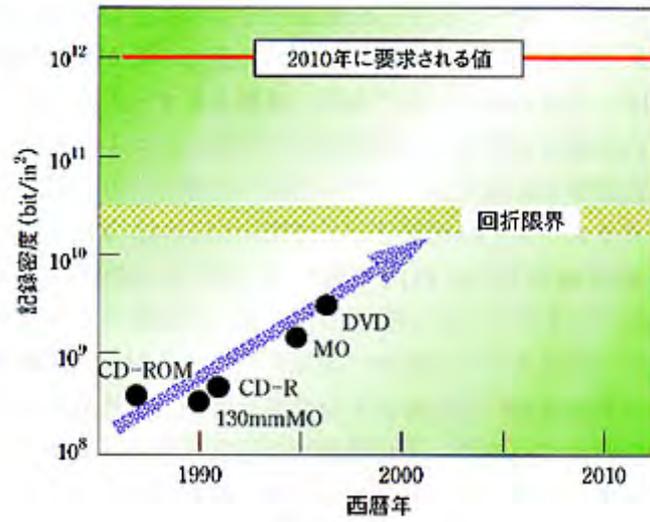


図 2 光メモリの記録密度<sup>10</sup>

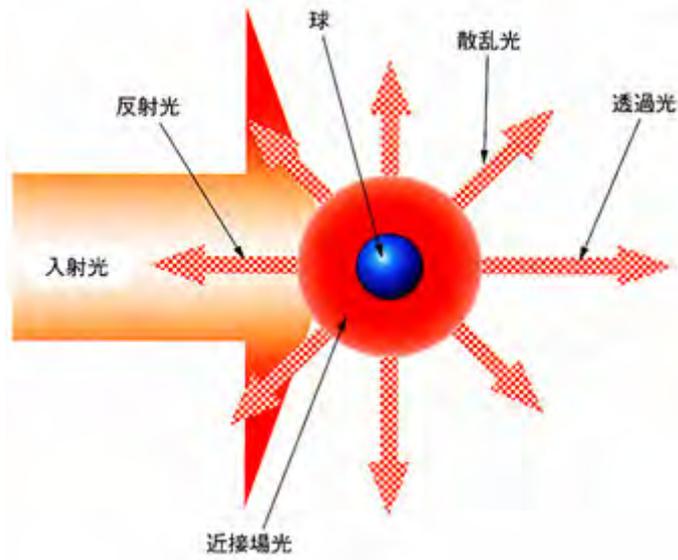


図 3 近接場光の発生<sup>10</sup>

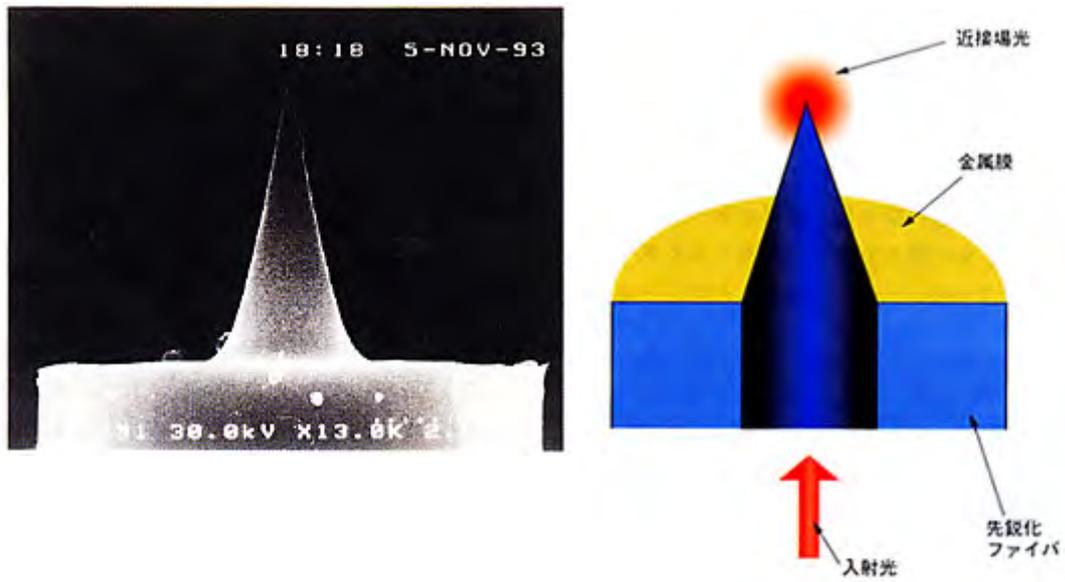


図 4 ファイバプローブと近接場光<sup>10</sup>

左は先鋭化ファイバの電子顕微鏡写真(写真の横幅は  $8.9 \mu\text{m}$  に相当).  
この先鋭化ファイバを用いて作製したファイバプローブの先端に近接場光が発生する.

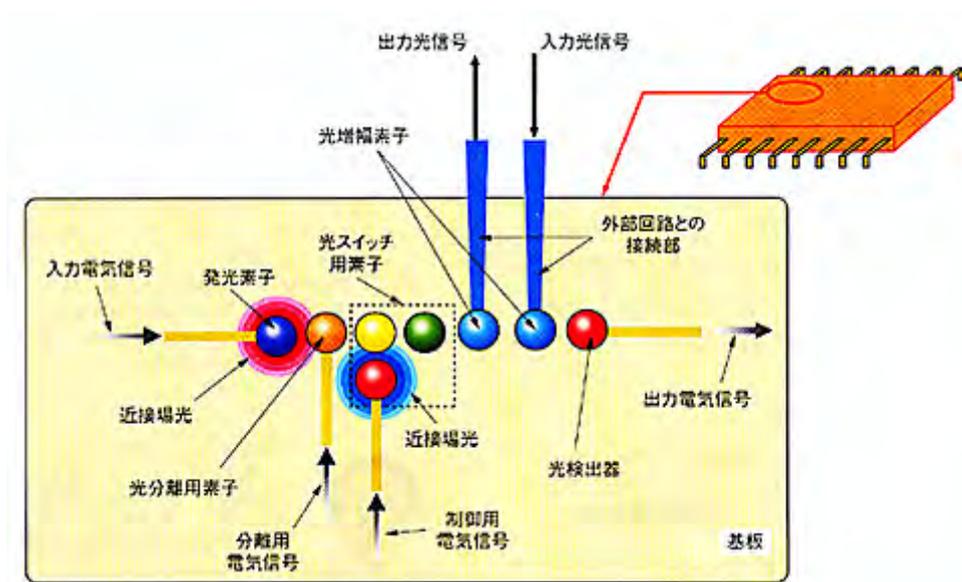


図 5 ナノ寸法の光集積回路<sup>10</sup>

## 1.2 研究成果全般

光科学技術を従来の回折限界による空間分解能の制限から解放してナノ領域に広く適用する目的で近接場光の研究に取り組み、量子力学的な物理量を矛盾なく説明できる理論を構築した。次にその応用として、近接場光を媒介としたナノ寸法物質間の局所的電磁相互作用を利用したナノ次元の光デバイスを作製し、動作させる技術（ナノフォトニクスと命名）を創成、それに基づいてナノ光スイッチや導波路などのデバイス、ナノ光 CVD などの加工法を開発した。さらに近接場光を使って原子の偏向・誘導・捕獲・移動・解放などの原子操作を行う技術（アトムフォトニクス）を蓄積した。

## 1.3 近接場光理論の構築

近接場光のシステムを射影演算子法を用いて微視的な物質系に働く有効相互作用の形で定式化し、有限の相互作用範囲を持つ湯川関数で示される相互作用を導くことにより、近接場光特有の新しいメカニズムやダイナミズムを予測した<sup>11</sup>。

仮想ポラリトンのエネルギーと試料あるいはプローブチップの励起エネルギーとの大小により、有効相互作用は引力にも斥力にもなり得る。巨視的物質系の試料の励起エネルギーを固定したとき、ポテンシャル井戸を形成するには、プローブチップの励起エネルギーはある範囲内の値でなければならない。これがアトムフォトニクスにおいて Rb 原子の捕獲に必要なポテンシャル井戸を作るためにプローブが満たすべき特性の指針となる。

またナノメートル寸法の量子ドットを組み合わせた代表的なデバイスとしてナノフォトニックスイッチの動作可能性について検討した<sup>12</sup>。三つの量子ドットを構成要素とする系において、隣接する量子ドットの共鳴準位間には近接場光相互作用により励起エネルギーの移動が起こる。この励起エネルギー移動を入力光信号の伝達に利用し、制御光により励起エネルギーの移動経路を制御することにより出力ドットからの検出光信号を変調してスイッチ機能を実現させた。

さらに近接場光を用いた原子・分子操作法の解析を行い、プローブチップに単一原子が偏向ないし捕獲できる可能性を指摘した<sup>13</sup>。また平面効果により原子のスピン偏極を高め得ることを定量的に示し、実験データとの比較から電子準位非共鳴近接場光による気体分子の解離過程にプローブ先端の多重フォノンが重要な役割を果たしていること

---

<sup>11</sup> Kobayashi K, et al., J Microscopy, 194, 249-254, 1999

<sup>12</sup> Kawazoe T, et. al., Phys Rev Lett, 88, 067404.1-067404.4, 2002

<sup>13</sup> Kobayashi K, et al., Phys Rev A, 63, 013806.1-013806.9, 2001

を示した<sup>14</sup>。

プローブチップによる近接場光を用いた原子の偏向を想定し、湯川ポテンシャルによる原子の散乱として計算を行った。近接場光ポテンシャルは引力だけでなく谷を形成することが予測され、単一原子を捕獲するために必要な谷の深さを定量的に調べた。Rb原子の場合、プローブ径を 10nm として近接場光ポテンシャルの直径程度の位置に 20neV 前後の深さをもつ井戸型ポテンシャルを感じるということがわかった。捕獲のメカニズムについては、近接場光の急勾配に起因する非断熱過程が関連していると思われる。

## 1.4 ナノフォトニクス

### (1) ナノ光スイッチ動作原理の構築

近接場光によるナノ光スイッチの動作原理を構築し、スイッチング動作の検証実験を行った<sup>15</sup>。デバイスは近接場光で結合した 3 個の量子ドットで構成され、それぞれを入力、出力、制御各端子と見なすことでナノフォトニックスイッチが実現する。単位デバイスの寸法は 100nm 以下である。量子ドットのサイズ比が  $1 : \sqrt{2} : 2$  の場合、3 個のドットの量子閉じ込め準位間に共鳴状態が生じて近接場光により強く結合し、エネルギー移動が起こるとともにその制御が可能になる (図 6)。

この光デバイスのサイズ、動作速度、動作に必要なエネルギーを考慮した性能比は従来のものに比べて 10~100 倍ほどすぐれている。高集積時における発熱量は既存の電子デバイスに比べて 5 桁以上少なく、高集積化可能の見通しが得られた。

またエネルギー移動が起こった準位は電気双極子禁制であり、この種のエネルギーレベルが近接場光で活性化したことは従来の伝搬光を用いた光技術では実現不可能なもので、それ自体非常に興味深い現象である。

---

<sup>14</sup> Shojiguchi A, et al., J Microscopy, 210, 301-306, 2003

<sup>15</sup> Kawazoe T, et al., Appl Phys Lett, 82, 2957-2959, 2003

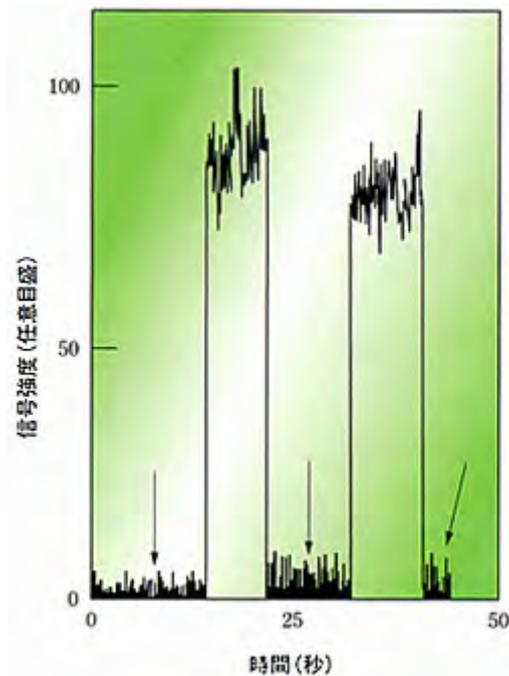


図 6 光スイッチ機能<sup>10</sup>

## (2) ナノフォトニック導波路・集光器の開発

近接場光によって作動するナノフォトニックスイッチを外部の光デバイスにより励起させるためには、外部からの伝搬光をナノ寸法の集積回路が駆動可能な近接場光に変換し、これをナノメートルサイズで導波するナノ光導波路およびナノ集光器が必要となる。

導波路(変換器)として要求される性能は、高い変換効率、100nm以下のビーム径、光の波長以上の信号伝搬距離であり、これらの要求を満たす伝搬光/近接場光変換用導波路として、金属コートシリコンウエッジ構造を作製し、このウエッジの金属細線部にプラズモン・ポラリトンを励起するナノ光導波デバイスを開発した<sup>16</sup>。

この導波路における近接場光強度を観測し、波長 830nm を用いてビーム径 150nm、伝搬長 2.5  $\mu\text{m}$  の性能を実証した。この種のナノ光導波路をより高い効率で励起するためにフェーズドアレイ型のプラズモン・ポラリトン集光器を開発した。さらに金属ナノドット列カップラーを作製し、金属細線よりも一桁高いプラズモン・ポラリトンの伝達を確認された。

集光器については、量子ドット間に起こる近接場光のエネルギー移動を利用したナノ集光器を開発し、直径 150nm の領域の光を直径 10nm 程度まで集光することに成功し

<sup>16</sup> Yatsui T, et al., Appl Phys Lett, 79, 4583-4585, 2001

た。本集光器は、ナノフォトニックデバイス相互を結ぶ最終的なインターフェイスとして利用できる。

### (3) ナノフォトニックデバイス作製法の開発

ナノフォトニックデバイスを作製するためにはナノメートルサイズのドットをナノメートルの精度でサイズや間隔を制御して堆積させる必要がある。この要求を満たすナノ微細加工技術として、光化学気相堆積法（光 CVD）に近接場光学技術を適用した近接場光 CVD 法を開発した<sup>17, 18, 19</sup>。別に近接場プローブの先端から発生する近接場光により有機金属などの反応ガスを、近接場光に特有の性質により誘起される光化学反応で解離し堆積させる方法も提案されている<sup>20</sup>（図 7）。

ここでは電気双極子禁制準位への励起や波数保存則の緩和など、近接場光の有する特異な性質を光化学反応に応用し、堆積のための材料が吸収しない光、すなわち非共鳴光を用いた光化学気相堆積に成功した。通常の伝搬光での光化学気相堆積では分子の光吸収を利用し一度電子を励起状態にして後、エネルギーの縮退した解離過程へ緩和させることで分子を分解し堆積させる方法を用いる。これに対し近接場光では、A. 分子の振動レベルを近接場光によって直接励起し、分子を解離する B. 近接場光によって分子の軌道が変化し通常は遷移の起きない基底準位から分子の解離 3 重項状態への直接遷移が進む、など近接場光に特有の挙動を示す。この場合、光化学反応のための光の波長は分子の持つ吸収帯に対応する波長である必要はなく、解離エネルギーを超えるだけの波長の光で反応を起こせばよい。ジエチル亜鉛の場合には可視光での解離・堆積が可能となる。

さらに近接場光 CVD 法を用いたナノ微粒子堆積における、より高精度のサイズ制御を行うため、照射スポット径によらず堆積用光源の光エネルギーに依存したサイズ制御が可能であることを示した。また近接場光のもつ特殊な性質を光化学反応に応用し、堆積用の材料が吸収しない非共鳴光を用いた光化学気相堆積に成功した。

---

<sup>17</sup> Polonski VV et al., J Microscopy, 194, 545-551, 1999

<sup>18</sup> 李謹炯他, 電学論 C, 119, 7, 1999

<sup>19</sup> Kawazoe T et al., Appl Phys Lett, 79, 1184-1186, 2001

<sup>20</sup> Yatsui T et al., Appl Phys Lett, 81, 105-107, 2002

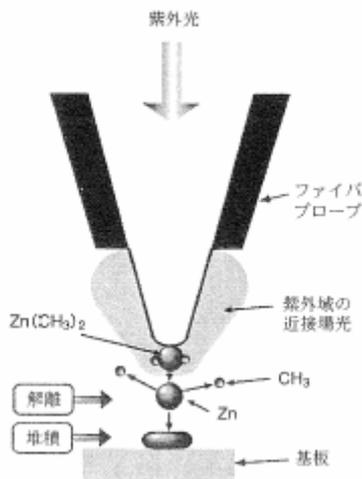


図 7 光 CVD 法<sup>21</sup>

#### (4) ナノフォトニックデバイス用の材料探索

発光素子として有望な材料、ナノ結晶 Si をナノフォトニックデバイスに応用するため、基板として Si のピラミッド構造を用い、偏光制御による光化学エッチングを行うことで Si ナノドット作製時の位置制御を実現した<sup>22</sup>。この構造に対する照射・集光モードによる近接場分光測定により、エッチングされた領域からの発光が観測され、20～40nm 程度のナノドットの形成が確認された。別に作製したシリコン製のインターコネクションデバイスと組み合わせると、全シリコンによるナノフォトニックデバイスの実現可能性が示唆される。

さらに量子ドット間のエネルギー移動時に起こる章動現象について検討し、近接場光の場合には位相を乱す散乱現象がほとんど起きないため、40K という高い温度でも励起子寿命とほぼ同程度に緩和の遅い章動現象の起こることを見出した。このように長寿命なコヒーレンス現象は、たとえば量子コンピュータなどにも応用可能であり、ナノ寸法光デバイスの新しい動作原理として利用できる期待が持てる。

その他光 CVD 法により GaN ナノ微結晶の作製が可能であることを確認した<sup>23</sup>。

#### (5) 近接場光発生・検出用デバイスの開発

ナノメートルサイズのデバイスを作製するための高性能な近接場光発生・検出用デバ

<sup>21</sup> 大津元一, ナノフォトニクス, 米田出版 P104 より

<sup>22</sup> 八木崇他, 第 46 回研究集会「量子サイズシリコン系素子—新機能と応用」H14.11.22, 東京農工大学

<sup>23</sup> 崔允辰他, 第 50 回応用物理学関係連合講演会, H15.3, 神奈川大学

イスを開発した<sup>24</sup>。

3次元有限差分時間領域法を用いて近接場プローブ形状の最適化を行い、その結果に基づき先鋭化プローブ（シリコンコア）に金属薄膜（Al）をコートした突起型シリコンプローブを作製、プローブ先端のみに近接場光が局在する高効率・高分解能プローブを開発した。

これまでのファイバースコープで最大の効率を示す3段テーパプローブと比較して15倍の効率向上が認められた。この高効率・高分解能プローブは近接場分光の測定分野のみならず、光加工・光記録などさまざまな分野で有効に活用できると思われる。他にAFM用のカンチレバーとしての利用も考えられ、さらなる高分解能化が期待される。

その他近接場光CVDで基板への選択的堆積を可能にするためのヒータ内蔵型プローブ、フッ素樹脂コートプローブなどの開発を行った。また偏光を利用した光デバイスの実現に向けて、磁性体を利用した近接場プローブによって偏光の制御が可能であることを確認した<sup>25</sup>。作製した磁性体コートファイバーに磁場を印加し、プローブに入力する光を変化させた時の消光比として最大10以上の値を得た。

なおERATOプロジェクトで得られたナノフォトニックデバイス群の設計や作製、加工、動作などについては大津らの総説にまとめられている<sup>26</sup>。

## 1.5 アトムフォトニクス

### (1) 原子操作用冷却原子源の開発

近接場光による高精度な原子制御・操作技術の開発を行った。まず近接場光制御に必要な冷却原子ビームを作り出すために、漏斗形状の近接場光によって原子を反射・吸収する原子ファネルの実験を行った<sup>27</sup>。近接場光が及ぼす双極子斥力を用いて原子を反射するとともに冷却により運動エネルギーを奪い、ファネル下方に冷却原子を集め、底部の微小口からビーム化して出射する。出射口径が200nmの場合にフラックス強度 $10^5$ 個/s・cm<sup>2</sup>の冷却Rb原子の出力を得た。出射直後の原子温度は9 $\mu$ Kである。本ファネルは他の冷却原子ビーム形成方法に比べて低温であること、出射位置が特定されることなどの特徴を持つ。また近接場光励起用の中空光ビームの形成を行い、ファネルに使用可能であることを確かめた。

次に冷却原子ビーム計測の目的で原子を捕獲・収集して検出する磁気光学トラップ原

---

<sup>24</sup> Yatsui T, et al., Appl Phys Lett, 80, 2257-2259, 2002

<sup>25</sup> Lim J, et al., IEICE, TRANS ELECTRON, E85-C, 2077-2080, 2002

<sup>26</sup> Ohtsu M, et al., IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics, 8, 839-862, 2002

<sup>27</sup> Takamizawa A, et al., Jpn. J Appl Phys, 41, 6215-6218, 2002

子蓄積検出法を考案し、二重磁気光学トラップ(Double MOT)を備えた超真空装置を製作した<sup>28</sup>。上段の MOT (ファネルに冷却原子を供給する装置、真空度  $10^{-7}$ Pa) で温度  $100\mu\text{K}$  の冷却 Rb 原子気体を作って自由落下させ、下段の MOT (ファネルからの出射原子を収集する装置、真空度  $10^{-9}$ Pa) により捕捉するシステムである。

## (2) 原子の偏向・誘導の研究

原子の運動方向を近接場光からの共鳴双極子力により精密に制御するためのスリット型原子偏向器を開発した<sup>29, 30</sup>。偏向器は化学エッチングとフォトリソグラフィにより作製し、スリット幅は  $100\text{nm}$ 、スリット長は  $100\mu\text{m}$  で後述する原子検出器と組み合わせる。

レーザー照射部に正離調したレーザービームを照射し、金属コーティングを施されたスリットの一端に近接場光を誘起する。近接場光領域を通過する原子は双極子斥力により運動方向が変えられ、光強度と周波数離調を用いて制御される。スリット型偏向器はスリットを通過する原子のみを偏向し、近接場光領域を通らない余分なバックグラウンド原子を排除する V 型構造を持つ。

スリット型原子検出器で Rb を確認する目的で、2 色近接場光による段階的共鳴励起を行い、冷却 Rb 原子に対し 3% の検出効率を得た<sup>31</sup>。さらに近接場光を用いた基底状態での原子検出器を、光リソグラフィおよび異方エッチングにより SOI(silicon-on-insulator)ウェハを加工することで作製した<sup>32</sup>(スリット幅  $70\text{nm}$ 、スリット長  $100\mu\text{m}$ )。空間分解能は  $96\text{nm}$ 、検出効率は平均速度  $10\text{m/s}$  の Rb 原子に対し 25% であった。

原子偏向実験に必要な冷却 Rb を生成する磁気光学トラップ(MOT)を備えた超高真空装置( $\sim 10^{-11}\text{torr}$ )を製作した。原子偏向器に原子を供給するために、中空光ビームによって Rb 原子を誘導する。正離調した中空光ビーム内に MOT によって生成した平均温度  $100\mu\text{K}$  の冷却 Rb 原子を導入し、双極子斥力により鉛直下向きに閉じ込めて誘導した。中空光ビーム内部にポンプ光を照射・冷却し、半導体レーザー/アルゴンイオンレーザーを用いた 2 段階イオン化により検出した。

## (3) 原子の捕獲・リリースの研究

---

<sup>28</sup> Takamizawa A, et al., Jpn.J Appl Phys, 42, 3658-3661, 2003

<sup>29</sup> Totsuka K, et al., Appl Phys Lett, 82, 1616-1618, 2003

<sup>30</sup> 伊藤治彦他, 光学, 31, 755-757, 2002

<sup>31</sup> Totsuka K et al., IEICE, TRANS ELECTRON, E85-C, 2093-2096, 2002

<sup>32</sup> Totsuka K et al., Jpn J Appl Phys, 41, 1566-1571, 2002

Rb 原子をトラップするためのファイバークローブの開発を行った<sup>33</sup>。近接場光の強度分布の計測からトラップポテンシャルを評価し、冷却や原子のトラップが可能であることを確かめた。

ファイバークローブ原子トラップでは、正離調した近接場光からの双極子斥力と表面からのファンデルワールス力をバランスさせて原子を捕獲する。開口径が 40nm の平面開口型 3 段テーパークローブを作製し、近接場光強度分布を計測した。微小開口から生じる近接場光の強度は一般に微弱であるため、原子操作に必要な光強度を得る目的でテーパ部分の広角化と先端部の短小化を行うことにより、Rb 原子のトラップに必要な高強度を達成し得た。

#### (4) 近接場光を用いた原子冷却に関する研究

高精度原子操作に用いる 10nm 寸法の近接場光との相互作用に必要な原子フラックス  $10^5$  個/s・cm<sup>2</sup> を得るために、近接場光ファネルの性能向上（供給冷却原子の運動エネルギー低減、近接場誘起光の改善、出射口径の微小化）を図った。

ファネル内部の磁気光学トラップの高さを下げ、重力による加速を 40%抑制した結果、ファネルへの供給原子の運動エネルギーをファネル内部の反射ポテンシャル以下まで低減することが可能になり、より多くの原子をファネルから出射することに成功した。

近接場光の誘起効率を高めるとともに、ファネルからの出力原子の過熱・散逸を防ぐための励起用中空ビームの改良を進めて、ファネル内壁のより広い領域に近接場光が誘起され、ファネル内部および出射後の原子に対する近接場誘起光の影響を大幅に抑制できるようになった。

---

<sup>33</sup>伊藤治彦他,精密光学会誌, 69, 183, 2003

## 第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況

### 2.1 各研究テーマの展開および現在の状況

#### 2.1.1 SORST「ナノフォトニックデバイスとシステムの開発」(2003～2008)

##### (1) 全般<sup>34</sup>

ERATO「局在フォトンプロジェクト」ではもっぱら近接場光に関する基礎検討—理論の構築とその検証実験を行い、非断熱プロセスの発見および複数量子ドット間のエネルギー移動という大きい成果を上げたが、SORSTではそのタイトルが示すとおり、ERATOの結果をふまえた応用面への展開、中でも近接場光を直接利用したデバイス(実用化の雛形となるデバイス)とシステム(新情報伝送システム)の作製、およびナノフォトニック加工法(寸法・位置制御性の高い加工法)に特化した研究開発を推進した。

その結果、デバイスではCuCl量子ドットやZnOナノドット系のスイッチ、InAlAs量子ドットによるNOTゲート、ナノ寸法の金属ドットを用いたプラズモン・ポラリトン結合器、ナノフォトニック配線および集光器を、光加工では非断熱プロセスや光CVDによるZn微粒子堆積、Alナノ微粒子列の自己組織的堆積、室温下のGaNナノ粒子作製、一括露光式近接場光リソグラフィ、ZnOナノロッドによる近接場光触媒法などを、またシステムでは光CAM(Content Addressable Memory)の試作、光宛先検索の実現可能性検証、近接場光相互作用の階層性を利用した新型光メモリーをそれぞれ実現する成果を上げた。

これらの成果は、今後、メモリー・中継器・情報処理・コンピュータなどの諸分野で有効に利用できると思われる。

##### (2) デバイス・システム用材料

ZnO半導体ナノロッドはエキシトン結合エネルギーが大きく、光学デバイス用、とくに室温作動のナノフォトニックデバイス用材料に適した物質である。

ポリイミドフィルム上で触媒なしの有機金属CVD法により、温度450°CでZnO単結晶ナノロッドを垂直方向に成長させた。ポリイミドフィルムは単結晶を成長させても柔軟性を保持する。結晶成長の方向はC軸に沿っており、得られたナノロッドは明瞭なフォトルミネッセンスを呈する。室温で測定した半価幅は、サファイア基板で作製したナ

---

<sup>34</sup> Kawazoe T, et al., J Non-Crystalline Solids, 352, 2492-2495, 2006

ノロッドと同程度の結晶性を示す値を示した<sup>35</sup>。

### (3) ナノフォトニックデバイス

#### (a) ナノフォトニックスイッチ

ZnO 系ナノロッド (ZnO コア/ZnMgO 多重構造) のフォトルミネセンススペクトルを測定した<sup>36</sup>。主発光は、ナノロッド複合構造の動径方向での量子閉じ込め効果により、ZnO 層厚に依存する青色シフトを呈する。走査型近接場光学顕微鏡による観測では、サブバンド準位に対応する個々のナノロッドの量子構造にもとづいたシャープなフォトルミネセンスのピークが認められた。図 8 は ZnO 系ナノロッドの模式図である。

ERATO プロジェクトでの結果 (3 個の量子ドット間の相互作用による共鳴エネルギーの移動として動作原理を解明) をふまえ、ZnO/ZnMgO ナノロッドの 2 重量子井戸 (DQWs) 構造をナノフォトニックデバイスに適用する第一歩としてナノスイッチを試作した<sup>37</sup>。その結果、共鳴エキシトン間の章動現象を見出すとともに、近接場光を通じて双極子不活性状態でのエキシトン励起を制御することによるスイッチの動作機構を示した。時間分解スペクトルの測定結果から、この構造がナノフォトニックスイッチなどのデバイス用として有用であることが裏付けられた。

さらに個々の ZnO/ZnMgO ナノロッド DQWs について、近接場光により空間分解能 55nm の精度でフォトルミネセンスを測定し (金属コートファイバースプロブを用いる)、ZnO の量子井戸に離散的エネルギーレベルを見出した<sup>38</sup>。

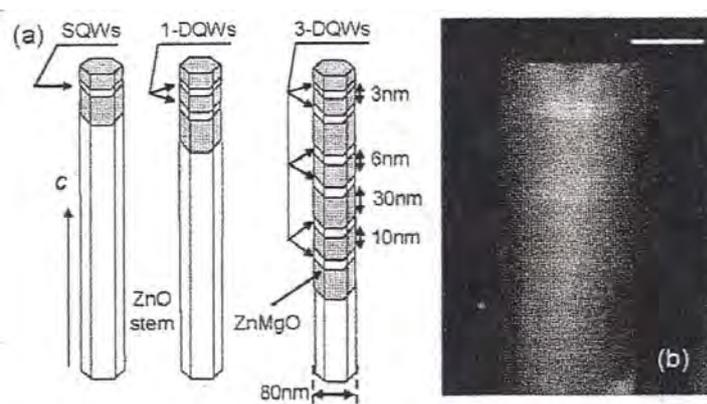


図 8 ZnO 系ナノロッドの模式図と TEM 像<sup>37</sup>

<sup>35</sup> Kitamura K, et al., Appl Phys Express, 1, 081202.1-081202.3, 2008

<sup>36</sup> Jang E S, et al., Appl Phys Lett, 88, 023102-023102.3, 2006

<sup>37</sup> Yatsui T, et al., Appl Phys Lett, 90, 223110, 2007

<sup>38</sup> Yatsui T, et al., Appl Phys Lett, 85, 727-729, 2004

## (b) 論理演算デバイス

ナノフォトニクスでの可能性を確かめるために、ZnO 端の孤立 ZnO/ZnMgO 単一量子井戸構造(SQWs)の低温における近接場光スペクトルを測定した<sup>39</sup>(従来の半導体量子構造は自然に形成された量子ドットに限られていたが、ここで初めて人工的に作られた ZnO SQWs による低温領域での近接場光スペクトルを測定した)。無触媒、有機金属の気相成長でサファイア基板に垂直成長(C 軸方向)させた ZnO/ZnMgO の SQWs は平均径 40nm、長さ 1  $\mu$  m、ZnO 井戸の層厚さは 2.5nm、3.7nm であった。

孤立系の吸収スペクトルからナノロッド SQWs が高度な光学特性を備えていること、また偏光分光の結果から原子価の異方性をそれぞれ見出した。これらの結果はナノフォトニックデバイスの設計に際して有効な指針となる。

従来の検討でナノフォトニックスイッチを雛形として遅延回路やバッファメモリーなどのデバイス動作が可能であることは理論面で裏付けられており、これらを検証するための実験を行った。ナノ光による AND ゲートや XOR ゲートとともに論理演算システムを完成させるためのキーデバイスとなる NOT ゲートを CuCl 量子ドット間の近接場光相互作用を利用してモデル的に作製し、動作させた<sup>40</sup>。デバイスの寸法は 20nm 以下で、反復動作が可能である。このデバイスを動作させるに要するエネルギーは通常の伝搬光デバイスに比してはるかに小さい。さらに量子ドット対を使って全光学 NAND および NOR ゲートを導いた。

次いで実用化へ向けてのアクセスとして、InAlAs 量子ドットのナノフォトニックデバイスとしての可能性について検討した。デバイスを動作させるために、分子ビームのエピタキシャル成長で InAlAs を 2 重層構造とし、近接場光スペクトルから NOT ゲートとして機能することを認めた。この系は実質的なナノフォトニックデバイスとして有望と思われる。

## (c) ナノフォトニック配線 (導波路)

光信号をナノフォトニックデバイスに伝送する手段として、金属ナノ粒子の直線状アレイからナノドット導波路を開発した<sup>41</sup> (ナノフォトニックデバイスおよびそれによるナノ IC システムを機能させるためには、回折限界の制限を受ける通常の伝搬光光学系とのスムーズな接続が必須であり、高変換効率のナノフォトニック導波路が要求される)。伝搬光から近接場光への変換効率を上げるために半球状の金属ナノ粒子から作製

---

<sup>39</sup> Yatsui T, et al., Appl Phys Lett, 87, 033101.1-033101.3, 2005

<sup>40</sup> Kawazoe T, et al., Appl Phys B, 84, 243-246, 2006

<sup>41</sup> Nomura W, et al., Appl Phys Lett, 86, 181108.1-181108.3, 2005

した表面プラズモン-ポラリトン(SPP)コンデンサーは、波長 785nm で 400nm のサイズに集光できる。この SPP をナノドット導波路に入射すると、隣接するナノ粒子の表面プラズモン間の近接場光相互作用により、伝搬長は  $4.0\mu\text{m}$  に達する（在来の金属コア導波路の 3 倍）。ジグザグ型のナノドット配線でも同程度の伝搬長が得られた。これらの特性は、ナノフォトニック配線（導波路）に必要とされる高変換効率、100nm 以下のビーム幅、光の波長より長い伝搬長の条件のいずれをも満たしている。図 9 は Au ナノドットから作製した導波路の SEM 像である。

別に孤立した Au ナノ粒子からの散乱光強度(785nm)は、径 200nm、高さ 50nm の近接場光の共鳴相互作用で大きくなることを見出した<sup>42</sup>。この実験結果は MIE 理論に基づく計算値とよく一致する。

さらに Au ナノ粒子鎖に沿って近接場光の共鳴エネルギー移動を観測した。

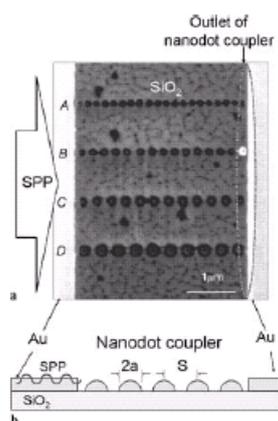


図 9 Au ナノドット導波路の SEM 像<sup>42</sup>

#### (d) ナノフォトニック集光器

量子ドット間の近接場光エネルギーの移動を制御してナノ領域に光を集中させるナノフォトニックデバイスを開発し、「光ナノファウンテン」と命名した<sup>43</sup>（図 10）。このデバイスはナノフォトニック集光器の機能を発現する。NaCl マトリックス中の CuCl 量子ドットからなる光ナノファウンテンを用いて 20nm 以下のナノ領域に高エネルギーを集中させることに成功した。このデバイスは、ナノフォトニックデバイス間の接続や近接場光／伝播光変換機能の他にも、“ナノ光ピンセット”や高感度ナノ分解能を備えた近接場光学顕微鏡などの光学的操作・計測の技術分野にも適用が可能である。

<sup>42</sup> Nomura W, et al., Appl Phys B, 84, 257-259, 2006

<sup>43</sup> Kawazoe T, et al., Appl Phys Lett, 86, 103102.1-103102.3, 2005

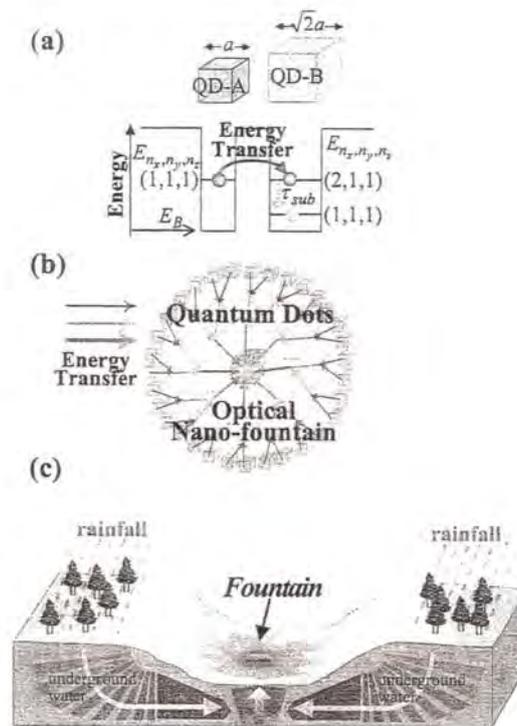


図 10 光ナノファウンテン(ナノフォトニック集光器)<sup>43</sup>

#### (4) ナノフォトニック加工法

##### (a) 非断熱プロセスの利用

通常の光 CVD 法では、光分解反応の第一段階として分子を基底状態から励起状態に上げるためには伝搬光-反応気体分子間の共鳴が必須のプロセスである。この状態から気体分子の解離が進行して金属原子が基板の表面に吸着される。

一方、近接場光による分解では、局在フォトンのエネルギーが分子のエネルギーギャップより小さい場合でも反応が生じる。この種の光化学反応は近接場光の特徴であり種々の化学プロセスに応用が可能で、CVD 以外にもナノテクノロジーの有力な手段となっている。

一つの例として近接場光を非共鳴の条件下に適用してジエチル亜鉛を非断熱プロセスで気相解離し、Zn ナノドットを析出させた<sup>44</sup>。分子振動を経由する多段励起の光解離プロセスとして、エキシトナーフォノン ポラリトンモデルにより、析出速度の光パワーおよびフォトンエネルギー依存性を論じた。解離は近接場光エネルギーの急勾配によ

<sup>44</sup> Kawazoe T, et al., J Chem Phys, 122, 024715.1-024715.5, 2005

る振動モードの非断熱的光励起として進行する。図 11 に解離プロセス後の形態図を示した。

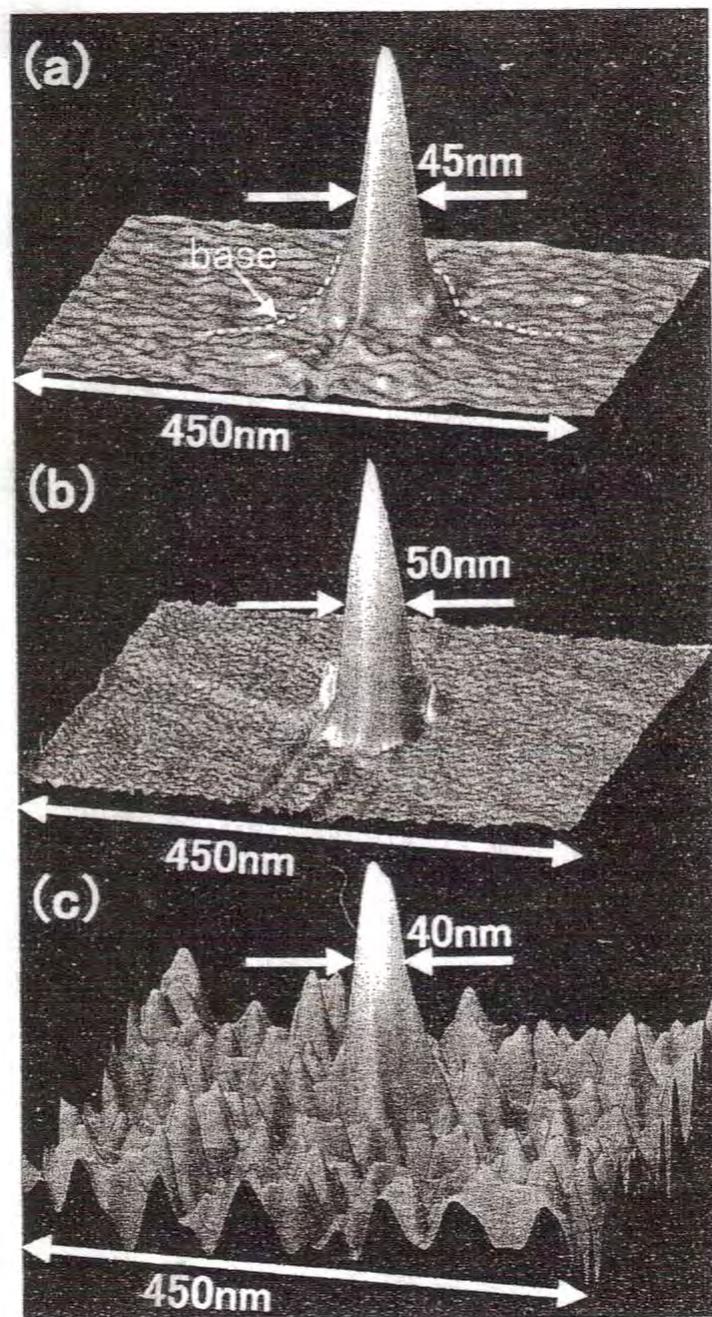


図 11 光解離プロセス後の形態図<sup>44</sup>

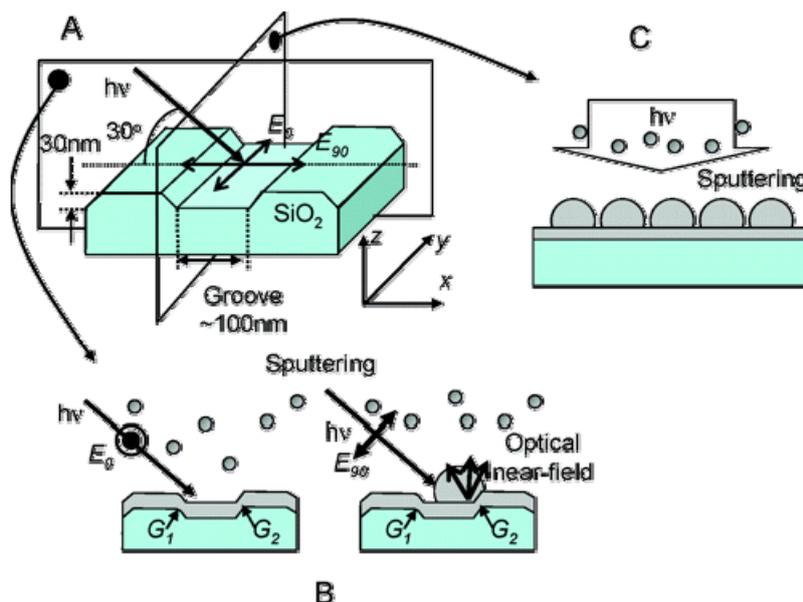
(b) 近接場光化学気相堆積法(PCVD) による GaN ナノ結晶の合成

GaN はエキシトン結合エネルギーが 26meV と大きく、ナノフォトニクスデバイス用

の材料に向いている。近年、分子ビームエピタキシー、有機金属 CVD、パルスレーザー堆積など種々のフィルム作成法が提案されているが、ここでは ERATO プロジェクトで開発した近接場光化学気相堆積法 (PCVD) を用いて UV 発光性の GaN ナノ結晶薄膜を室温で合成した<sup>45</sup>。N/Ga 比  $5.0 \times 10^4$  以上の場合、生成物は 5K で 3.365 eV および 3.310 eV に、立方/ヘキサゴナル混合相の転移に由来する強いフォトルミネッセンスのピークを示す。半価幅 (1/2 極大位置でのスペクトル幅) は 100meV であり、X 線光電子スペクトルで PCVD により Ga が室温で窒素化されていることが確かめられた。GaN ナノ単結晶をスイッチ用に供するためにはナノメートル間隔での集積を必要とする。この条件を満足させるために近接場光 CVD を取り上げ、光ファイバプローブの先端に生じた近接場光を原料分子と光化学反応させた(NFO-CVD)。金属、半導体、絶縁体など多くの物質に適用でき、サイズと位置を精密に制御できる。

(c) 自己組織化による長鎖状ナノドットの作製

近接場光を用いて、大きさと位置が自己組織的に制御された長鎖状ナノドットが得られた<sup>46</sup>。光子のエネルギーで定まるプラズモンの共鳴サイズで、ナノドットの鎖長はサブ 100nm に達した (誤差 5nm)。この手法を通常のリソグラフィでパターン化された基板に適用すると、ナノ構造を作る際の収率が大幅に向上することが知られた。長鎖状ナノドットの生成過程を図 12 に示す。



<sup>45</sup> Yamazaki S, et al., Appl Phys Lett, 85, 3059-3061, 2004

<sup>46</sup> Yatsui T, et al., Nano Lett, 5, 2548-2551, 2005

図 12 長鎖状ナノロッドの作製<sup>46</sup>

(d) 近接場光による Si 表面の平滑化

極紫外部の光学素子、高出力レーザー、超短パルスレーザー、将来のサブ 100nm 寸法の光学デバイスなどの基板には、サブ nm オーダーの表面平滑性が要求される。ここでは気体 Cl レーザー（波長 537nm）を用いた近接場光の非断熱エッチングによる表面の平坦化法を提示した<sup>47</sup>。Cl<sub>2</sub>の吸収端エネルギーは光源の光子エネルギーより大きい値を有するため、通常の断熱的な光化学反応は進行せず、基板のナノ寸法の凹凸部に発生する近接場光が Cl<sub>2</sub>分子の非断熱光化学反応を誘起し、エッチングにより Si の表面を超平滑化する。図 13 は平滑化プロセスの模式図である。

ナノ構造の作製に近接場光を適用する意味は、伝搬光の回折限界を超えた加工精度と、エキシトン・フォノン・ポラリトン経由のエネルギー移動に起因する新規な非断熱光化学反応（CVD、光解離他）にあるが、本項の「ナノ規格での表面平滑化」も、近接場光の上述した特性を巧妙に利用したユニークな例といえよう。

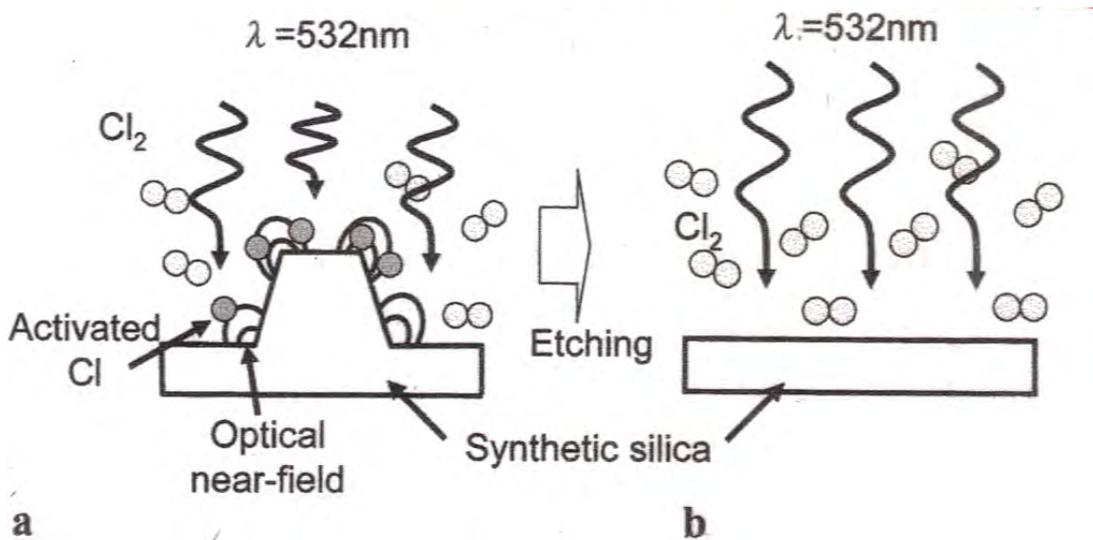


図 13 近接場光による表面平滑化プロセス<sup>47</sup>

(5) ナノフォトニックシステム（情報伝達システム）の構築

(a) 光ナノ CAM システム

ナノ規格のデータ集計アーキテクチャを提案し、その具体的なイメージを量子ドット

<sup>47</sup> Yatsui T, et al., Appl Phys B, 93, 55-57, 2008

間の近接場光相互作用を用いて実験的に表示した<sup>48</sup>。

近接場光を経由するナノ素子の局所的電磁相互作用にもとづき、量子ドットの多重励起を組み合わせることで集計アーキテクチャを組み立てた(図14)。集計機能は、光学ネットワークにおける重要な焦点であるCAMシステム(Content Addressable Memory)で中心的な役割を果たすものである。ここでは必要なデータにアクセスする光ナノCAMシステムを提案し、ナノフォトニックスイッチとナノ集光器を併用して、3ビットのデジタル入力信号に対しCAMによる出力信号を得た。

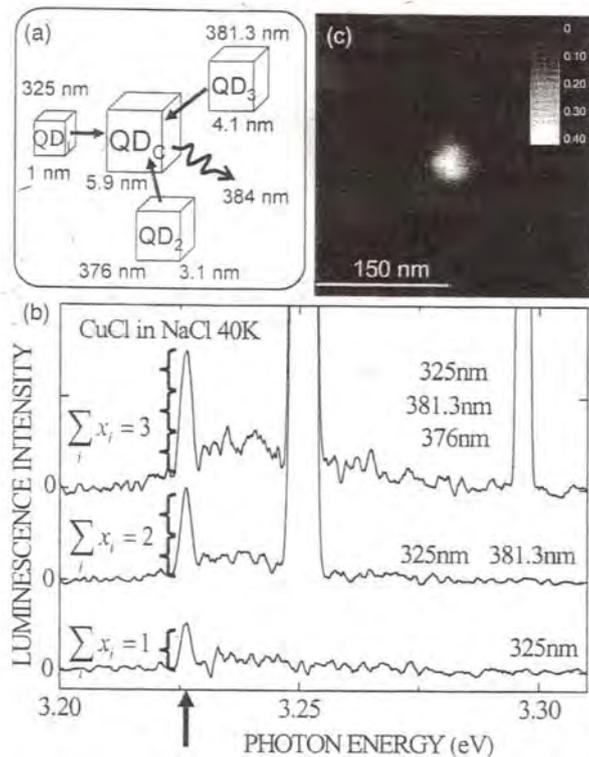


図14 CuCl量子ドットによるCAMシステム<sup>48</sup>

(b) ブロードキャスト型光情報処理システム

超高密度のデータ・ブロードキャストイング(データ配分用の同報機構)の光学的接続を、量子ドット間の近接場光相互作用を用いて実験的に提示した<sup>49</sup>。これは伝搬光では実現不可能な機能であり、外部からの個別の入射光を必要としない近接場光ではじめて解決できる問題といえる。このブロードキャスト機構をスイッチや集計アーキ

<sup>48</sup> Naruse M, et al., Opt Lett, 30, 201-203, 2005

<sup>49</sup> Naruse M, et al., Opt Express, 14, 306-313, 2006

テクチャと組み合わせて平行（同時）作動システムのナノ集積が可能になる。ここでは新たな光情報処理システムとして、 $1\mu\text{m}$  角の微小領域に三つのナノフォトニックスイッチを配備したブロードキャスト型インターコネクションの検証実験を行い、一括供給制御信号による動作を確認して光宛先検索の実現可能性を示した（図 15）。

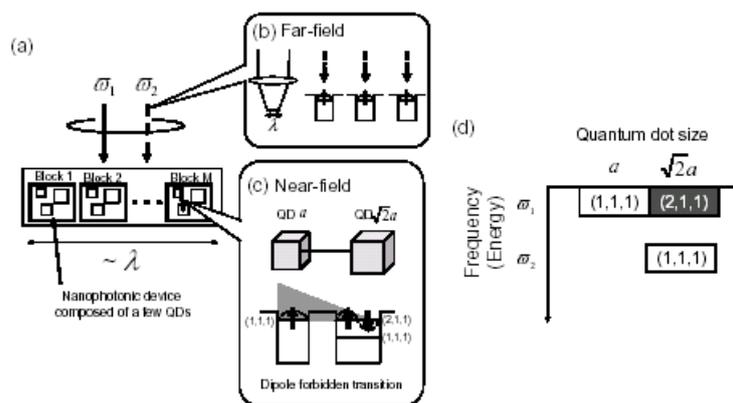


図 15 ブロードキャストシステムへの光学的接続<sup>49</sup>

### (c) 階層性を利用した光メモリーシステム

ナノ系と巨視系との境界線の引き方により近接場光相互作用が異なった性質を発現することを、「スケール依存の階層性」と呼ぶ。この階層性を利用した新しい光メモリーシステムを考案した。すなわち微小金属粒子によるテストパターンに対し S 字型の弁別特性を得、データ検索時間の短縮とともに情報セキュリティの確保を実現できることを示した<sup>50</sup>。

### (d) 近接場光および伝搬光による階層的ホログラフィ

階層的ホログラフィの提案およびそれを裏付ける実験を行い、この種ホログラムは遠隔場光および近接場光の双方で作動することを示した<sup>51</sup>。このうち伝搬光によるものは通常の遠隔光でのホログラフィックパターンを呈し、一方近接場光の場合は特有のナノ構造に関するパターンを与える。さらにプロトタイプの光学素子を規制する基本原理について実験的に示した。

<sup>50</sup> Naruse M, et al., Opt Express, 13, 9265-9271, 2005

<sup>51</sup> Tate N, et al., Opt Express, 16, 607-612, 2008

## 2.1.2 アトムフォトリクス(2003～)

### (1) 全 般

ERATO の諸成果のうち、アトムフォトリクスの部分は SORST プロジェクトから除外し、研究の展開はもっぱら東京工大の伊藤研究室で進められた（本テーマに関する実験装置もすべて東工大に移管された）。

アトムフォトリクスの研究はまだ基礎科学の段階にあり、今のところエンジニア側からの具体的なアプローチはない。その意味では実用化への道程は遠いと思われるが、研究当事者の意向では、その中でスピクラスターの利用を 10 年スパンくらいの「つなぎ」として考えられたら、としている（現在は CREST でスピクラスターの仕事<sup>52</sup>を続けている）。

ERATO 終了後は、プロジェクトで得られた原子検出・原子ファネル・原子偏向・原子捕獲などの諸成果について、基礎レベルで一步進んだ掘り下げを行い、それぞれのデバイスを将来の実用化に供するためのデータを蓄積した。また原子レンズや原子堆積、原子トンネル、スピクラスターなどの新たなテーマへの拡大にもチャレンジした。

### (2) 原子検出器

ナノ寸法のスリットの近傍に発生した近接場光により高精度に位置制御された原子を検出するデバイスである（図 16）。

Cr を含む 2 層レジストによる「引き上げ法」を用いて、ガラス基板上に 50nm 幅のスリットを設けた。このスリットは 2 色近接場光の 2 段階光イオン化により基底状態の原子を高い空間分解精度および高感度で検出するデバイスとして活用できる<sup>53</sup>。

有限時間差シミュレーション処理により、スリット近傍での近接場光の空間プロファイルを表示した。

別に 2 波長光の全反射でエバネセント光を得、これをスリットに照射して近接場光を発生させ、10nm の空間分解能で原子を光イオン化することにより検出した<sup>54</sup>。原子には冷 Rb を使い、2 段階イオン化した場合のイオン化効率のスリット幅依存性を調べた。基底状態にある原子の検出に際し、散乱光妨害を小さくする利点がある。

---

<sup>52</sup> 代表研究者、堀弘和「新機能創生に向けた光・光量子科学技術」

<sup>53</sup> Sato T, et al., J Nanophoton, 1, 011560, 2007

<sup>54</sup> Yamamoto K, et al., Opt Commun, 265, 692-695, 2006

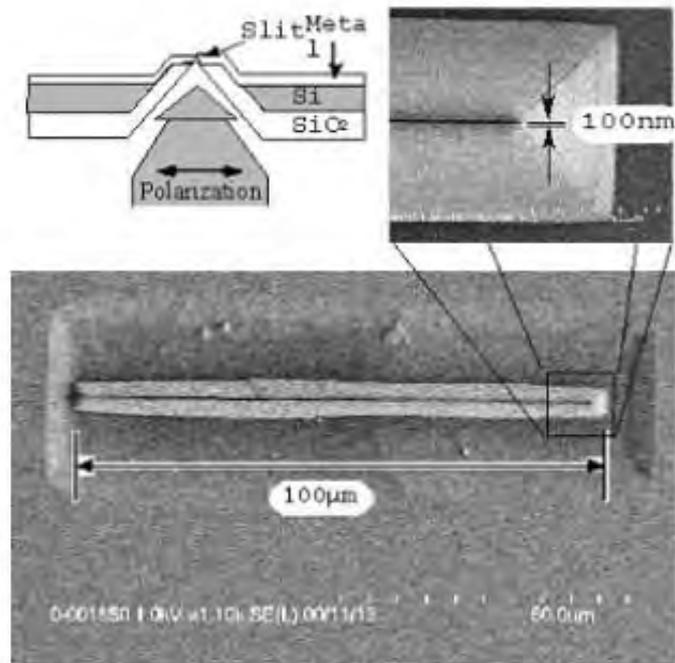


図 16 スリット型原子検出器<sup>55</sup>

### (3) 原子偏向器および原子レンズ (収束器)

ナノ幅のスリットに誘起した近接場光の双極子力により原子の運動方向を変えるスリット型原子偏向器を開発している。シリコン・オン・インシュレーター(SOI)基板をフォトリソグラフィと異方性化学エッチングで加工し、幅 100nm、長さ 100µm のスリットを作製した。このスリットの一端に近接場光を発生させ、光の周波数を原子の共鳴周波数よりわずかに高く設定 (正離調) すると、双極子斥力が働いて入射する原子を跳ね飛ばす。双極子は光強度および強度勾配に比例し、周波数離調に反比例する性質があるため、これらを調節することで原子の運動方向を制御できる。レーザーで冷却された Rb 原子を用いて実証実験を行った<sup>56</sup>。図 17 は原子偏向器の原理図である。

別に 200nm 幅のスリットで 2 段階光イオン化式の検出器も試作している。偏向させた原子の数は、角度  $5.1^\circ$  の方向で  $40 \pm 7.2\%$  増加した。散乱の断面積から原子雲のイメージを含む空間プロファイリングを表示、検討した<sup>57</sup>。

これらの原子偏向器を発展させた原子レンズ (原子収束器) についても Rb 原子の実

<sup>55</sup> ERATO 成果報告書 ([http://www.jst.go.jp/erato/project/okf\\_P/okf\\_P/03-2.html](http://www.jst.go.jp/erato/project/okf_P/okf_P/03-2.html))

<sup>56</sup> Yamamoto K, et al., Opt Rev, 13, 357-360, 2006

<sup>57</sup> Ito H, et al., J Opt A: Pure Appl Opt, 8, S153-S160, 2006

証実験を進めている。同じ素子を反対側にもう一つつけば原子レンズとしてビームがナノ構造の部位に収束するシステム（近接場光が原子ビームに対するレンズの役割を果たす）になる。ここではエバネセント光の原子ファネルでド・ブroy波の原子レンズを作り、近接場光を用いた原子操作に必要な冷原子のビームを得た。さらにビーム強度を上げるために $\mu$ サイズの出口を持つシリコンファネルを作製している。

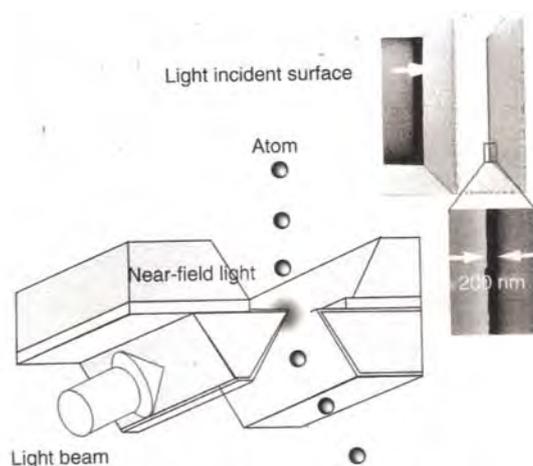


図 17 スリット型原子偏向器<sup>57</sup>

#### (4) 原子誘導器（光トンネル）、原子堆積法

レーザー光／中空光ファイバーの組み合わせで近接場光を作り、 $\nu > \nu_0$ （原子の共鳴周波数）の条件で原子を反射、誘導する原子誘導器（光トンネル）や、さらに原子堆積器の開発を進めている。原子堆積についてははじめアルカリ原子を取り上げたが、運動が活発で堆積させるのが難しく、シリコンでもその波長(2450nm)にマッチするレーザーがないという問題がある。このテーマはレーザーの種類や有無に依存するところが大きい。

#### (5) 原子捕獲器（原子トラップ）

レーザー冷却された原子のド・ブroy波長は 10nm オーダーであり、同程度の寸法の近接場光はナノ寸法の開口を備えたファイバークローブに誘起される。この種のファイバークローブを用い、近接場光が及ぼす共鳴的な双極子力により原子を個別制御、選択捕獲する原子捕獲器（原子トラップ）を設計することができる（図 18）。Rb 原子の操作に開口径 40nm の 3 段テーパ型プローブを作製した。

最近ではファイバークローブを対向配置させた形状の bow-tie 型原子トラップの開発に取り組んでいる。すなわち SOI 基板をフォトグラフィと異方性化学エッチングで加工

して{(3)項参照}、中心間隙 50nm、先端極率半径 20nm の 1 軸 bow-tie デバイスとし、その中心に 1 個の原子を閉じ込める実験を行っている。



図 18 原子捕獲器(トラップ)<sup>58</sup>

#### (6) 原子ファネル

ERATO に引き続き、漏斗形状の近接場光によってレーザー冷却された原子群を集積、ビーム化する原子ファネルを開発している。図 19 に実験システムを示した。磁気光学トラップ(MOT)で生成した冷却 Rb 原子を重力落下させてファネルに導入し、底部の微小口から出力される原子を再度 MOT で捕獲・蓄積・蛍光検出してフラックスの強度を計測中である。また SOI 基板加工によるマイクロファネルを用いた出力の超高フラックス化や、単一原子操作のためのナノファネルの開発、ファネル内壁での反射時に原子が運動エネルギーを失う Sisyphus 冷却の研究も進めている。

例として 1.2 GHz の青色脱チューニング光により 240nm の出口孔から出力される冷却 Rb 原子のフラックス強度は  $7 \times 10^7 \text{atoms/cm}^2$  であった。この場合、Sisyphus 冷却で出力効率率は 2 倍に向上した。冷却した出口孔径が 110nm の時のフラックス強度は  $10 \times 10^{12} \text{atoms/cm}^2$  と推定された<sup>59</sup>。

<sup>58</sup> 光を用いた原子の極限制御技術の開発 (<http://www.ep.titech.ac.jp/staff2005/ito.pdf>)

<sup>59</sup> Takamizawa A, et al., Appl Phys Lett, 85, 1790-1792, 2004

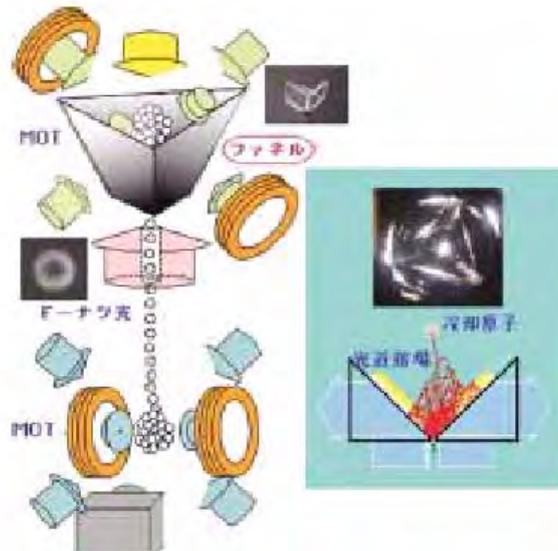


図 19 原子ファネル<sup>58</sup>

#### (7) スピクラスターのデバイス化

アトムフォトリックデバイスとして、ERATO から引き続いた形で原子スピンの利用を検討している。スピクラスターのデバイス化が主眼目で、たとえば量子コンピュータ素子としての利用が考えられる。

スピンに円偏光を当てるとほとんどが上向きの状態となり、これを基板上に集めて並べると一部に下向きのものが生じ、両者のコリジョンによりスピクラスターができる。スピン／スピンの相互作用を使うといろいろのことが可能になり（スピンの状態を変えて結晶構造を変えるなど）、これが近接場光／原子間相互作用の基本になる。対象を自己組織的に扱える利点大きい。

#### (8) 近接場光の非破壊測定

原子偏向を使った近接場光の非破壊的測定を進めている。近接場光の局在性から回折像ができ、その幅や形から物質、光の双方を壊さないで光近接場のより詳しい構造を読み取ることができる。近接場光と原子との相互作用については、提案された理論を検証するための実験データが不足していることもあり、この分野は全体として未解決の問題が多く残されている（次項参照）。

#### (9) その他

近接場光／原子の相互作用については、最後の段階で「見る－直接観測する」のが難

しく、この点がネックになっている。現段階では基礎理論を提案しても今のところ理論を検証するための実験データとしては偏向関連のものしかなく、理論はあっても近似の部分の妥当性を確かめるのが困難な状況にある（そのためのデータが十分蓄積されていない）。

また近接場光をナノレベルからサブナノレベルまでもってゆくには、「脱ファイバープローブ」の方向付けとそれを実現するための新たな発想が必須である（現行のファイバープローブでは、それ自体のサイズが大き過ぎる）。たとえば表面のクリーニングで超微細な凹凸構造を作り、この部分で自己発生的に近接場光を発生させる方法などの検討が一部始められている。

### 2.1.3 NEDO「大容量光ストレージ技術」(2002~2006)

#### (1) プロジェクトの内容<sup>60, 61</sup>

大量の情報を流通・蓄積する情報通信システム、モバイル端末実現に不可欠な大容量ストレージのニーズに対応するために、H18年までに現存技術の限界を大幅に上回る光記録技術を開発することを目標とし、以下の3テーマについて研究が実施された。

- (a) 近接場光基盤評価技術
- (b) 近接場光媒体技術
- (c) 近接場光記録再生技術

プロジェクト中間年度(H16)までに  $300\text{Gb}/\text{inch}^2$  を可能とする各種要素技術を開発し、これらを取捨選択・融合して最終年度までに従来技術の限界とされていた数百 Gb を超えて、面記録密度  $1\text{Tb}/\text{inch}^2$  級の高密度と記録・再生の高速性とを実証する光記録技術を開発する。

さらに中間評価のコメントを受けて、H16年度からは上記の基本計画に新規項目として (d)ナノマスタリング技術のテーマを追加して続行した。内容はパターンド媒体の作製に必須となる  $1\text{Tb}/\text{inch}^2$  級ナノマスタリング技術開発、試作機の作製と加工技術の実証である。また当初は光ディスク/ハードディスクを併行して検討していたが、後半はハードディスクの高密度ハイブリッド(熱アシスト磁気)記録技術に絞って実施した。さらに媒体についても、対象を連続媒体からパターンド媒体(同心円状分離トラック構造)に変更した。

---

<sup>60</sup> 大津元一,光アライアンス,2008.4,41-43

<sup>61</sup> NEDO,「大容量光ストレージ技術の開発」プロジェクト事後評価分科会資料,「プロジェクトの概要」(2007.12)

本プロジェクトで得られた大きい成果としては、近接場光発生ヘッド（ナノビークと命名）と CoPd 磁性ドットの組み合わせで、記録密度 1Tb/inch<sup>2</sup> 級ハイブリッドのコア技術を達成したこと（20nm 径ドットのナノパターンド媒体への記録として実証）、ナノマスタリングで高性能電子露光技術や超高精度ステージ機構を開発し、1Tb/inch<sup>2</sup> 級ディスクの原盤を試作したことなどが上げられ、いずれも世界最高の技術レベルに位置付けられる。図 20 は本プロジェクトで得られた世界初の近接場光ディスクとそれによる信号である。



図 20 近接場光ディスクと信号<sup>62</sup>

以下の各項はすべて上記成果を達成するために必要な個別の基盤技術にかかわるものである。

## (2) 近接場光基盤評価技術

パターンドメディアが扱える FDTD(Finite Difference Time-Domain Analysis)法による光・熱総合シミュレータや近接場光 CVD 法（堆積位置誤差 5nm 以下、寸法制御誤差 1.5nm 以下）を開発するとともに、干渉露光法、NLD ドライエッチング、ウエットエッチング、精密研磨などの全バッチプロセスで、先端平面精度 2.2nm、先端径 40nm の先鋭化プローブを試作するなど高効率のナノ加工技術を実現した。さらに 近接場光スリット型シリコンヘッドを試作し、このヘッドにより目標分解能 1Tb/inch<sup>2</sup> を超える 1.5Tb/inch<sup>2</sup> 相当の分解能が得られることを確認した。また高精度プローブ走査機

<sup>62</sup> NHK サイエンスゼロより

構と高精度ステップイン駆動制御方式を開発し、 $1\text{Tb}/\text{inch}^2$ 相当のナノパターンドメディア立体形状を計測誤差  $0.44\sim 0.48\text{nm}(\sigma)$ で測定して最終目標  $0.5\text{nm}(\sigma)$ を達成し、さらにテラバイト級メモリーの技術方向性として、光/磁気を組み合わせたハイブリッド記録再生技術の実用性を評価した。

### (3) 近接場光媒体技術

自己組織化技術によるディスク状ナノパターンドメディアやポリマーをマスクとする $\sim 20\text{nm}$ 径の磁性体ドットを得た。さらにEB露光技術で円周状の溝を描画しNiスタンプを作製、ナノインプリントにより溝を転写し、溝中で自己組織化させて円周上に配列した磁性ドットを得るとともに、光磁気ハイブリッド記録材料CoPd超格子膜を開発した。この材料はTb級の記録再生が可能で $\sim 20\text{nm}$ 径のピットが安定な、 $8\times 10^6\text{erg}/\text{cc}$ 以上の磁気異方性エネルギーを持つナノパターンドメディア用記録媒体としてすぐれている。

### (4) 近接場光記録再生技術

近接場光発生デバイス「ナノビーク」、 $1.3\text{Tb}/\text{inch}^2$ を見通せる先端曲率半径 $10\text{nm}$ のデバイス、ナノビークと高効率集光素子とを低浮上スライダ上にアSEMBルした近接場光ヘッド、薄型導光手段搭載スライダヘッドなどを試作するとともに、 $30\text{nm}$ ドットピッチのナノパターン媒体上への孤立1ドットの静止記録を実証し、 $20\text{nm}$ 径の光スポットが数%の光利用効率で発生したことを確認した。続いて上記の近接場光ヘッドを用い、 $20\text{nm}$ 径ドットのナノパターン媒体上への孤立1ドットの静止記録と、さらに回転媒体への動的記録を実施し、 $1\text{Tb}/\text{inch}^2$ 記録実証可能な評価システムの有効性を確認した。

### (5) ナノマスタリング技術

研究の最終目標値

電子ビーム収束スポット計  $2\text{nm}$  以下

電流密度  $8\text{kA}/\text{cm}^2$

ステージ直動ステージの位置制御—標準偏差  $10\text{nm}$  以下

回転ステージの回転ぶれ—標準偏差  $2\text{nm}$  以下

の各項について、いずれも目標値を達成した。

これらの技術を電子ビーム偏向補正技術と組み合わせた高精度描画位置制御技術を開発し、ナノマスタリング技術の描画装置を検証した上で、 $1\text{Tb}/\text{inch}^2$ 相当のナノパターンドメディア用ディスク原盤の試作を行い、目標値トラック溝幅  $25\text{nm}$  以下、同心円

溝全面描画、トラックピッチ精度標準偏差 1.5nm 以下をいずれも達成、ナノマスタリング技術の描画を実証した。

(6) すでに実用化されている技術

(a) 電磁界・熱解析ソフトウェア（富士通，2007.6 発売）

(b) 半導体インライン計測用原子間力顕微鏡（日立建機ファインテック，2007.3 発売）

## 2.1.4 NEDO「低損失オプティカル新機能部材」(2006~2011)

### (1) プロジェクトの内容・目的<sup>63</sup>

国際的に高い技術力と競争力を有するわが国のオプティカル部材は、家電分野・情報通信分野の競争優位性確保や持続的発展の鍵になっている。本プロジェクトは、情報家電分野・光学部材ロードマップで示されている低損失の偏光制御部材を中心として、近接場光を動作原理に用いる低損失オプティカル新機能部材の基盤技術、材料・加工技術、光学特性評価技術の開発を行うことを目的に実施中である。本技術の確立により新規偏光制御部材などの低損失オプティカル新機能部材だけではなく、近接場光を信号キャリアとする超小型光論理ゲート素子を用いた大規模集積化光回路デバイスなど、ナノフォトニクス技術をフルに利用して、将来幅広い産業分野で利用できる共通基盤技術としての革新的光技術の形成が見込まれるとともに、高機能・高効率民生機器、情報通信機器の産業競争力強化と新規産業の創造に資する。さらに液晶プロジェクタなどで利用される偏光板の効率向上により約 40%の消費電力低減が見込まれる。本プロジェクトはSORSTやNEDO「大容量光ストレージ」などの結果をさらなる実用化に結びつける狙いで始められた。

研究開発は基盤技術、偏光部材の2グループにより推進され、前者はナノ構造部材の設計・作製・評価技術の開発とともに近接場光を動作原理とするオプティカル新機能部材の検討・機能確認を、後者は赤・青・緑の各波長領域において透過率75%以上、消光比1:2000(33dB)の低損失偏光部材の開発をそれぞれ担当している。

### (2) 現在までの進捗状況および得られた成果

(a) それ以前の段階では量子ドットおよびナノロッドデバイス、したがってそれらを用いたシステムの作動温度は5Kの極低温だったのを、本プロジェクトでInAsを用いた

---

<sup>63</sup> NEDO, 「低損失オプティカル新機能部材技術開発」(2006)

量子ドットの組み合わせで光／光システムを作り、いわば「フラッシュメモリーの光版」により室温に近い 210K 作動まで高めたことは現在までに得られた大きい成果である。さらに 300K も視野のうちに入っている。

(b) 本プロジェクトにはリコー、パイオニア、東芝、コニカ、日立マクセルなどの企業が参画しており、ロードマップで提示されている LED バックライト、フラッシュメモリー、論理デバイス、偏光板など実用化に取り組んでいる。それぞれのテーマで成果も上がりつつある。

(c) 色素を微粉末にして赤外光を照射すると、粉の表面に近接場光が発生して赤く光ることを見出した。

(d) 東芝では、「キーテクノロジーとしての金型」の開発を進めている。

#### 2.1.5 総務省 SCOPE プロジェクト「光通信用超高集積光ノードシステムの開発」(2003-2005)

本プロジェクトは、ナノフォトニクスを利用した光ノードのシステムアーキテクチャの提案、宛先検索などの情報処理機能・インターコネクション技術の開発、それらを踏まえた超高集積光ノードの基本アーキテクチャの確立を目的として進められた。この目的に沿ってナノフォトニクス超高集積光宛先検索アーキテクチャ・ブロードキャストシステムの提案および検証実験、ナノフォトニック論理ゲートの各研究を実施した。その結果、ナノフォトニック宛先検索やナノフォトニックブロードキャストシステムの構築・検証を行い、Ⅲ・Ⅴ族半導体量子ドットを用いたナノフォトニック NOT ゲートの開発に成功した<sup>64</sup>。

これらの成果は、超高集積光ノードの実用化に必要な基盤技術に関する基本アーキテクチャの実証であり、当初の目的が達成されたとともに実用的な半導体量子ドットの実験的検証も実現されるに至った。

#### 2.1.6 JST 委託開発課題「近接場光学顕微分光システム」

大津研究室／日本分光の共同研究開発で、光の回折限界を超えた極微小領域でのキャラクタリゼーションが可能な走査型近接場光学顕微分光システムを製品化した(図 21)。

数十～数百 nm の開口を持つファイバースコープに光を導入して近接場光を発生させ、

---

<sup>64</sup> 大津元一,SCOPE 第 2 回成果発表会予稿集

その近傍に試料を接近させることで生じる近接場光／試料表面の相互作用を開口部の寸法と同程度の分解能で観察する。さらに本システムでは世界ではじめての分光分析も行うことができ、微小領域でスペクトルの強度変化やピークシフトの観測も可能で、より高度なキャラクタリゼーションが行えるようになった。このシステムを用いて、液相成長した GaAsP の表面組成分布やポリアセチレンの C=C 共役鎖の分布に関する新たな情報が蓄積されている。

ここで使用したファイバースコープは、神奈川技術アカデミー（KAST）での研究成果をもとに開発されたもので、特定サイズの開口を備えたプローブを再現性よく作製できる。

なお本製品は第 30 回井上春成賞を受賞した(2005)。

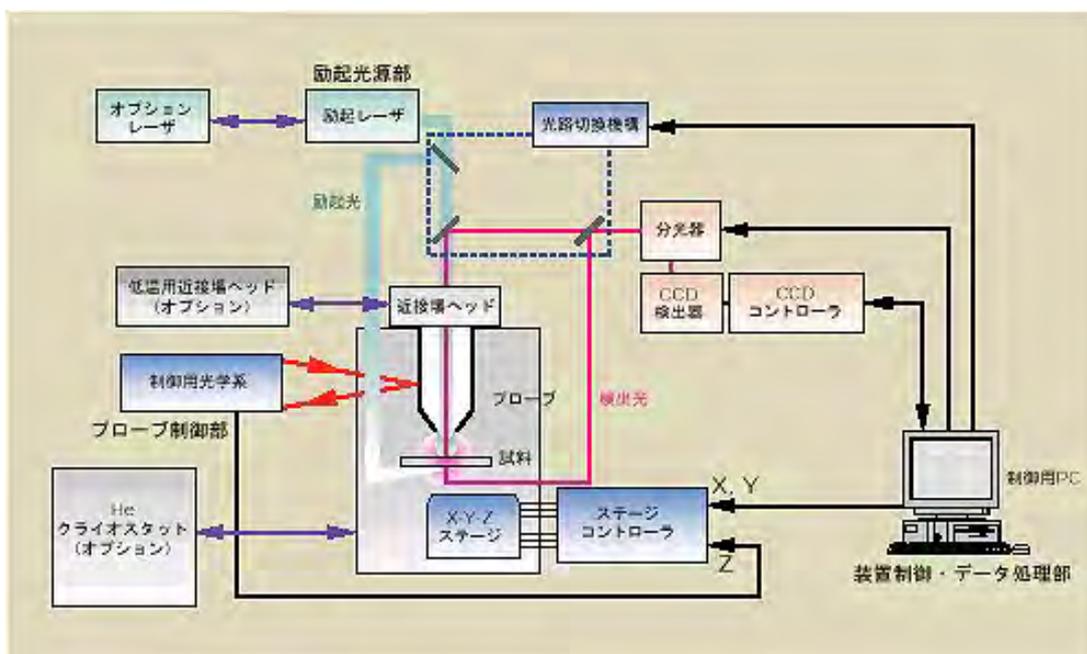


図 21 近接場光学顕微分光システム<sup>65</sup>

### 2.1.7 文科省「リソグラフィ装置の開発」プロジェクト(2004-2006)

大津／キャノンの共同研究で近接場光を動作原理とするリソグラフィ装置の開発を実施した。光リソグラフィ装置は、微細加工に要求される加工寸法の高度化と回折限界による光の原理的な制限のため、EUV リソグラフィのように、より短波長の光を必要とするが、それにとまう装置の大規模化やコスト高、大消費エネルギーが問題である。

<sup>65</sup> 日本分光 HP <http://www.jasco.co.jp/Japanese/products/SPM/SPM.html> より

大津研究室では短波長光源や特殊光学系を要しない近接場光加工技術を利用して、キャノンと共同で「近接場光リソグラフィ装置の開発」を推進した（文科省リーディングプロジェクト「ナノ計測加工技術の実用化開発」）。

この装置は薄膜型フォトマスクを 10nm 以下でウェハーと全面密接させる機構を備え、ステップアンドリピート機能駆動により 25nm 角への加工能力を備える他、装置内局所クリーン機構や対称性の高い構造によって、クリーンルームレス環境と高い耐振動安定性をデスクトップ寸法で実現している。近接場光リソグラフィに適した専用レジストなどの開発により、同装置で 50nm 以下のパターンの作製に成功した。加工面積は 50mm × 60mm の広域にわたる。

またフォトレジストが通常感度を有しない波長の光を光源とした場合にも、近接場光に対して選択的にパターン形成が実現される非断熱過程も発見され、今後のさらなる発展が期待される。近接場光リソグラフィに関するマスク構造やフォトレジスト技術の最近の発展にともない、解像度がさらに向上してハーフピッチ 22nm パターンも実現するに至った。

#### 2.1.8 NEDO「エネルギー使用合理化技術戦略開発」プロジェクト(2008-2011)<sup>66</sup>

近接場光による位置制御特性(2003)の応用展開として、SORST で得られた成果を活用する形で大津/シグマ光機の共同研究により光学素子（レーザー機器を構成するレンズやミラーなど）の高性能化を目的とする、ガラス基板などの表面平坦化をサブナノレベルで行う検討を進めている。

ガラスとは直接反応しない不活性塩素分子の雰囲気中にガラス基板を封入し、光源として 532nm のレーザー光を照射する。この光はエッチング剤の光吸収端より長波長側にあるため光吸収されず基板とは反応しない。一方、この光によりガラス基板表面の局所的な凹凸部に近接場光が発生すると、非断熱過程で塩素分子が分解して塩素ラジカルとなり、このラジカルが基板表面と反応し、凹凸構造のみがエッチングされて基板が平坦化する。最終的に基板に凹凸がなくなると近接場光は発生しなくなるため、反応が自立的に停止する（図 13）。

この非断熱過程を利用した近接場光エッチング法により得られた表面粗さ Ra 値（平均面からの絶対値偏差の平均値、AFM により評価）はレーザー照射時間 120min で 1.3 Å となり、従来の研磨法による 2~5 Å に比して大きく改善された<sup>67</sup>（図 22）。

---

<sup>66</sup> NEDO, 「エネルギー使用合理化技術戦略開発」基本計画

<sup>67</sup> 平田和也, 「ナノフォトニクスによる光学素子の超平坦化」ナノフォトニクス総合的展開シンポジウム要旨集(2008.7)

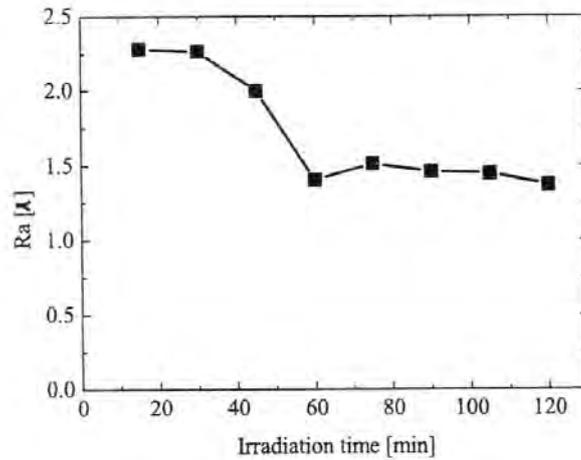


図 22 近接場光エッチング時間と表面粗さ度 Ra 値<sup>63</sup>

### 2.1.9 その他の共同研究実施状況

#### (1) 大学（国内）

東大	丸山研	CNT による光メモリー
東大	田中研	光とスピンの融合による新機能デバイスの開発
東大	杉山研	化合物半導体の自己組織化成長を用いた光メモリー素子の開発
東大	藤田研	MEMS によるナノフォトニックデバイスの制御
東大	米沢研, 鷺津研	DNA などの化学的手法によるナノフォトニックデバイスの開発
東大	北森研	燃料電池

#### (2) 大学（海外）

Australia National University	Australia	化合物半導体によるナノフォトニックデバイスの応用
Macquarie University	Australia	バイオフォトニクスへの応用
Oldenburg	Germany	電界放出素子の開発
Postech.	Korea	酸化物半導体によるナノフォトニックデバイスの応用

#### (3) 企業

シグマ光機	ガラスの平坦化
-------	---------

コバレントマテリアル	セラミック平坦化→レーザーの高効率化
Vテクノロジー	白色LED
日本分光	近接場光学顕微鏡（製品化済み）
NHK	ディスプレイ

### 2.1.10 現在の状況

#### (1) 基礎研究の動向－“dressed photon”について<sup>68, 69, 70</sup>

最近の近接場光研究の大きい流れとして、“dressed photon”のコンセプトを用いたアクセスがある。近接場光という実在を、「励起された状態にある物質の衣をまとった光子」と捉え、これを dressed photon と命名したものである。ナノ寸法の領域では物質と光は互いに強く相互作用しており、それぞれの視点からその内容を考察して行くのが本筋であるが、光科学技術の進展のためにはこの状態を dressed state of photon として光の立場から記述するのが便利である。換言すれば、物質の外部から近接場光の問題を考える姿勢である。複数のナノ寸法物質がある程度の距離（数 nm～数 10nm）において置かれており、電子のトンネリングなどによる物質エネルギーの直接的な伝達がない場合でも光によりエネルギーが伝達することを記述するためには、物質と光（電子系と光子系）が融合した状態を光の立場から考えた方が扱いやすい。このような考察の帰結が dressed photon の描像であり、これにより電気双極子禁制準位への光励起、コヒーレントフォノンとの結合による非断熱的光化学反応などの新しい諸現象が理論的に記述可能となった。現在ではこの描像は光デバイス、光加工、光システムの説明や設計にも使われている。今後光科学や場の量子論、固体物理学などの学際的な領域にまたがって dressed photon の概念の記述の精密化、とくにナノ寸法領域での光エネルギーの移動と緩和などについてより詳細な考察を進め、新しいフォトサイエンスとしての dressed photon science and technology を発展させることが望まれる所以である。

#### (2) 応用展開面の現状

個別の各テーマについては前項までに記したとおりであるが、全般的に、ナノ光加工では、ERATO の原理確認からその後の応用展開を経て、現在は「大面積加工」および

<sup>68</sup> Tanaka, et al., J Microscopy, 229, 228-232, 2007

<sup>69</sup> 大津元一, 応用物理, 77, 1341-1352, 2008

<sup>70</sup> 大津元一, 「光とナノ」, 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」講演要旨集(2009.1)

「サブナノレベルでの平坦化(NEDO エネルギー使用合理化プロジェクト、2.1.8.参照)」についての検討が進められている。また光デバイス関連では、光スイッチ・クロック発生器・メモリー、ナノ光配線－多重配線・自立配線がそれぞれ主たるテーマとなっている。

## 2.2 プロジェクトメンバーの活動状況

大津元一氏	東京大学大学院工学系研究科教授(2004)
小林 潔氏	山梨大学大学院医学工学総合研究部 教授 (2009.4)
川添 忠氏	東京大学大学院工学系研究科特任准教授
八井 崇氏	東京大学大学院工学系研究科准教授
三宮 俊氏	リコー研究開発本部
小路口暁氏	奈良女子大→日本電気
戸塚 弘毅氏	東京工大→静岡大学
高見沢昭文氏	ERATO「大野半導体スピントロニクス」プロジェクト研究員

## 第3章 プロジェクト成果波及と展望

### 3.1 科学技術への波及

#### 3.1.1 2 国間交流の進展

(1) 日米合同シンポジウム 「ナノフォトニクス：ナノの光の粒で加工、デバイス、システムの限界を超える」 (2004.10, 全米化学財団・文部科学省主催, 東大武田ホール)

(2) 米国－日米ナノフォトニクスセミナー (日本学術振興会 二国間交流事業)

開催日時・場所 2008.9, 宮崎市

日本国側代表者 大津元一

米国側代表者 Arup Neogi (North Texas 大)

(3) オーストラリア－日豪ナノフォトニクス ミニワークショップ 2008.3 東大

日豪ナノフォトニクスワークショップ 2008.12 キャンベラ,オーストラリア

(4) ドイツ－日独ナノフォトニクスセミナー (日本学術振興会, ドイツ科学協会) 2007.9, 米子市

日本国側代表者 大津元一

ドイツ側代表者 Christoph Lienau(Oldenburg 大)

本セミナー交流の結果、両国間の共同研究が立ち上げられた。

(5) スウェーデン, フィンランド 2009 年にワークショップ実施予定

#### 3.1.2 ナノフォトニクス研究センターの設立とシンポジウムの開催

(1) ナノフォトニクス研究センターの設立

ナノフォトニクスの先端研究をより高度に、より活発に展開することを企図して、2008.4.1 に、ナノフォトニクス研究センターが東京大学大学院工学系研究科総合機構中に設立された。本センターはまずコアとなる四つの研究グループ (大津元一・田中雅明・田畑仁・保立和夫各教授のグループ) で発足し、先端ナノフォトニクスの探求を活性化するとともに、産学連携、セミナー、国際交流などのアウトリーチ活動によって、ナノフォトニクス研究の魅力的な基地となる組織を指向する。

研究センターの運営に際しては、アカデミックフリーダムや知的好奇心、センス・オブ・ワンダーの探求、先鋭的で未開拓な領域開拓への挑戦、さらに教育・人材育成などの大学の本義にも十分配慮して行きたいとしている。

また工学系研究科や総合研究機構、電気系グローバル COE「セキュアライフ・エレクトロニクス」、NEDO 技術開発機構「NEDO 特別講座」などの関連組織とも密接に連携させることにより、ナノフォトニクスの一層の充実と発展を図ることも狙いの一つに上げられている。

## (2) ナノフォトニクス総合的展開シンポジウムの開催（東大/NEDO）

前項のナノフォトニクス研究センター開設を記念して、表題のシンポジウムが開催された。

日 時 2008.7.2.

場 所 東京大学武田先端知ビル 5F 武田ホール

内 容 基調講演 「ナノフォトニクスの最近の展開」 大津教授

ナノフォトニクス研究センター講演

スピントロニクス, ナノフォトニクス, 先端微細加工プロセス

ナノフォトニクス最新研究報告

「ナノフォトニクスデバイスと加工」 (八井崇氏)

産学連携研究紹介

「ナノフォトニクスによる波長変換と応用」 (浜松ホトニクス 藤原弘康氏)

「ナノフォトニクスによる光学素子の超平坦化」 (シグマ光機 平田和也氏)

後者については 2.1.8.参照

### 3.1.3 統計資料に見るプロジェクトの影響度

#### (1) 関連報文の被引用件数 (ERATO およびそれ以降)

表 1 は ERATO およびそれ以後の報文中で被引用件数の多いものから順に並べたものである。近接場光を動作原理とするデバイス関連が大部分を占めており、加工法も結局はデバイス作製のための技術だから、8 位のプローブを除いてすべてがナノフォトニックデバイスにかかわるものということができる。この事実は、近未来での実現が期待される光/光 IC システムに向けての社会の強い関心を如実に示すものであろう。さらにはそのための有力な手段としてのナノフォトニクス技術に対する評価の現われと見なすことができる。

表 1 関連報文の被引用件数(ERATO およびそれ以降)

No	順位	被引用件数	著者(筆頭者)	誌名他	内容	分類
1	1	132	大津	IEEE J.Sel.Top Quantum Electr.,8,839(2002)	デバイス設計・作製作動(総説)	デバイス
2	2	68	八井	Appl.Phys.Lett.,79,4583(2001)	プラズモン導波路	デバイス
3	3	66	川添	Appl.Phys.Lett.,82,2957(2003)	光スイッチ提示	デバイス
4	4	48	山本	Appl.Phys.Lett.,76,2173(2000)	気相光解離,ナノ Zn	加工法
5	5	42	Kim	Appl.Phys.Lett.,84,3358(2004)	Zn ナノワイヤ	デバイス
6	5*	42	野村	Appl.Phys.Lett.,86,181108(2005)	SPP カップラー	デバイス
7	7	38	Lee	Thin Solid Films,386,117(2001)	光 CVD,Zn フィルム	加工法
8	8	37	八井	Appl.Phys.Lett.,80,2257(2002)	金属コート Si プローブ	プローブ
9	9	36	川添	Phys.Rev.Lett.,88,067404(2002)	CuCl 量子キューブ	デバイス
10	10	31	三宮	Phys.Rev.B,69,115334(2004)	量子ドット,論理素子	デバイス

\*: この報文のみ SORST, 他はすべて ERATO

掲載誌として過半数を Appl.Phys.Lett.が占めているのは、「デバイスに関する新たな知見の発表はまずここに」というプロジェクトの戦略的な方向付けがあったのではないか。

ただし、前記の被引用件数は、本プロジェクトで得られた成果のユニークさ、研究内容の独創性やレベルの高さ、さらには今後の情報通信・メモリー技術などの発展に及ぼす潜在的なインパクトの強さを考えると、いささか少なすぎる感を否めない。これはおそらく、従来の近接場光に関する研究がそのほとんどを大津グループで進められていること、とくに海外では近接場光はもっぱら走査型光学顕微鏡や分光システムのための手段として扱われているにすぎない(少なくともこれまでは回折限界の拘束を破ってナノの世界に踏み込むスタンス—在来光学の質的な革新、パラダイムの変換という立場から近接場光の問題を取り上げている例は見当たらない) ことによるものと思われる。現在進められている2国間交流(3.1.1.参照)などを通じて、近接場光研究の本質的な意義と基本思想が地球的に認識された暁には、大津グループの研究が引用される割合も飛躍的に増加してくるであろう。

図 23 は被引用件数の年次推移、図 24 はその累積値を示したものである。

上位にあるものは、総体に発表後2~4年でピークに達し、それ以後も急激な落ち込みはなく、あるレベルを保っていることがわかる。

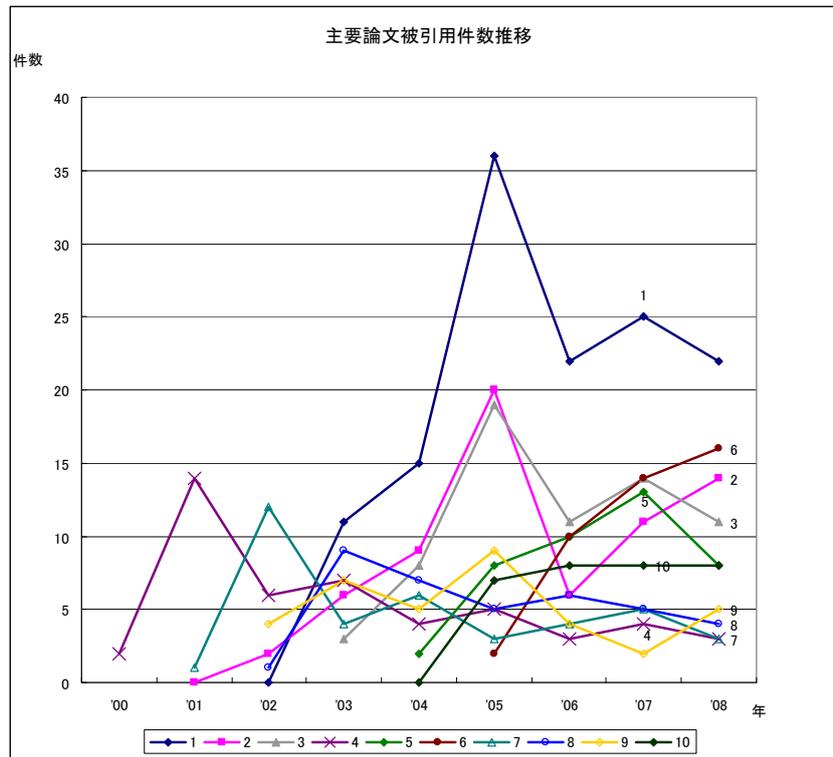


図 23 報文被引用件数の年次推移 検索日 2009/2/5

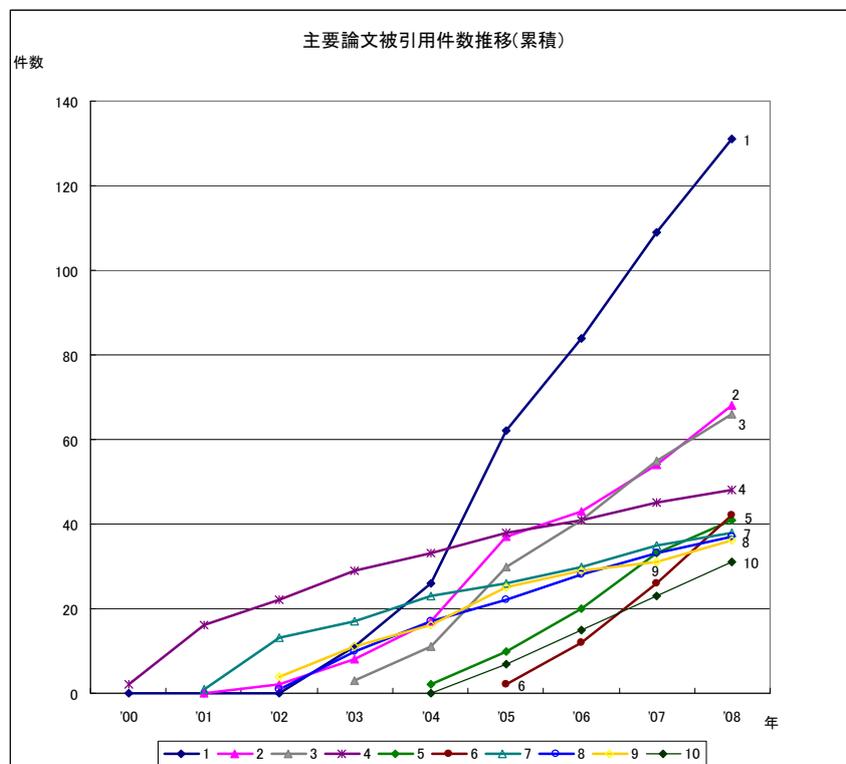


図 24 被引用件数の年次累積推移 検索日 2009/2/5

なお参考までに、プロジェクト以前の段階を含めての大津グループの報文に対する被引用件数を表 2 に示しておく。

表 2 大津グループの報文に対する被引用件数

順位	被引用件数	著者(筆頭者)	誌名他	内容	分類
1	176	Micheletto	Langmuir,11(9),3333(1995)	ラテックス粒子の 2 次元配列	界面化学
2	161	伊藤	Phys.Rev.Lett.,76(24),4500(1996)	エバネセント光による原子分光	原子分光
3*	132	大津	IEEE J.Sel.Topics in Quantum Electron, 8(4),839(2002)	ナノフォトニックデバイス	デバイス
4	131	興梠	IEEE J.Quantum Electron,29,2693(1993)		
5	123	斉木	Appl.Phys.Lett.,68(19),2612(1996)	STM 用ファイバースプロブ	ファイバースプロブ
6	93	Panga-Ribuan	Jpn.J.Appl.Phys.,31,L1302(1992)	STM 用ファイバースプロブ	ファイバースプロブ
7	86	大津	J.LightwaveTech.13(7),1200(1995)	STM 用ファイバースプロブ	ファイバースプロブ

\* : 本件のみ ERATO, それ以外はすべて ERATO 以前の報文

ここでは第 3 位のデバイスを扱ったものだけが ERATO 関連 (表 1 と重複) で、他はすべてそれ以前の結果に関する発表である。すなわち全体としては明らかに ERATO 以前の研究に対する引用がより多い。このうち界面や原子光学の領域は大津グループ以外でも活発に進められていたから件数の多いのも自然な結果といえる。近接場光では STM のためのファイバースプロブの引用が多数に上っているが、当時の状況では近接場光はもっぱら高分解能の光学顕微鏡および分光システムに関連して利用されており (これらの研究は内外で広く進められていた)、大津グループの「選択エッチング法によるファイバースプロブ」はその分野にアクセスするための最有力なキーテクノロジーの役割を担っていたから、その意味で被引用件数の多さも首肯できるところである。

## (2) プロジェクトを特徴づけるキーワードによる報文数の推移

「近接場光×ナノフォトニクス」および「近接場光×光 CVD」のキーワードの組み合わせで検索した報文数の年次推移をそれぞれ図 11、図 12 に示す。

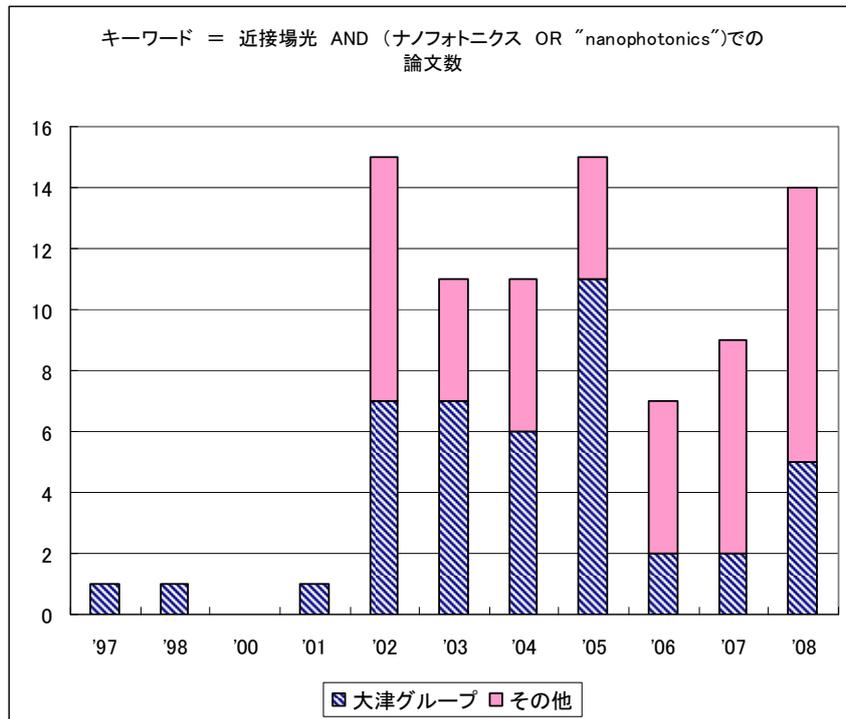


図 25「近接場光×ナノフォトニクス」をキーワードとする報文数の年次推移

検索日 2009/2/13

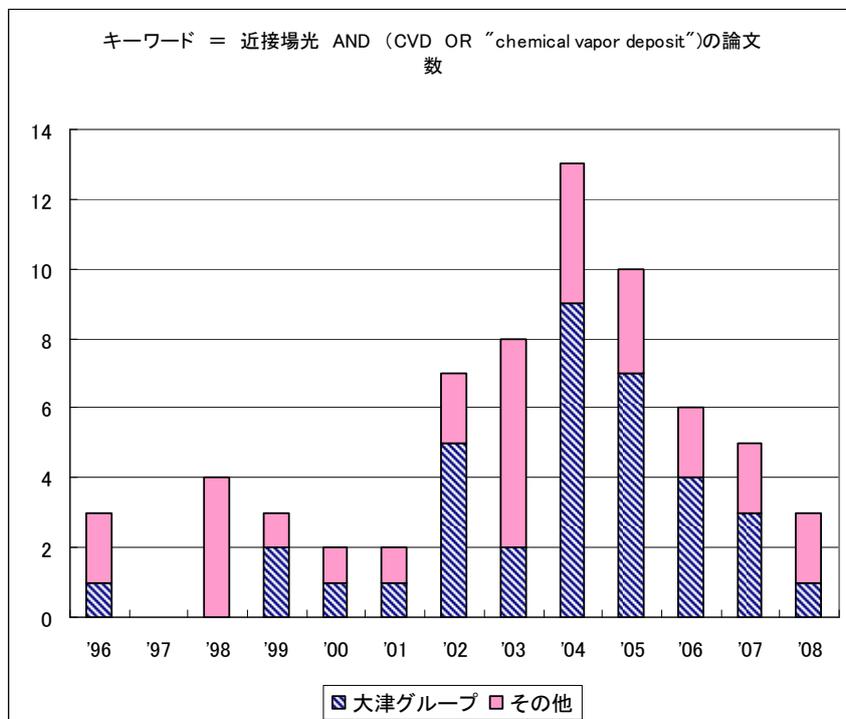


図 26 「近接場光×光 CVD」をキーワードとする報文数の年次推移 検索日 2009/2/13

「ナノフォトニクス」のネーミングで使われている技術は、必ずしも総括責任者の大津の定義による「近接場光を動作原理とするナノ寸法のデバイス作製や加工法」を意味せず、単にナノテクノロジーの領域に光学の技術を適用した、より広い範囲で用いられている場合も多い（上記の結果にも若干含まれている）。

それぞれのキーワードで得られた報文中には、大津グループ以外の著者によるものも見受けられる（とくに図 11）が、それらの多くは近接場光学顕微鏡に関するもの、あるいは近接場光やそれを利用したナノフォトニックデバイスについての総説・解説に類するものである。この傾向自体が、本研究技術分野に対して周囲から向けられた関心の高さを示唆しているといえよう。

### 3.1.4 近接場光の動作原理を利用できる技術の例

光情報通信	超高速ルータ，情報セキュリティ
光情報処理	フォトンコンピュータ
光情報記録	HDD 型 1Tb/inch <sup>2</sup> 密度メモリー，機能性メモリー
光加工	光リソグラフィ，光 CVD，近接場光アシスト型微細加工
光計測	分光分析装置
入出力インターフェイス表示システム	高輝度・高解像ディスプレイ
化学、バイオ、医薬応用分野	プロテインチップ，ナノ化学チャンネル
メカニカル分野	MEMS
エネルギー分野	太陽光発電，光検出器，発光体

## 3.2 社会経済への波及

### 3.2.1 社会面

(1) ナノフォトニクスの総合的展開（「ナノフォトニクスを核とした人材育成、産学連携等の総合的展開」－NEDO 特別講座，H17～H23）

NEDO の新規施策「NEDO プロジェクトを核とした人材育成、産学連携等の総合的展開（NEDO 特別講座）」の一環として東京大学大学院工学研究科において実施されている。

制度的なフレームと実効性のある研究環境の下でナノフォトニクスを総合的に展開できるシステムを作る。さまざまなマーケットセグメントにおける潜在的なニーズあるい

は顕在しているニーズをナノフォトニクスの知見から具体的に検討し、実証的な研究を進めるとともに、本制度に特化した専用スペースを東大内に設けて、より緊密な形での研究推進・人材育成を図る。

また種々の学術分野との融合・境界領域での重要な研究テーマについて、アカデミックセクターの研究者と共同して取り組み、先駆的な成果を目指す。

この種の共同研究と併行して以下の活動を行っている。

- (a) ナノフォトニクスレクチャーシリーズ
- (b) ナノフォトニクスゼミ（毎週開催）
- (c) ナノフォトニクスセミナー（年6回程度開催）
- (d) ナノフォトニクス オン ザ ジョブ トレーニング

## (2) 情報通信ロードマップにおける近接場光技術の位置づけ<sup>1</sup>

光産業技術振興協会が1998年にまとめた「光テクノロジーロードマップ（情報・通信分野）」によれば、2010年には社会的背景や生活スタイルの変化にともなって情報需要量が増大し、各家庭で必要となる光メモリーの記録密度は  $1\text{Tb}/\text{inch}^2$ 、再生速度では  $100\text{Mb}/\text{s}$  と見積もられている。これらの値は現在の光メモリーの性能の100倍ないしそれ以上であり、換算すると1ビットの情報を記録するための加工の寸法として30nm程度まで小さくする必要があることを意味している。そのために短波長光源を使うことなど種々の検討が行われているが、既存の伝搬光を使う限り回折限界の壁があるため、光の波長より短い数十ナノメートルレベルの加工は困難である。このバリアを超えて超微小のメモリーを実現するためのもっとも有力な一むしろ「唯一の」といってもよい一手段が近接場光の活用ということになる。

もちろん近接場光を実生活の場で利用するためには、コストの点はしばらく措くとしても、設備やシステム、配線、パワー等々の点で克服すべきブレークスルーは多々あり、決して簡単に実現するものではない。しかし前記の状況を考えると、これらの問題点を一つ一つ解決しながら最終目標に向けて着実に前進する姿勢が必要な時期に来ていると考えられる。現代という時代がそれを要請している、といっても過言ではないのである。

## (3) ナノフォトニクス工学推進機構の設立

ERATOプロジェクトで蓄積された一連の成果をふまえ、特定非営利活動法人「ナノフォトニクス工学推進機構」がH17年6月に設立された。設立の趣旨は、ナノフォトニクスによる最先端科学技術の創出とその成果を速やかに産業技術として育成するた

めに、研究者の育成・社会教育の推進・学術の振興・職業能力の開発・環境の保全を図りつつ、経済活動の活性化を図ると同時に豊かな情報社会の発展、科学技術の振興に貢献することにある。

#### (4) 企業側の取り組み

ナノフォトニクス関連のプロジェクトには、リコー、東芝、パイオニア、日立マクセル、コニカ、日本電子、シグマ光機、浜松フォトニクス、パイオニア、その他多数の民間企業が参加しているが、ここでは代表的な参加企業の取り組み事例を示す。

##### (a) ERATO「局在フォトン」プロジェクトへのコメント

総括責任者の大津のERATOプロジェクトでナノフォトニクスの技術が実用につながる可能性が明らかにされた。ERATOで科学的基盤研究がなされ、NEDOのテクノロジーへの方向付けがきちんとできていたことも、企業が近接場光のテーマを取り上げた一つの動機となった。

ERATOの成果では、非断熱プロセスの発見と利用、および複数の量子ドット間のエネルギー移動とその応用が中心をなしている。近接場光に関する学術面での業績がそのまま実用につながったことが特筆される（もともとは基礎領域での理論が、デバイスなどの応用分野に活かされて大きい夢を育てた）。

##### (b) NEDO「大容量光ストレージ」プロジェクトへのコメント

このプロジェクトの大きい成果、 $1\text{Tb}/\text{inch}^2$ を実際に素子の形にして関連業界に配っており、各企業ではそれぞれハードディスクによるテストが進められている。これが業界の再編成につながる可能性もある。それで太陽電池ができたならさらに大きいアウトカムになる。垂直磁気の壁を超えて実用化できれば大量消費型の製品になり得るし、パターンメディアが実用に供せられたらコンピュータ向け用途のはしりになる。

##### (c) 近接場光—ナノフォトニクスとのかかわり合い

10年以上前にNEDOの「ナノメートル制御」プロジェクトで信号処理のテーマを扱い、ブルーレイで $100\text{Gb}/\text{inch}^2$ の結果を出した。次の段階でホログラフィや近接場光を考えたが、「まだ実現していない未来のテーマ」という観点から後者を選び、NEDOの「大容量光」および「低損失」各プロジェクトに参加した。ここ2年で光/光ICのデモ機を作る予定であり、量子配線—近接場光ICで所要電力が従来系の $1/10^5$ に低減される見込みである。

##### (d) 国際間の競争—日本の立場について

かつて日本は IC 技術で先行しながらエッセンスを米国に持って行かれ、結果的に後塵を拝した苦い経験がある（米国ではその利得が今出ている）。光/光 IC で同じ徹を踏まないよう、万全の策をとるべきである。国策として、日本のすぐれた技術をどう発展させ、かつ世界の中でどう守ってゆくか、はっきりした戦略を立てねばならない。とくに特許戦略が重要である。仮にパワーゲームで勝ちを収めたとしても、現在の特許システムでは（国策としては）不十分であり、これを国際競争力を高める方向に改善すべきである—特許を含めた世界戦略（攻撃、防御の両面から）を国/企業の連携で確立しておくことが重要。基礎研究の段階から国が支援し、これはと評価したテーマには資金的な援助を与えることを考えたらいい（光/光 IC 技術を完成できるのはアジアでは日本だけ。韓国や東南アジアでは難しい）。波長変換の部分は今のところ海外に流出していないし、出すべきではない。1Tb/inch<sup>2</sup>のメモリーについても、80%方「囲い込み」を行っている。

### 3.2.2 経済面

(1) 近い将来に実用化される見通しが大きいもの

- (a) 表面平坦化 エネルギー利用の合理化（ミラーなど光学部品、光学結晶など発光素子）
- (b) 可視光の利用 太陽電池・光触媒（水素発生）の高効率化
- (c) 白色 LED 3色別に作製、結晶成長のパラダイムシフト
- (d) クロック発生器 光源のナノ寸法化、省エネ
- (e) バイオマーカー ZnO ナノ微粒子による安全・安心なバイオマーカーの開発

なお、すでに製品化されているものとしては、近接場光学顕微分光システム（日本分光、2.1.6.参照）の他に半導体インライン計測用原子間力顕微鏡（日立建機ファインテック、2007.3 発売）、電磁界・熱解析ソフトウェア（富士通、2007.6 発売）があげられる。

(2) 市場予測

本プロジェクトで開発した近接場光技術およびナノテクノロジーは、21C の情報ネットワーク・省資源・高齢化・環境整備などの社会的ニーズに对应のみならず、新規に大きな市場を創出することが可能で、2015 年には 7 兆円、2020 年には 26 兆円と投入費用に対して大きい経済効果が期待できる。

7 兆円市場(2015 年)および 26 兆円市場(2020 年)の内訳は次のとおりである。

	2015年	2020年
超大容量メモリー	4.00	19.00
ナノ光加工	0.84	1.46
ナノフォトニックデバイス	1.00	4.00
評価・分析・計測	0.21	0.30
医薬・バイオ応用	0.95	1.70
計	7.00	26.46

(OITDA, 単位:兆円)<sup>71</sup>

---

<sup>71</sup> 光産業の将来ビジョン(財)光産業技術振興協会, 2004.11

(<http://www.oitda.or.jp/main/syourai/2004fy0011.pdf>)

## Appendix

A. 論文リスト

B. 特許リスト

C. 受賞リスト

D. プロジェクトメンバーの動静