

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名： ナノフォトニックデバイスとシステムの開発

2. 研究代表者名： 大津 元一（東京大学 大学院工学系研究科 教授）

3. 研究概要：

ERATO プロジェクトの一部を継続して、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。「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」を基本構想とし、伝搬光を使ったのでは実現し得ない機能、現象を引き出して使うという「質的変革」を実現することを本プロジェクトの目的とする。この実現のために、ナノフォトニックデバイス実用化の雛形開発、寸法と位置の制御性の高い微細加工法の開発、新しい情報伝送システムの検討、の3課題に分けて実施する。これらの課題の中から、特に「質的変革」を実現したものを抽出して列挙する。

第一にナノフォトニックデバイスについては、CuCl量子ドットを用いて繰り返し25psのナノフォトニックスイッチ動作を得た。室温動作スイッチ用として2重量子井戸(井戸厚2nm)構造ZnOナノロッドを作製し、量子井戸間での近接場光エネルギー移動(章動周波数7GHz)を確認した。InAlAs量子ドットを用い、NOTゲートの13nsの繰り返しパルス動作を確認した。ナノ寸法の金属ドット列によるプラズモン・ポラリトン結合器を作製し、ナノフォトニック配線を開発した。量子ドット間の近接場エネルギー移動を利用したナノフォトニック集光器を考案し、直径20nmの微小領域への光エネルギー集中を確認した。また遅延回路を考案し100nm長で光伝搬時間300ps(伝搬光の 10^6 倍)を得た。

第二に、ナノ光加工については、ナノフォトニックデバイス製作のために非断熱過程を利用した化学気相堆積法を考案し、光学不活性な分子ガス($\text{Zn}(\text{acac})_2$)を解離し $5 \times 10 \times 0.3 \text{ nm}^3$ という最小のZn微粒子堆積を実現した。またGaNの堆積を室温にて世界で初めて実現した。基板面積全体にわたる一括加工のために、近接場光の寸法依存共鳴による脱離効果を利用した自己組織的加工法を開発し、Al微粒子列(各微粒子の直径70nm、間隔30nm、列全長 $>30 \mu\text{m}$)を堆積した。非断熱過程を利用することにより、赤色光源を用いた一括露光近接場光リソグラフィを開発し、電子ビーム用レジストにも適用して寸法50nmの微小円形2次元配列パターンを作製した。この他、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法も開発した。

第三に、ナノフォトニックシステムの構築については、必要なデータにアクセスするための光ナノCAM(Content Addressable Memory 連想メモリ)を提案し、ナノフォトニックスイッチとナノ集光器とを利用して3ビットのデジタル入力信号に対しCAMとしての出力光信号を得た。さらに、新しい光情報処理システムの構築のため、 $1 \mu\text{m}$ 角の微小領域に3つのナノフォトニックスイッチを配備してBroadcast型の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。一方、近接場光相互作用の階層性を利用した光メモリシステムを考案し、微小金属微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出来ることを示した。

4. 中間評価結果

4-1 研究の進捗状況と今後の見込み

伝搬光では出ない機能・現象を近接場光で引き出し、フォトニクス of 質的変革を図ることを目指した大きな進捗が認められる。極めて微小の光回路の可能性の一端を示したことや、近接場光CVD、非断熱近接場光リソグラフィの大きなポテンシャルの一部を実際に示したことは、産業利用にはまだ距離はあるが技術的インパクトとして高く評価出来る。システムでは、情報セキュリティへの応用など検討段階ではあるが先行きが楽しみな課題も見られる。研究代表者がナノフォトニクスの提案者であり、近接場光のエネルギー伝播を基礎とするデバイスのアイデアなど、ほとんど独壇場である。他ではあまり追随出来ないような高度な実験の遂行等、高く評価出来る。ただし、他が追いてこない、あるいは追試をしないという状況は、この分野の発展にとって良いこととは言えない面がある。近接場光の新しい概念（捉え方）、たとえばスイッチング機構などにはこれまでの光物性理論の考え方からは理解しにくいものが含まれている。他分野との交流も含めて、これまでに観測されている新しい現象を理論的な観点から解析していくことは、今後の大きな発展に繋がるものと期待される。

4-2 研究成果の現状と今後の見込み

ナノフォトニックデバイスとして、CuCl量子ドットによるNOTゲートの実験的実証は信号・雑音比など不十分だが最初の実験的検証として重要である。さらに、CuCl量子ドットによる集光器の基礎検討も高効率(80-99%)の確認が取れた点を高く評価する。ただし、CuClドットでは、今後の展開が限られてくる(低温、位置制御の困難さ)ので、InAlAs、ZnO、InAs量子ドットへの展開に期待する。ナノ光加工関連では、近接場光CVD、非断熱近接場光リソグラフィの基本的な実験的実証が順調に進展している。ナノフォトニックシステムのナノ光CAMに関しては、もっとも基礎的なSummationの実証は出来ているが、参照データと入力データの積についてはこれからと思える。

加工プロセスなどについては、良い方向に進展していると思われるが、デバイスについては、可能性実証、機能実証の段階にある。現状の技術動向として、光論理素子・回路の微小化・低消費電力化については、伝搬光を駆使した全光信号処理技術がエレクトロニクスの速度・消費電力の限界を打破する技術として期待されている。本研究のナノフォトニクスは、その先の超微細、超低消費電力回路の候補と思われる。システムについては、CAMを将来的な応用分野として旗を掲げるのは良いが、それを達成するにはこの段階ではデバイス・プロセス技術共に研究すべきことが多過ぎるように思える。

4-3 総合的評価

「質的変革」をスローガンに、従来の伝搬光では実現出来なかった機能や現象を対象として、近接場光を用いて深く踏み込むことで問題を解決することを目指す独創的な研究である。

具体的には、ナノフォトニックデバイス、ナノ光加工、ナノフォトニックシステムに関して、さまざまな斬新なアイデアの創出と原理的実証実験の成功など、優れた成果が出始めている。これらは、国内外に類を見ないものであり、世界をリードする研究となっている。国際誌を中心とした数多くの学術発表に加え、応用も視野に入れた研究も進めて成果を出していることは高く評価出来る。本課題の目標であるデバイスの雛形実現とシステムとしての質的変革の実証が達成されることによって、近接場光の新しい可能性を示し、従来技術のブレークスルーとなることを期待する。一方、産業技術としてはいまだ未成熟であり、産業応用としての出口とそれにいたる経路がまだ明確に示されていない状況である。論理素子について言えば、理論上の完備性は有していても、多段に演算回路を構成したときの技術上の課題を加工プロセスの問題も含めて示していくべきであろう。システム応用については解決すべき問題はさらに多い。研究期間の後半において、産業応用への展開を見込めるような成果につなげることを期待したい。