

ナノフォトニクスによる超高集積光ノード技術の研究 (031103008)

Ultra high-density optical nodes using nanophotonic

大津 元一 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻

Motoichi Ohtsu Department of Electronics Engineering, The University of Tokyo

宮崎 哲弥 成瀬 誠

Tetsuya Miyazaki Makoto Naruse

情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター 超高速フォトニックネットワークグループ

National Institute of Information and Communications Technology

研究期間 平成 15 年度～平成 17 年度

概要

本研究の目的はナノフォトニクスを用いた光ノードのシステムアーキテクチャの提案、宛先検索等の情報処理機能・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である。これらの目的に対し、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研究を行った。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・検証実験に成功し、さらに 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。これらの成果は、超高集積光ノードの実用に必要不可欠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、実用的半導体量子ドットにおける実験の実証も実現されるなど、さらに大きな成果に到達することができた。

Abstract

The purpose of this research is to obtain the system architecture for an ultra-high density optical node based on nanophotonics. Accordingly, we have investigated critical sub-systems for optical node functions such as label processing or table-lookup, logical processing, and interconnections. We have proposed and experimentally verified nanophotonic ultra-high density content addressing architecture, nanophotonic broadcasting system, and nanophotonic logic gates. Also, we have successfully demonstrated a nanophotonic NOT gate using III-V group semiconductor quantum dots, which is a verification of nanophotonic systems based on promising technologies for the practical realization. These are indispensable fundamental technologies in the future ultra-high density and ultra-low power optical node functions.

1. まえがき

西暦 2010～15 年の高度情報化・高度福祉化社会は光情報通信、光情報記録、光情報表示、光情報入出力のシステムの高度化を強く要求している。このシステムを支える光交換機の光スイッチアレイの入出力チャンネル数も現在の 100 倍以上となる。このような多数の光スイッチからなるアレイをシステムに組み込む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、それらを集積化して超低消費電力化する必要がある。最近ナノテクノロジーを駆使し、ナノ寸法物質を多数使い、通常の伝搬光を情報キャリアとして使って動作する光デバイスも現れている。これは既存の光デバイスの性能にくらべ優れているものの、伝搬光を使っている限りデバイス寸法の下限は回折限界によって制限され、光波長以下にはならない。従って将来システムを支える高集積度は原理的に不可能である。言い換えると、ナノテクノロジー技術によりナノ寸法物質を作ったとしても、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、2015 年の光情報通信システムを支える光デバイスを実現するには光技術のパラダイムシフトが不可欠である。本研究ではナノフォトニクスにもとづく光ノードシステムの革新的展開を目指し、超高集積システムのアーキテクチャを探求するとともに、その基本機能を実証することにより、ナノフォトニクスによる情報処理によって情報通信システムとしての新しいパラダイムを構築することを目的とする。

2. 研究内容及び成果

ナノフォトニック CAM アーキテクチャの実証

ナノフォトニクスの特徴を生かした超高集積光宛先検索アーキテクチャを提案するとともに実験的に実証した。光パケットスイッチング等におけるヘッダーのマッチング処理は Content Addressable Memory (CAM) と呼ばれるアーキテクチャに属する。ここで、CAM における照合演算は、複数の論理ゲートと論理ゲートの出力の和をとる和算回路と等価である。ナノフォトニクスの特徴、具体的には近接場光相互作用を用いた励起の移動機構に基づいて、適当なサイズの量子ドットの組み合わせによって構成されるナノフォトニック CAM デバイス構造を導いた。ここでは、複数のナノフォトニックスイッチに複数ビットの入力信号 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の出力 $a_i \cdot b_i$ が Optical Nanofountain 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ベクトル $A=(a_1,\dots,a_M)$ とベクトル $B=(b_1,\dots,b_M)$ の一致度を判定できる。

図 1 は宛先検索デバイスの出力光強度分布である。図 2 に出力信号のスペクトルを示す。入力信号が 1 個の場合 (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 個および 3 個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ナノフォトニック CAM が動作することが実証された。

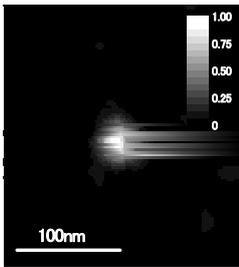


図1 ナノフォトニック CAM からの出力

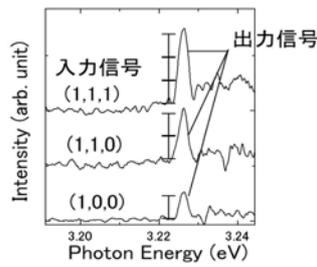


図2 各入力信号パターンに対する出力信号強度

Broadcast 型インターコネクットの設計と実証

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数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重大な制約要因となる。前記のCAM、より一般にはメモリベースアーキテクチャと呼ばれる構造を有するシステム全般においては、「(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) 機構が重要となる。我々は、(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、その原理実験に成功した。

ナノフォトニック NOT ゲート

これまで実証実験に用いてきた CuCl 量子ドットは大きな振動子強度を有し作成も比較的容易であるため、光ノードシステムの基本原理確認には最適とも言える試料であるが、他方で、極低温環境や紫外光を必要とするなど実用には全く適していなかった。そこで、実用にも耐え得るシステムとして AlGaAs 量子ドットの構造の応用を試みた。AlGaAs 量子ドットでは作製に MBE 法等を駆使することで、量子ドットのサイズや位置の制御性を飛躍的に向上できる可能性があるほか、化学的・物理的安定性に優れた室温動作も望めるなど実用に適している。これを用いて、論理の完備系実現に不可欠な要素である論理反転動作 (NOT ゲート) の動作実証を試みた。図3に実験結果を示す。デバイス寸法は 100 nm 程度であり回折限界以下で動作していることが分かる。制御パルス光を照射することにより、出力信号を反転動作させることに成功した。信号の変調度は約3%と現状では小さいが、試料の最適化によりさらに大きくできる。III-V 族化合物量子ドットは、これまでに非常に多くの研究によって多様な作製手法が知られており、さらに、ここで作製した構造は実用デバイスを実現するのに十分な完成度に達している。このことからナノフォトニックデバイスの実用的雛形が完成したと判断できる。実際、本研究の成果を産業界に技術移転すれば直ちにデバイス製造可能な段階に達したと考えられる。この成果は、ナノフォトニクスにおける演算の完備系の実証であるとともに、実用的デバイスによる実験の実証であり、将来に向けた極めて大きな前進と考えられる。

3. むすび

ナノフォトニクスを利用した新規アーキテクチャの探求に関し、上記のように多数の提案・原理実証に成功した。

この成果は世界的にも非常に高く評価されている。これらの結果は、当初目標であるナノフォトニクスによる光ノードのブレークスルーの原理実証に他ならない。また、ここで利用した原理は既存の光デバイスとは根本的に異なっており、デバイスのサイズ、集積度だけでなく、原理的に消費電力においても極めて大きな利点を有し、さらにはナノフォトニックメモリベースアーキテクチャの普遍性と併せて、これらの研究成果によって光情報通信システムの新しいパラダイム構築されたと言うことができ、当初目標を極めて高いレベルで達成されたと考えられる。

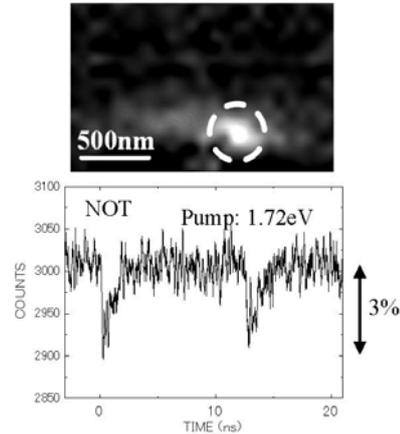


図3 NOT ゲート動作実験

【誌上发表リスト】

- [1] M. Naruse, et al., "Nanometric summation architecture using optical near-field interaction between quantum dots", *Optics Letters*, Vol. 30, No. 2, pp. 201-203 (2005. 1. 15).
- [2] M. Naruse, et al., "Nanophotonic computing based on optical near-field interactions between quantum dots", *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E88-C, pp.1817-1823 (2005.9).
- [3] M. Naruse, et al. "Optical interconnects based on optical far- and near-field interactions for high-density data broadcasting", *Opt. Express*, Vol. 14, pp. 306-313 (2006.1)

【申請特許リスト】

- [1] 成瀬 誠, 川添 忠, 大津元一, 光演算装置, 日本, 2004年7月7日
- [2] 大津元一, 川添忠, 成瀬誠, 「量子ドットを用いた光接続装置」, 日本, 2005/2/7
- [3] 大津元一, 川添忠, 量子ドット間のエネルギー移動を用いたナノ D/A コンバータ, 日本, 2004年3/19

【登録特許リスト】

- [1] 川添忠, 八井崇, 大津元一, 「ナノデバイスの作製方法及び装置」, 日本, 2002/10/11, 2005/9/30, 特許第3725113号

【受賞リスト】

- [1] 大津元一, 紫綬褒章, 2004.11.3
- [2] 大津元一, 井上春成賞, 2005.7.13

【報道発表リスト】

- [1] "Quantum Dots: Optical nanofountain concentrates light", *Laser Focus World*, 2005. 6
- [2] "光子子だけでデジタル論理回路を動作", *日経ナノビジネス*, 2004. 1
- [3] "ナノフォトニクス、回折限界を超えた光工学", *週間ナノテク* 2006/1/30