

通信と情報処理の新しいシステムができる

成瀬 誠

独立行政法人情報通信研究機構 超高速フォトニックネットワークグループ

naruse@nict.go.jp

光技術やナノテクノロジーの最近の目覚ましい進歩は、情報通信システムのこれまでの前提条件を覆すため、対応した新しいシステムアーキテクチャが必要になる。しかも、全く新しい応用の想定ないしはこれまでの膨大なアーキテクチャ資産の更新を合意させ得る合理性と魅力を備える必要もある。シリコン VLSI をベースとするコンピュータシステムはメモリとプロセッサが分離されたフォンノイマンアーキテクチャをベースとし、古典的な光コンピューティングはフーリエ光学を基礎としていた。ではナノフォトニクス[1]に適するアーキテクチャはなにか。

具体的考察対象としてネットワーク用途を考える。大量の演算が必要になるネットワークのノード等では、光領域で一定の機能的機構を備えることでシステム全体の性能を飛躍的に高めることが期待され、例えばパケットスイッチングの全光化も精力的に研究されている。しかし様々な困難な技術課題が存在し、例えばパケットのヘッダーとの照合演算に用いられる既存の導波路デバイスは、回折限界に支配されることから集積性や機能性において厳しい制約がある。一方でナノフォトニクスでは回折限界が存在しないため、結果として得られる高集積性故にこれらの重要課題を解決する可能性を有すると考えられる。

そこでまず、ナノフォトニクスの超高集積性に着目することで、メモリベースアーキテクチャをナノフォトニクスシステムの基礎として想定できる。すなわち、ルーティングテーブル等の膨大なデータベース情報を量子ドットのサイズや位置情報としてナノフォトニクスデバイスに格納し、かつ、マッチングに必要なコンピュータシオン機構もそれぞれのメモリに付随させることで検索処理を超並列に実行する構造である。

このときキーとなる原理のひとつは、複数ビットにわたるデータを集める機構である。すなわちナノフォトニクスにおける物理的にはローカルな動作原理を用いながら、機能的にはグローバルな振る舞いを実現することが必要になる。ナノフォトニクスによる量子ドット間の共鳴現象を用いて、量子ドットのサイズと位置を適切に構成すれば、データを所定の位置へ移動させることが可能になる[1][2]。結果として、従来の光学的手法における集積度の問題を解消するとともに、宛先検索専用の Content Addressable Memory (CAM) VLSI に比べてエネルギー的にも優位性が期待される。実際には検索用途ばかりでなく、行列ベクトル演算として整理される様々な応用が上記のアーキテクチャで実現可能と考えられ、例えばデジタルアナログコンバータも実験的に示されている[3]。また、メモリと演算機能を局所化したアーキテクチャは、既存のノイマン型アーキテクチャの重大な問題の一つであるインターコネクトの問題の

軽減にも関連させられる。

さらに一般のコンピューテーション用途に対しては、メモリベースアーキテクチャの他にも、例えば近接場光を介した励起移動型デバイスを基本要素とすることで、シリコン VLSI における消費電力密度などの問題を補完するシナリオも検討可能となる。励起の移動方向を制御できる基本要素デバイスができれば、fan-out を常に 1 としつつ任意の組み合わせ論理演算を実行できる[4]。その他、共鳴準位や量子ドットの配置の制御[5]によって励起を一定時間保持するバッファリング機能なども提案されており、光バッファ等への展開も興味深い。

謝辞：日頃よりご議論頂く東京大学大津教授はじめ SORST ナノフォトニクスチーム各位並びに NICT 超高速フォトニックネットワークグループ各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) M. Ohtsu et al., “Nanophotonics: design, fabrication, and operation of nanometric devices using optical near fields,” IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. **8**, 839 (2002).
- 2) M. Naruse et al., “Nanometric summation architecture using optical near-field interaction between quantum dots,” Optics Letters, to appear.
- 3) T. Kawazoe et al., “Optical nano-D/A converter using optical near-field energy transfer among quantum dots,” Extended Abstracts of the 51st Spring Meeting of The Japan Society of Applied Physics and Related Societies (2004), p. 1311. (in Japanese)
- 4) たとえば S. B. Akers, “Binary decision diagram,” IEEE Trans. Comput. **C-27** 509 (1978).
- 5) S. Sangu et al., “Logic and functional operations using a near-field optically coupled quantum-dot system,” Phys. Rev. B **69**, 115334 (2004).



成瀬 誠

独立行政法人情報通信研究機構超高速フォトニックネットワークグループ主任研究員。1994年東京大学工学部卒。1999年同大学院工学系研究科計数工学専攻修了。博士(工学)。日本学術振興会リサーチ・アソシエート、東京大学助手を経て2002年独立行政法人通信総合研究所(現情報通信研究機構)入所。新しい光技術を踏まえたシステムアーキテクチャとその実証的アプローチに興味を持つ。2001年よりJST さきがけプログラム「情報基盤と利用環境」領域兼務。

Architectural approach to nanophotonics for communication and information processing applications

Makoto Naruse

Ultrafast Photonic Network Group

National Institute of Information and Communications Technology (NICT)

naruse@nict.go.jp

Recent physical layer innovations in photonic systems have allowed various new architectures to be implemented. These new architectures require new applications, or need to have rational reasons to replace conventional architectures. Therefore, given that conventional silicon computing systems are based on the Von Neuman architecture and many first-generation optical computing systems were based on Fourier optics, what is a suitable fundamental underlying architecture for nanophotonics [1]?

As a first example, we consider a network application. A massive amount of traffic must be processed at the nodes in modern-day networks. Performing a certain amount of this processing in the optical domain is expected to enhance the overall system performance in terms of total power dissipation and throughput. In this regard, so-called optical packet and label switching have been thoroughly investigated. However, many technological difficulties remain to be overcome; one of the serious problems is the integrability of optical hardware. For instance, optical waveguides have been proposed to perform packet or label recognition; however, they are essentially limited by the diffraction limit of light, which severely limits the overall capability. On the other hand, nanophotonics goes well beyond the diffraction limit of light, and the resultant high-density may be advantageously applied to solve integration issues.

To this end, nanophotonic systems utilizing a memory-based architecture may be promising. For example, a huge amount of lookup-table (routing table) data can be recorded in nanophotonic devices by configuring the size and positions of quantum dots, as well as individually implementing required logical operation mechanisms for each entry.

One of the key principles needed for such applications is a data gathering mechanism, in which “functionally global” behavior is required, even though the principle of nanophotonics is inherently “physically local” [2]. Here, by appropriately using resonant energy levels between quantum dots, excitations can be transferred from one dot to another. (This has been experimentally demonstrated.) In addition to the density merit, the nanophotonic approach will outperform, in terms of power, electronic VLSI-based content addressable memory (CAM), an energy and estate greedy architecture.

Although memory-based approaches may be applicable to a more general class of computational applications, there may be other possible architectures for overcoming or

complementing present technologies. For example, if a nanophotonic device that controls the direction of excitation were available, arbitrary combinational logic could be realized with a constant fan-out of 1 [3]. Also, if we could precisely configure energy levels and the spatial position of individual quantum dots, the functional behavior could be reconfigured [4], thus allowing excitation-buffering mechanisms. Optical buffering is a critically important subject for today's optical communications technology. This is another interesting application of nanophotonics.

Acknowledgement: The author thanks Professor M. Ohtsu of the University of Tokyo, all members of the SORST nanophotonics project, and colleagues in NICT for fruitful discussions.

References

- 1) M. Ohtsu et al., "Nanophotonics: design, fabrication, and operation of nanometric devices using optical near fields," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 8, 839 (2002).
- 2) M. Naruse et al., "Nanometric summation architecture using optical near-field interaction between quantum dots," *Optics Letters*, to appear.
- 3) For example, S. B. Akers, "Binary decision diagram," *IEEE Trans. Comput.* C-27 509 (1978).
- 4) S. Sangu et al., "Logic and functional operations using a near-field optically coupled quantum-dot system," *Phys. Rev. B* 69, 115334 (2004).



Makoto Naruse (Dr. Eng.)

Senior Researcher at the National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Tokyo, Japan. He received the B.E., M.E., and Dr. Eng. degrees from the University of Tokyo, Tokyo, Japan, in 1994, 1996, and 1999, respectively. He was a postdoctoral researcher of the Japan Society for the Promotion of Science from 1999 to 2000. From 2000 to 2002, he was a research associate at the University of Tokyo. In 2002, he joined the Ultrafast Photonic Network Group of the Communications Research Laboratory (currently NICT), Tokyo, Japan, where he is currently engaged in applications, systems, and architectures using novel optical devices.