

近接場光相互作用ではじまる光システムの新展開

成瀬 誠^{1), 2)}

独立行政法人情報通信研究機構¹⁾, 東京大学大学院工学系研究科²⁾

E-mail: naruse@nict.go.jp

1. はじめに

波長以下のナノスケールで展開されるナノフォトニクスは、微細加工技術に代表される近年の実現技術の高度化とも結びつき、とりわけ光の回折限界打破のキーテクノロジーとして実用的意義が高まっているが、システムから見たナノフォトニクスには、回折限界を超えた集積性の高さに加えて、注目すべき様々な特徴が存在し、従来の光システムの基本原理や設計思想を根底から考え直す必要に迫られていると考えられる。本発表では、近接場光相互作用による光励起移動や階層性を切り口に、近接場光相互作用に基づく情報処理やシステムの実現技術の一部を概説するとともに、従来の光技術や電子技術との差異を踏まえつつ、近接場光相互作用ではじまる光システムの新展開を議論する。

2. 近接場光相互作用による光励起移動と集積性・耐タンパー性

近接するナノ構造間の近接場光による相互作用を用いて、特定の量子ドットへ信号（光励起）を移すことができる。例えば大きさが a の量子ドットと大きさが $\sqrt{2}a$ の量子ドットの間には共鳴エネルギー準位が存在し、この共鳴レベルを介して、小さなドットに発生した信号は大きなドットへ移動することができる¹⁾（図1）。近接場における急峻な電場勾配により、通常は光学禁制な準位（例えば大きさが $\sqrt{2}a$ の量子ドットの(2, 1, 1)）への移動も許容される。また、信号の一方方向性はサイズ大の量子ドットにおけるサブレベル緩和によって確定する。上記の光励起移動の組み合わせによって、高集積で低消費電力な基本論理ゲート機能¹⁾、超並列システムの基本要素となるデータの和算機構、ブロードキャスト機能²⁾などが実証されている。

ここにおいて、近接場光相互作用の意義は、超回折限界や省電性などの量的基軸における優位性のみならず、信号の伝送過程そのものの物理的性質に直接的に指摘できることにも注意する必要がある。例えば、前記のように信号の一方方向性は量子ドットにおけるサブレベル緩和過程によって確定するが、このことはデバイスのセキュリティー性とも密接に関連する。既存の電子デバイスは、マクロ系での負荷における散逸や電源との電気配線を必要とすることから、電力消費のモニタのみによる内部動作の推測など、いわゆるサイドチャンネル攻撃³⁾が原理的に許容されて

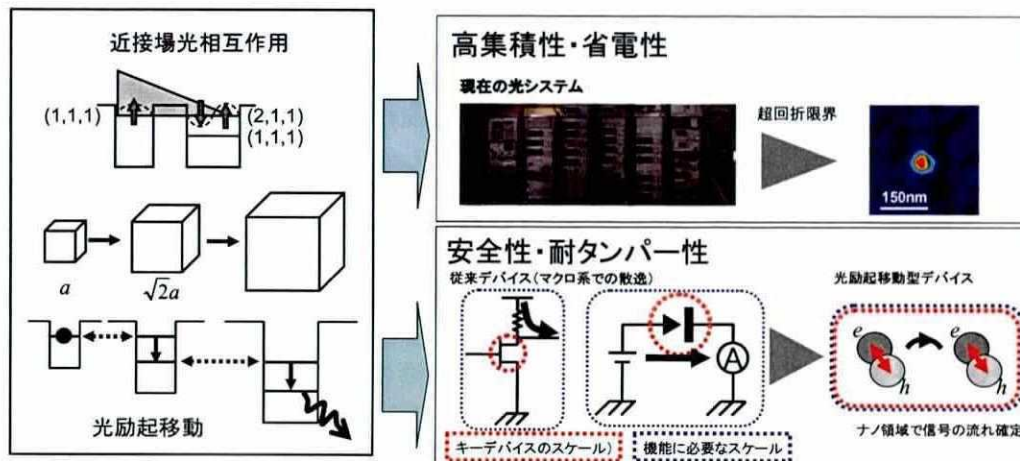


図1 近接場光相互作用による光励起移動とその機能性
(高集積性・省電性・耐タンパー性)

しまう。これに対し光励起移動型デバイスにおける信号傍受には、サブレベル緩和(物質の格子振動との相互作用)の計測が必要であり、これは一般には技術的に極めて困難と考えられる。このように、近接場光相互作用はデバイスの耐タンパー性に代表される安全性において、原理的に新規で強固な機構を提供できると指摘でき、新たなセキュリティー応用が示唆される。

3. 近接場光相互作用の階層性とその機能性

3.1 階層的メモリ, 階層的インターコネクション

近接場光相互作用が示すスケール依存性(階層性)は、システムの立場からは、マクロ世界とナノ世界を接続するインターコネクションの実現において鍵となる属性と指摘できるほか、光励起移動に基づくシステムと電子の移動に基づく電子システムの原理的差異の一つでもあり、また、直接的に機能システムとして利活用することもできる(図2(a))。

例えば、双極子間相互作用のスケール依存性を用いて、同一のナノ構造体に対し、これを密に(高解像度で)観測したときは詳細情報が、疎に(低解像度で)観測したときは概要情報の読み出しを可能とする階層型メモリシステムが実証されている⁴⁾。

さらに、分極配置を工夫すれば、近接場光相互作用の階層性のバリエーションは大いに膨らむ。このことは、近接場光のアンギュラー・スペクトル展開⁵⁾によって明示的に示される。例えば、図2(b)(c)のように4個の電気双極子($d_1 \sim d_4$)を配置したとき、電気双極子に近接した点 A_1 及び A_2 におけるアンギュラー・スペクトルは空間周波数に対して振動する。すなわち、当該位置における電場の大きさは小さい(「レイヤー1」において信号レベル「0」)。一方、電気双極子に対して一定程度離れた点 B におけるアンギュラー・スペクトルはある空間周波数においてピークを示し、したがって点 B 付近における電場強度の存在を示す(「レイヤー2」において信号レベル「1」)。すなわち、近傍においては「0」で、遠隔では「1」となり、これは「平均化されない疎視化」の実現を示している。同様に、図2(d)の例では、近傍において「1」、遠隔において「0」となる例が示されている。このような近接場光相互作用の階層的性質は、より一般には光学的相関の制御問題に結びつくことから、さらなる機能性への展開が期待される。

3.2 局所的エネルギー散逸: 痕跡メモリ

上記の階層的性質に、近接場光相互作用によって生じる局所的エネルギー散逸機構を併せることで、メモリアクセスのイベント自体を痕跡として記録する機能を具備した痕跡光メモリシステムが示されている⁶⁾。金属ナノ構造における電場増強や量子ドットにおける光励起移動を用いて局所的なエネルギー散逸状況を構成することで、メモリアクセスの痕跡記録の原理とすることができる。同時に、デジタルデータの読み出し階層において所望のシステム応答を示すようにナノ構造を設計することで、データ再生機能を併せて実現できる。

図3は三角形型の金のナノ構造を単位要素とし、これを同じ向きに配列したペア(Shape (I))をデジタルデータ「1」、逆向きに配列したペア(Shape (II))をデジタルデータ「0」と対応づけた例を示す。双方の形状とも、三角形要素の頂角近傍では強い電場増強を示しているが(Layer 1)、遠方では全体の形状に依存して異なる信号を示す(Layer 2)ことが分かる。このような痕跡記録機能は、情報の機密性保証やデジタルデータの利用・流通における権利等の保証(digital right management (DRM))などの応用における、物理的な基本原理としての展開が期待される。

4. おわりに

近接場光相互作用による光励起移動と階層性に着目し、現在までに実証されているシステム原理例を示した。今後は、機能部材、セキュリティー、バイオ関連など実際の応用に向けた進展と、ナノ領域での光システムに関する原理的考察が、実現技術の高度化と結びつきながら益々拡がり深化するものと思われる。

謝辞

日頃よりご議論いただく東京大学大津元一教授、科学技術振興機構川添忠研究員、八井崇研究

員，山梨大学堀裕和教授，山梨産技大井上哲也主任，NICT 宮崎哲弥グループリーダー他関連各位に感謝いたします。

付記

東京大学では，このような近接場光相互作用を生かした新原理や新技術のさらなる展開を目指して，産学連携研究や人材育成のプログラムが行われています⁷⁾。ご興味を持たれた皆様には是非ともご自由にご連絡を頂ければ幸いです。

参考文献

- 1) 大津元一，小林潔：ナノフォトニクス基礎（オーム社，東京 2006）
- 2) M. Naruse, T. Kawazoe, S. Sangu, K. Kobayashi, and M. Ohtsu, *Opt. Exp.* **14**, 306 (2006)
- 3) <http://www.cryptography.com/resources/whitepapers/DPATechInfo.pdf> など
- 4) M. Naruse, T. Yatsui, W. Nomura, N. Hirose, and M. Ohtsu, *Opt. Exp.* **13**, 9265 (2005)
- 5) 堀裕和，井上哲也：ナノスケールの光学（オーム社，東京 2006）
- 6) M. Naruse, T. Yatsui, T. Kawazoe, Y. Akao, and M. Ohtsu, “Nanophotonic traceable memory based on energy localization and hierarchy of optical near-fields,” 2006 Sixth IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE NANO 2006)
- 7) 「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) <http://uuu.t.u-tokyo.ac.jp/>

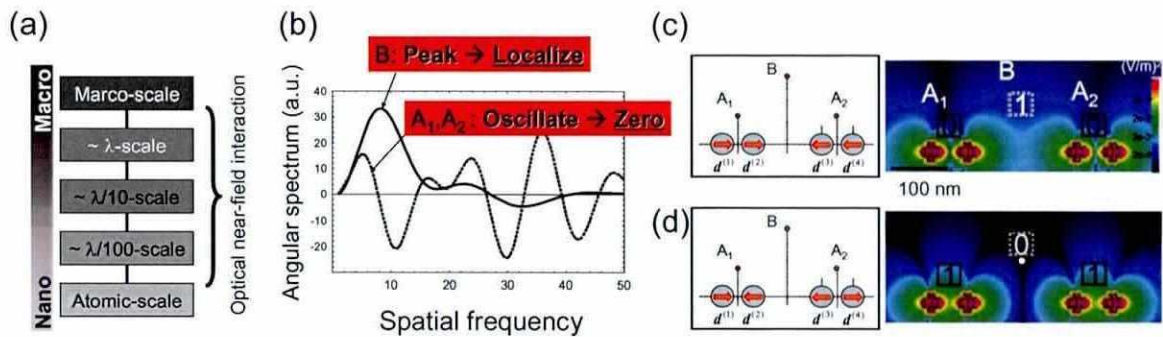


図2 近接場光相互作用の階層性とその機能性

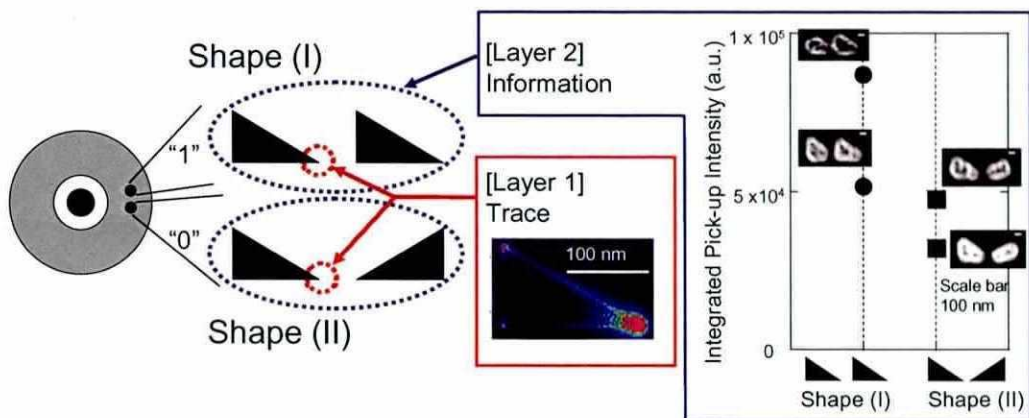


図3 近接場光による局所エネルギー的散逸とその機能性(痕跡記録メモリ)