ナノフォトニクス新しい展開 Development and future of nanophotonics

堀 裕和 (山梨大学)

Hirokazu Hori (University of Yamanashi)

光科学を電磁相互作用の観点から捕らえ直すナノフォトニクスは、ナノメートル領域の物質加工技術とともに発展し、ナノメートル領域の新しい機能計測技術、物質操作技術、物質加工技術を創出しつつ、光科学の領域を光波の回折限界を超えた領域に拡張すると同時に、あらゆる電子系の電磁相互作用を、信号伝送あるいは励起輸送の機能のもとに解析し、これを用いて新機能素子やシステムを開拓する領域にまで展開している。現在、ナノフォトニクスの領域には、光波の干渉等を極限まで制御し、これとナノメートルサイズの電子系との相互作用を探索する科学技術や、ナノ構造物質の光学特性をマクロに見たとき現れるさまざまなナノ構造起因の特色を研究する分野も含まれているが、ここではナノフォトニクスを、「物質電子系と結合した近接場光による、光領域の電磁相互作用を介しての物質間の光励起輸送を基礎として、光と物質の結合が多様な科学技術を創生する科学技術の分野」と位置づけ、これに関する最近の展開と将来への展望を行いたい。

ナノテクノロジーの目指すものは何か？

近接場光を使いこなすことで、光はナノテクノロジーの最も重要な要素のひとつとなった。現代のテクノロジーによって微細加工された物質が、近接場光をナノメートルの空間に保持することを可能にし、

その近接場光はナノメートルサイズの物質を計測、操作、加工することで新しいナノデバイスを生みだし、そこでは近接場光が信号伝達の担い手として活躍することによって初めて可能となる新機能が展開する。ナノフォトニクスこのような新領域である。さまざまな光技術の展開の中で、近接場光がどのような際立った性質を持ち、それがどのように新時代の科学技術を支えるナノフォトニクスを生み出しつつあるのかを、もっとも基礎的なところから展望することは有意義である。実際、ナノフォトニクスは、光波長より遥かに小さいナノメートルスケールの科学技術であり、光領域の電磁相互作用をその狭い空間において際立たせ、その特異な性質を多種多様に使いこなして、これまでになかった新機能を持つ計測、操作、加工の技術と、新時代の要請に応える、超高密度集積化、超低エネルギー消費などの特徴を併せ持つデバイスを実現するものである。従来の光学過程の中に埋め込まれていた、ナノスケールの現象を、さまざまな切り口から掘り起こすことが、極めてバラエティーに富んだ応用をもたらしている。本講演では、多様なナノフォトニクスの重要な素過程について報告し、最新の応用技術の展望を行う。

ここではまず、主用概念となる、電磁相互作用、近接場光計測、ナノ光電子デバイスの構成について、簡単に要点を述べる。

光の電磁波の性質を活用する従来の光学では、波長程度の空間的寸法を回折限界と呼び、ミクロな方の応用の限界と考えた。しかし、光は、物質同士の電磁相互作用の担い手という性質こそが、光の最も基本的な性質である。光波長より小さい物体にも光相互作用があり、ちょうどナノメートルで測るあたりに、物質としては離れているのに、近接場光を通じて相互作用するという、おもしろい領域がある。ナノメートルを自由に操る道具建てが整って、電磁相互作用に関する膨大な知識の蓄えが、近接場光の科学技術を爆発的に発展させた。

光近接場の測定は、遠くからは見えない電磁相互作用そのものを測るので、系にプローブとなる微小

物体を付け加えて光学応答の変化を測る。プローブ粒子の大きさおよび光学応答と、それをどこまで近づけるかが、何が見えるかを定める。測定とはあるものをあるがままに測るものだという古典的観念に囚われていては理解しにくい。実際、測定結果の解析は、どういうプローブを入れたかに依存するから、何をしたいからそういうプローブを入れたのかを明確にしておく必要がある。解釈にゆるぎなしという古典計測とは一線を画し、本質的に不確定性を含む量子計測とも異なり、近接場光の計測はまさにメソスコピックな領域にある。

光相互作用・光学応答における階層構造の創出

近接場光を理解するためには、現象に主に関係ある部分と、それほど関係ない部分の仕分けをすることが重要である。ナノフォトニクスでも、系全体を厳密に捉えれば、必ず、光源と検出器があり、マクロな空間を含んで完結する。しかしそれをみな対等に扱ってはいは、ナノフォトニクスを理解しナノテクノロジーにすることができない。関係ある部分と関係ない部分の切り分け、粗視化とその階層構造を理解することが重要になる。近接場光学では、その多機能性・多様性を活用して、簡便な近似やモデルによって結果が解析できるように、あらかじめ系を仕組んでおくことが鍵となる。

発想の転換

配線型デバイスから励起輸送デバイスへ

通常の電子デバイスでは、電磁相互作用の両端にある物質、つまり電子系の方を見て、電気信号を伝えたり増幅したりしていると考えがちであるが、実際の電子デバイスの機能は電気信号の操作にあり、電子の動きそのものではなく、電磁相互作用が電磁エネルギーの流れをもたらすことにある。それゆえ、トランジスタも、電源と負荷との特定の組み合わせでのみ、信号伝達や制御、増幅の機能を果たす。このように考えると、光と物質電子系の相互作用は、あらわに出てこないところでも主要な役割を果たしており、ナノテクノロジーでは、相互作用を中心に据えた考察が重要になってくる。光学と電子物性の融合が、近接場光とナノフォトニクスの本質である。

ナノ光電子デバイスの最も重要な性質は、ナノメートルスケールでも明確な、近接場光相互作用による物質間の励起移動を、信号・情報伝達に利用するということである。電磁場環境が物質の振る舞いを支配する量子電磁力学的効果と、物質環境が光の性質を変える近接場効果が、二つの重要な基本概念であり、量子コヒーレンスと散逸が、それぞれ系の新機能と信号伝達を支配する素過程となる。これらをどのように組み合わせて用いるかが、ナノデバイス設計の最も重要な課題となる。ナノフォトニクスでは、その制御にも、スケールに応じて異なる様相を見せる、近接場光相互作用を利用できる。

参考文献

1. “ナノ光工学ハンドブック”，大津 元一，河田 聡，堀 裕和 編，浅倉書店，2002.
2. “Near-Field Nano-Optics”，M. Ohtsu and H. Hori, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999.
3. “ナノテクノロジーにおける光と物性の融合”，堀 裕和，応用物理，vol.70, no.8, 2001, pp976-983.
4. “Electronic and electromagnetic properties in nanometer scales”，M. Ohtsu ed. *Optical and electronic processes of nano-matters*, KTK Scientific Publishers, Tokyo, 2000, pp.1-55.
5. “Quantization of evanescent electromagnetic waves based on detector modes”，T. Inoue and H. Hori, Phys Rev. A, vol.63, 2001, pp. 063805- 1-16.
6. “Quantum theory of radiation in optical near-field based on quantization of evanescent electromagnetic waves using detector mode”，Prog. Nano-Electro-Optics, vol.4, 2004, pp127-199.
7. “ナノスケールの光学”，堀裕和，井上 哲也，オーム社，2006.