

フジサンケイ ビジネスアイ賞

ナノ寸法の光を用いたナノフォトニック  
セキュリティの研究開発

- 1: 独立行政法人情報通信研究機構 光ネットワーク研究所
- 2: 東京大学大学院 工学系研究科
- 3: 大日本印刷株式会社
- 4: 横浜国立大学大学院 環境情報研究院

成瀬 誠<sup>1</sup> 豎 直也<sup>2</sup> 関根 陽子<sup>3</sup> 大八木 康之<sup>3</sup>  
法元 盛久<sup>3</sup> 松本 勉<sup>4</sup> 大津 元一<sup>2</sup>

# 1. 序 論

本研究は、ナノメートル(1億分の1メートル)寸法の極微世界における光の技術(ナノフォトニクス)を用いて、従来の光技術の限界である回折限界を打破すると同時に、従来の光技術との共存も可能とさせるべく、ナノ領域における物質の寸法・形状制御と「近接場光」によって、新たなセキュリティ階層を実現するという斬新な基盤技術(ナノフォトニックセキュリティ技術)を構築し、微細加工技術とナノフォトニクス実験技術を駆使して実証し、飛躍的にセキュリティ機能・性能を向上させた新たな光セキュリティ技術を創成したという内容である [1-11]。これにより社会経済・生活の根幹にある情報資源を偽造者等の攻撃から守るなどの安心・安全に貢献し、また、大量のモノとモノがつながる今後のより一層大規模な情報ネットワーク社会の安心・安全の確立に貢献する。

## ナノフォトニクスにより従来の光セキュリティの限界を打ち破る

我々は、従来の全ての光技術が依拠してきた伝搬光の限界を打ち破り、新規な機能を実現するナノフォトニクスを理論・実験の両面から構築してきた。媒体中を伝搬する光(伝搬光)は回折現象のため、光の波長程度(可視光で400 nm ~ 700 nm 程度)より微小化できず、機能集積の観点から大きな限界を抱えている。そのためナノ寸法における光セキュリティにも全く手がつけられていなかった。

そこで我々が世界に先駆けて着想し実証してきたのが、物質表面近傍に存在する「近接場光」

に基づくセキュリティ技術である。図1右上に近接場光の模式図を示す。スマートフォンの爆発的普及はもちろんのこと、Internet of Things(IoT)社会の到来により大量のモノとモノがつながる世界において、人工物のセキュリティはますます重要となると考えられ、ナノフォトニクスによりその解決を目指す。このような概念に基づく本研究のアプローチを図1に示す。

## 従来の光セキュリティの限界と重要性高まる物理セキュリティ

従来の代表的な光セキュリティにホログラムがある。ホログラムは、3次元物体の反射または透過光と参照光を干渉させ作製し、参照光を照射すると物体の3次元像が再生される。こうした特性は偽造防止やブランド・プロテクション技術の一つとして、紙幣・クレジットカード・電池等に広く利用され、また意匠性の良さからセールスプロモーション等でも広く

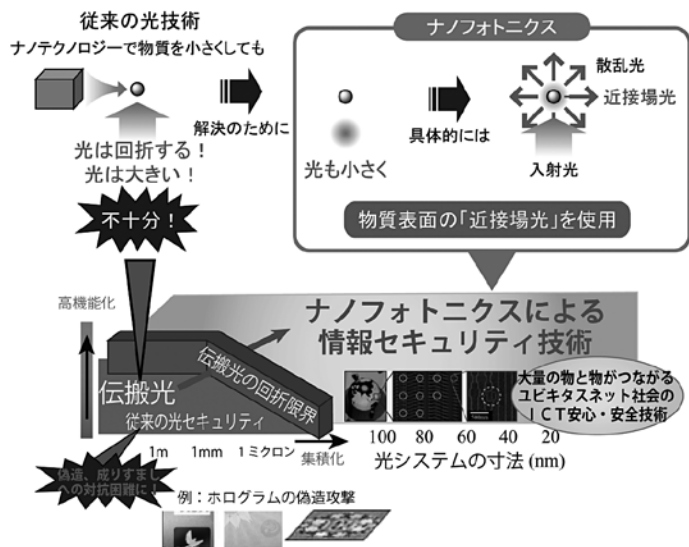


図1: 本研究のアプローチ.

利用されている(図1左下)。本研究に関わる大日本印刷(株)は、同社の有する高度な微細加工技術に基づき微細な凹凸構造により実現する優れたエンボスホログラム技術を有する。前述のようにホログラムは人間への訴求力、視認性に優れるため、人が簡単に認識可能なセキュリティ(オバートセキュリティと呼ばれる)の代表例でもある。日常的な安心・安全の確保、不安の軽減に対して大きく貢献してきた。しかし昨今では、攻撃者の能力も高まり、ホログラムですら偽造されるケースも散見されるようになり、安心・安全の確保のため耐クロロン性をより一層高める必要性が高まっている[12]。また、光を用いたセキュリティはホログラム以外にも多様な提案がこれまでになされてきた[13,14]。しかし、既存のすべての光セキュリティ技術は伝搬光の物理[15]を基礎とするため前述の光の回折現象のような基本的限界を超えることが原理的にできない。

また、情報セキュリティは情報化社会のあらゆる局面で重要性が高まっているが、本研究に関わる文脈で特筆すべき内容の一つに、モバイルデバイスの大量普及等を受け、モノの信用に関わる機能が改めて課題となっていることが挙げられる。たとえば、動作保障がされていないバッテリー(uncertified battery)による携帯電話の爆発事故[16]などが問題となっている。ユビキタス化の全地球的加速は、類似の物理セキュリティ課題を孕んでいる。

### ナノフォトニクスに固有の特徴：近接相互作用に基づいたセキュリティ機能の構築

そこで我々は「ナノフォトニクス」の原理によって安全性を飛躍的に高める光セキュリティの実現に世界に先駆けて着手し、特に我々が創始した「近接場光の階層性」をホログラムに適応するなどの斬新なアイデアを示し実証してきた。近接場光の階層性の概念図を図2中に示す。前述のように近接場光とは物質表面近傍に局在した光だが、図2のように当該物質の寸法に対応して近接場光の存在領域の寸法の大きさは階層的性質を有する[1-3]。

そのため、当該領域に存在する近接場光を検出するには、対象とする近接場光と同等の寸法を有する読取り装置(以下、Reader(リーダ)と呼ぶ)を接近させる必要がある。このことは、「近接場光による相互作用が媒介することによって初めて生じる情報」をナノ寸法の構造体やリーダの相互作用によって付与できることを意味する[18]。例えば、一目では検出できない手段を介して情報を組み込む技術は一般にコバートセキュリティと呼ばれるが、コバートセキュリティを近接場光によって実現することができる。

このようなナノフォトニクスの著しい特徴を活用し、従来の光セキュリティの課題を克服したナノフォトニックセキュリティと呼べる新たな原理の構築と実証を進めてきた。本稿は2個の実現例によってナノフォトニックセキュリティの基本原則と実現技術を示す。まず2節でオバートセキュリティとしてのホログラムと近接場光によってのみアクセス可能なコバートセキュリティを共存させた「階層型ホログラム」を示す[1,6,8]。3節で近接場光を利用した「ロック & キー」システム、すなわち正しい鍵と鍵穴がマッチしたときのみ扉が開く(出力信号がオンとなる)システムを示す[4,7]。これらの研究では、ナノフォトニクスに固有の原理を活かすことはもちろんのこと、世界最高レベルの微細加工技術を初めとした日本の産業界のモノ作り技術[1,17]や、光科学から情報科学までの分野融合研究チームによる協業が研究開発の成功のポイントになっている。

## 2. 階層型ホログラム

1 節で述べたように従来の代表的な光セキュリティ技術のひとつであるホログラムは、偽造防止技術の一つとして紙幣・クレジットカード等に広く利用されているが、耐クローン性をより一層高めることが急務となっている。そこで我々は「近接場光の階層性」の原理をホログラムに応用した。図2に原理の概観を示す。

ホログラムの3次元像再生はホログラムの縞構造に依存

した回折現象として顕れる。一方、近接場光は物質表面近傍に局在した光である。したがって、ホログラムの3次元像を維持したまま、ナノの微小領域に新たな構造を組み込み、当該領域に近接場光が生じるようにできる。その上で、前述の近接場光の階層性の原理に従って、組み込んだナノ構造と同等の寸法を有するリーダーによって相互作用を生じさせ、それによって情報を読み出す。すなわち、「近接場光によってのみ読み出し可能な新たな情報」をナノ寸法の構造とリーダーの相互作用によって付与できる。上記の原理は、ホログラムの見た目の3次元像としてのオバートセキュリティと、近接場光を介して読み出すコバートセキュリティを共存させることになる。このうち、コバートセキュリティは極めて微細なナノ構造に依拠するため耐クローン性を向上させることに繋がっていると考えられるが、それ以上に顕著な特徴として、情報再生がリーダーとの相互作用に基づく点がある。すなわち攻撃者は

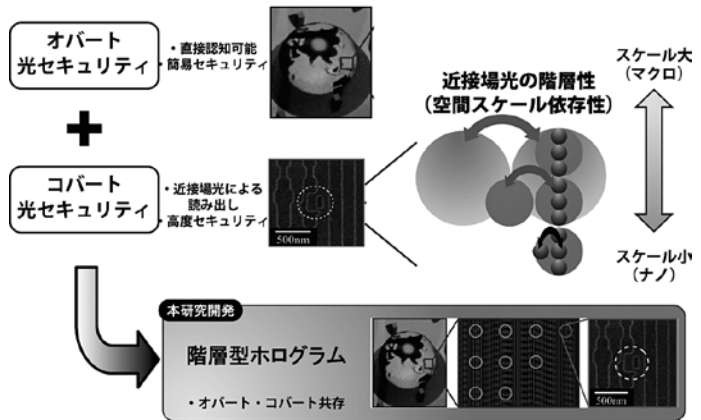


図2: 近接場光の階層性と階層型ホログラムの原理。

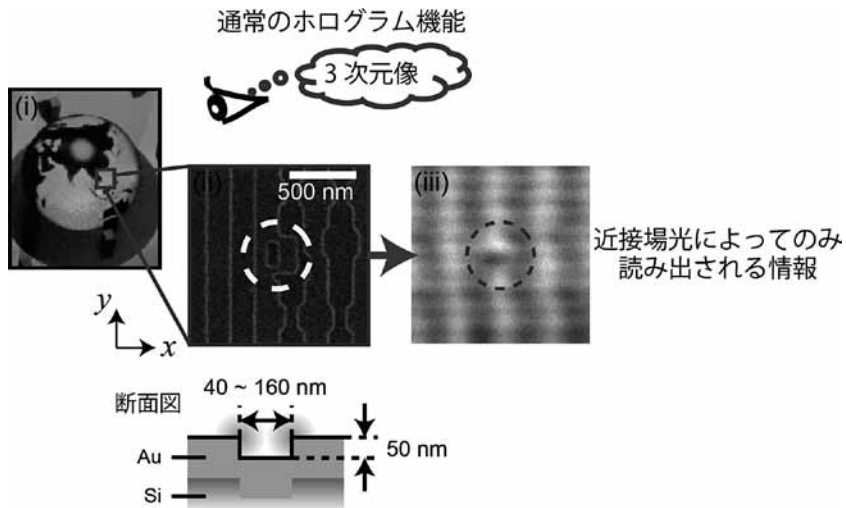


図3: 「階層型ホログラム」の実現。通常のコバート機能（見た目の3次元像）を維持しつつ、近接場光を媒介することによってのみ可能な情報再生を実現。

リーダーに関する情報推定が必要となり、攻撃視点から見てハードルがさらに上がっていることも特徴と言える。(なお、我々はこれを「相互作用利用型セキュリティ」として一般化し、それが備える構造的特徴を光科学や情報科学の原理的観点からも考察し研究を進展させている [18].)

上記のようなナノフォトニクスの特徴に基づいてオバートセキュリティとしてのホログラムと近接場光によってのみアクセス可能なコバートセキュリティを共存させた階層型ホログラムを実現した。階層型ホログラムの実現形態には少なくとも次の2通りがある。

一つは従来のホログラムの表面に新たなナノ構造の層を設ける方法である。文献[6]では従来のホログラムや回折格子の上に金の薄膜を蒸着し、そこにナノ構造を付与し伝搬光の回折効率を維持しながら近接場光による追加情報読み取りに成功している。

もう一つは、凹凸構造からなるホログラムの構造そのもののなかに、近接場光によって読み出すナノ構造を埋め込む方法である [1,8]。光リソグラフィーなどの既存のホログラム製造プロセスを全て維持したまま新たな機能を実現でき、また最先端技術における技術限界に相当する性能を最大限に活かすことができるというメリットの他に、以下のような特徴が産まれる。

図3(ii)のように1次元の縞構造からなるエンボスホログラムは、縦方向には形状がトポロジーとしては連結している。このなかに同図のように矩形型のナノ構造を埋め込むということは(図中の例では最小寸法 80 nm である)、当該箇所縦方向にトポロジーが切断された構造が生じることを意味する。したがって、このような金属構造に縦偏光の光が照射すると当該領域でのみ電荷の局在が起きる(誘電体の場合は分極の断絶)。一方、横方向には縦方向のグレーティング構造のため至るところで形状としては「断絶」が起きている。このことは、

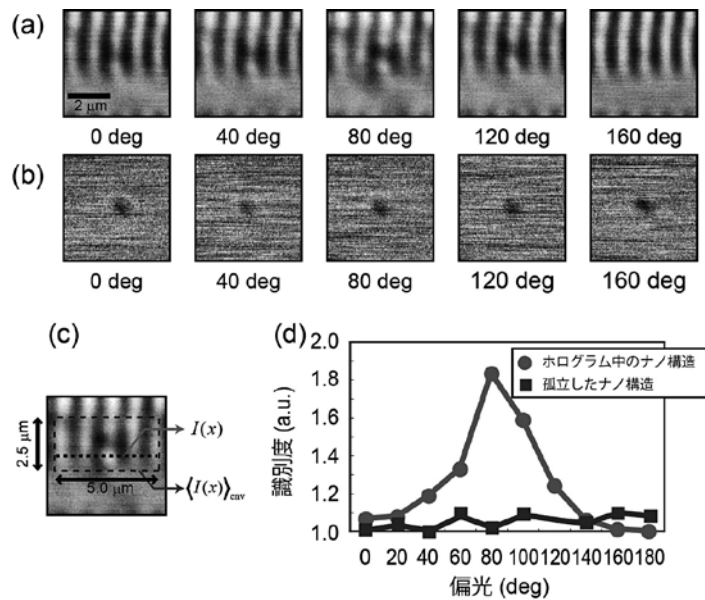


図4：階層型ホログラムにおける近接場光情報読み出しの顕著な偏光依存性。(a) ホログラム中のナノ構造からの近接場情報再生。(b) 孤立したナノ構造からの近接場情報再生。(c,d) 注目領域中での平均強度を考慮した性能指標(「識別度」)及び評価結果。

近接場での相互作用に著しい偏光依存性をもたらし、結果としてこれをナノ寸法での情報読み出しに生かすことができる。一方、ナノ構造が平面内に孤立している場合には、縦方向にも横方向にも同様の応答を示すため偏光依存性は極めて小さい。ホログラム中のナノ構造と孤立したナノ構造の偏光依存性は詳細は文献[1,8]に詳述しているが、注目領域中での平均強度との差に注目した「識別度」という指標を新たに定め、近接場の顕著な偏光依存性を図4のように実験的に明確に示すことに成功した。

なお、上記のように微細なナノ寸法の構造を備えさせることが階層型ホログラムの原理の一つだが、さらにデバイスの耐クローン性を上げるにあたって、作製者ですら再現が不可能なナノ構造を実現するという戦略がある。これは、万人の指紋や静脈が“異なる”ことに依拠しているバイオメトリクスの人工物版として注目されている「人工物メトリクス」と呼ばれる技術[19]を、ナノ領域の光の相互作用を用いる形態にさらに拡張できることを示唆しておりさらなる開発を進めている。

### 3. ナノフォトニック「ロック&キー」

前節では「デバイス」としての階層型ホログラムが「リーダー」としてのプロープと階層的な相互作用をすることがセキュリティ情報の読み出しに結びついていた。このような原理をさらに発展させて、「デバイス」と「リーダー」が特定の形状の組み合わせであり、しかも、両者が近接配置され適当な近接場光相互作用が生じたときのみ出力信号を生じさせるシステムを考えることができる。いわば、「鍵」と「鍵穴」の組み合わせ、すなわち「ロック&キー」をナノ寸法の光で実現することができる。以下にその原理と実証実験を示す。

「ロック&キー」を実現するナノ形状には多様な組み合わせが存在するが、代表的例として図5に示す「ナノ構造A(ロック)」と「ナノ構造B(キー)」がある。ナノ構造A、ナノ構造Bとも要素形状が長さ500 nm、厚み100 nm、幅100 nmの直方体型の形状からなっている。

これらのナノ構造は、各々が単独で配置された場合、 $x$  偏光入力に対し  $y$  偏光出力が殆ど生じない。例えばナノ構造A に対し  $x$  偏光入力に加わると、ナノ構造中の電荷が振動するが、ナノ構造Aの幾何学的形状のため電荷の振動は  $y$  方向には生じず、従って  $y$  偏光の伝搬光が生じない(図5(a), 図5(d,2))。しかし、ナノ構造Aの近傍には近接場光が生じていることに注意する必要がある。また、このようなナノ構造では電荷の局在(誘電体の場合は分極の断絶)が要素構造の端部において生じ、その符号が相異なるという性質に留意する必要がある。なお、同様にナノ構造Bについても単独では  $y$  偏光の出力は殆ど生じない(図5(b), 図5(d,3))。

その上で、ナノ構造Aとナノ構造Bの積層を考える。このときナノ構造Aに附随した近接場光によって新たな電荷がナノ構造Bに誘起されるが、ナノ構造A中の相異なる符号の電荷がナノ構造Bのちょうど上下端に生じるような構造となっていることが特に重要である。これにより、ナノ構造Bには  $y$  方向に同位相で振動する振動電流が生じ、したがって  $y$  偏光の伝搬光が生じる(図5(c), 図5(d,1))。

以上の内容は、構造体単独では電気四重極子として作用している状況が、両者が近接して積層配置されることで層間の近接場光相互作用が生じ、電気双極子として作用する状況に変換されることとして普遍的に理解できる。(我々はこれを「四重極子-双極子変換」と名付けた[7].)

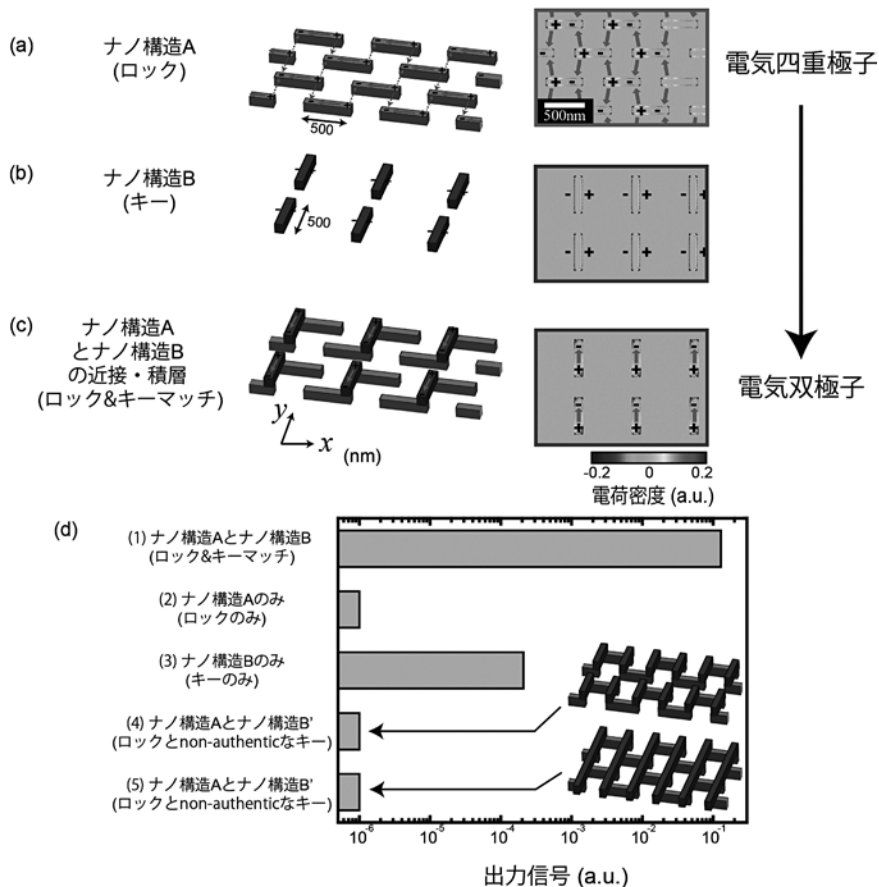


図5: ナノフォトニック「ロック&キー」の原理. (a) ナノ構造A (ロック), (b) ナノ構造B (キー) 各々単独では出力信号 ( $x$  偏光入力に対する  $y$  偏光成分) がほとんど生じないが, (c) 両者が近接し積層されたときにのみ出力信号が生じる (電気四重極子→双極子変換). (d) 出力信号のシミュレーション. 適切なキーを用いない場合 (ナノ構造B' 及びB'') に対しては出力信号が生じない. すなわちロックとキーの認証機能が実現.

実験では, 電子ビームリソグラフィなどを用いてサファイヤ基板上に(1)ナノ構造Aのみ, (2)ナノ構造Bのみ, 及び(3)ナノ構造Aとナノ構造Bの積層構造を面内の異なる位置に作製した. 図6(a)にデバイス断面の模式図を示す. 各層の厚みは100nmとした. 作製したデバイスの走査型電子顕微鏡(SEM)像を図6(b)下に示す. (3)の積層構造は, 本来, ナノ構造A, ナノ構造Bを別々に作製しその積層配置によるべきだが, 原理確認のため2層一体化構造を用いた. ナノ構造A, B間にはスパッタにより厚み200nmのSiO<sub>2</sub>層を作製した. 各々の構造に関し, 波長690nmの $x$ 偏光入力に対する $y$ 偏光透過光の強度比を図6(b)に示す. (i) ナノ構造A, (ii) ナノ構造B単独では, 出力光がほとんど生じないのに対し, 両者を近接させた(iii)の積層構造において出力が明瞭に増大しており前記の原理の実証に実験的に成功した.

さて, 前述のように, 「ロック」となるナノ構造Aと「キー」となるナノ構造Bの積層構造が, 出力信号を生じさせる構造となっているかどうか問題となるため, 「正規のロック」からず

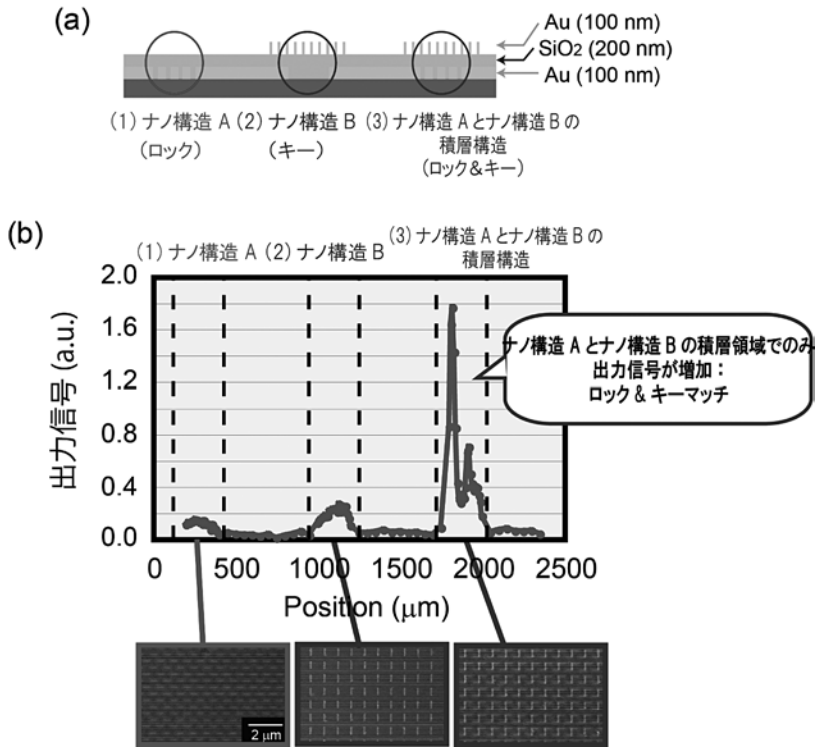


図6：ナノフォトニック「ロック&キー」の実現. (a) 作製したデバイスの断面の模式図 (b) ナノ構造 A とナノ構造 B の近接・積層領域でのみ出力信号が増加（ロック&キーマッチ）

れた形状のロックがナノ構造 B に積層された場合には出力信号は生じない. 図 5(d) の(4) 及び(5) は各々「正規のキーではない」ナノ構造 B', ナノ構造 B' がナノ構造 A に積層されたときの y 偏光出力を有限差分時間領域法に基づいて計算したものである. 正規でないロックに対しては出力信号が十分小さいことが分かる.

以上により, 図 7 のような応用シーン, すなわちナノ構造 A を携帯電話のバッテリーに, ナノ構造 B を携帯電話の筐体側に配置し, 両者がマッチしたときのみ携帯電話が利用可能とさせる機能などを考えることができる. これにより 1 節で触れた uncertified バッテリーによる爆発事故等を未然に防ぐことができる.

また, ナノフォトニクスによるセキュリティ機能は, 2 節の階層的ホログラムと上記のロッ

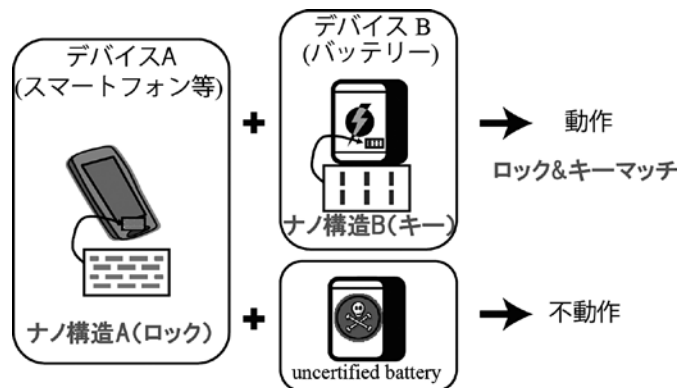


図 7：ナノフォトニック「ロック & キー」の応用シーンの例：モバイルデバイス等における人工物間の認証(uncertified battery による事故防止等)。



ク & キーの他にも原理構築と実証に成功している。例えば、文献[10,11]ではナノ寸法におけるエネルギーの局所的なエネルギー散逸を用いて情報読み出しの履歴を物理的に記憶することが可能であることを示している。すなわち、第三者の情報アクセスを物理的な足跡として残すことができ、トレーサビリティ機能やタンパーエビデンス機能をナノフォトニクススの原理によって実現している。

#### 4. まとめと今後の展開

ナノ寸法での光を用いた新たな光セキュリティの原理構築と実証実験に成功した。具体例として2節では「階層型ホログラム」、3節ではナノ寸法の「ロック & キー」を示した。社会経済・生活の根幹にある情報資源や価値資源としてのモノの安心・安全へのさらなる貢献を目指して、学術面・産業面の両面でさらなる展開を進めている。末尾記載の多くの報道事例のように、社会の期待も高くそれに応えるべく更なるイノベーションを達成したい。図8に今後の研究開発の展望図を示す。スマートフォンなどの爆発的普及や Internet of Things (IoT), Cyber-Physical Systems (CPS) 等の術語で叫ばれている物理世界とサイバー世界の融合が加速される未来では、大量のデバイスの安全性や個別性を手当することがより一層重要となると考える。また、新興国を含め多種・大量の出荷が期待され新たな産業創出を目指している。学術面では、光セキュリティの原理を未開拓だったナノ寸法に拡張することから原理の深化を指向するとともに、リチャード・ファインマンが約50年前に喝破した通り極微世界には利用可能な自由度が実に大量に存在しており、概念としても技術としてもオリジナルでかつ社会貢献の高いナノ寸法での光機能システムの更なる展開を目指している。

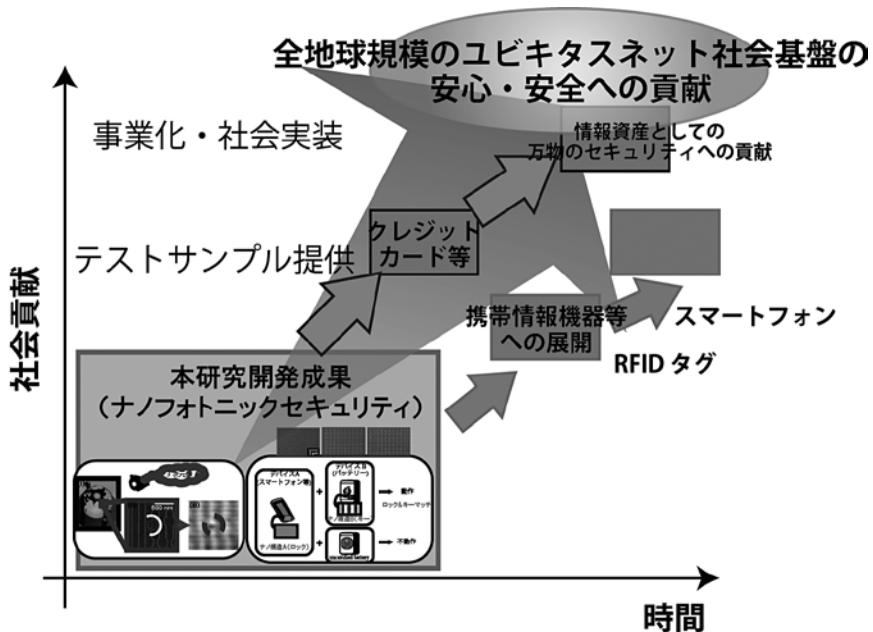


図8: ナノフォトニックセキュリティの研究開発の展望: 事業化・社会実装へのロードマップ。

## 参考文献

1. 成瀬 誠、堅 直也、関根陽子、大八木康之、法元盛久、オプトロニクス **363**、89、(2012).
2. M. Naruse, T. Yatsui, W. Nomura, N. Hirose, M. Ohtsu, *Opt. Express* **13**, 9265 (2005).
3. M. Naruse, T. Inoue, H. Hori, *Jpn. J. Appl. Phys.* **46**, 6095 (2007).
4. M. Naruse, T. Yatsui, T. Kawazoe, N. Tate, H. Sugiyama, M. Ohtsu, *Appl. Phys. Exp.* **1**, 112101 (2008).
5. M. Naruse, T. Yatsui, H. Hori, M. Yasui, M. Ohtsu, *J. Appl. Phys.* **103**, 113525 (2008).
6. N. Tate, W. Nomura, T. Yatsui, M. Naruse, M. Ohtsu, *Opt. Express* **16**, 607 (2008).
7. N. Tate, H. Sugiyama, M. Naruse, W. Nomura, T. Yatsui, T. Kawazoe, M. Ohtsu, *Opt. Express* **17**, 11113 (2009).
8. N. Tate, M. Naruse, T. Yatsui, T. Kawazoe, M. Hoga, Y. Ohyagi, T. Fukuyama, M. Kitamura, M. Ohtsu, *Opt. Express* **18**, 7497 (2010).
9. N. Tate, M. Naruse, W. Nomura, T. Kawazoe, T. Yatsui, M. Hoga, Y. Ohyagi, Y. Sekine, H. Fujita, and M. Ohtsu, *Opt. Express* **19**, 18260 (2011).
10. M. Naruse, T. Yatsui, J. H. Kim, and M. Ohtsu, *Appl. Phys. Express* **1**, 062004 (2008).
11. M. Naruse, T. Yatsui, T. Kawazoe, Y. Akao, M. Ohtsu, *IEEE Trans. Nanotechnol.* **7**, 14 (2008).
12. S. P. McGrew, *Proc. SPIE*, **1210**, 66 (1990).
13. R. L. van Renesse, *Optical Document Security* (Artech House, Boston, 2005).
14. B. Javidi, *Optical and Digital Techniques for Information Security* (Springer, New York, 2005).
15. J. W. Goodman, *Introduction To Fourier Optics* (Roberts & Company, Colorado, 2004).
16. 例えば <http://www.digitimes.com/news/a20080507PD208.html>
17. H. Fujita, M. Ishikawa, N. Kuwahara, M. Fukuda, M. Sakaki, T. Takakawa, H. Sano, M. Hoga, and N. Hayashi, *Microelectronic Eng.* **85**, 1514 (2008).
18. 成瀬 誠、堅 直也、松本 勉、大八木康之、関根陽子、法元盛久、大津元一、相互作用利用型セキュリティの一般構造とナノ光学的考察(分科内招待講演)、第 59 回応用物理学関係連合講演会(東京 2012.3.16)、講演予稿集、03-092
19. H. Matsumoto and T. Matsumoto, *IPJS Journal* **44**, 1991 (2003).

## 関連の報道事例

1. Holography News (Vol. 25, p. 5, February 2011)
2. 米国 Physics Today 誌, 電子版,  
<http://blogs.physicstoday.org/thedayside/2011/01/practical-holography-at-spie-photonics-west.html>
3. 日本経済新聞 1 面トップ「特殊な光で暗号読み取り. 紙幣偽造防ぐ新技術. 東大と大日本印刷. 5年後めど実用化」(2009年 9月 6日)
4. Nature Photonics, News and Views 欄 (Vol. 3, pp. 615-616, 2009)
5. Laser Focus World Japan, industry report, 「東大と大日本印刷、ナノフォトニック階層型ホログラムを開発」(2009年 10月, p. 10)
6. Laser Focus World Japan, industry report, 「東大が伝搬光と近接場光で独立した読出し構造をもつ階層型ホログラムを実現」(2008年 2月, p. 9)
7. 工業材料「近接場光を利用して光の変調を起こす機能性シートを開発」(2010年 11月, p. 6)
8. 日刊工業新聞「「近接場光」で光を変調. 東大・大日本印刷. 機能性シートを開発」(2010年 9月 15日, p. 23)