

# ナノスケールに近づく微細構造光学系

ハンスペーター・ヘルジッグ、イヴァン・メールキ、  
トラルフ・シャーフ、中川巨

微細構造の光学素子には、マイクロスケールの回折光学系からナノスケールのプラズモニクスにまで応用できるユニークかつ有益な性質がある。

回折光学素子は回折と干渉の物理現象を利用して光の伝搬を制御する部品だ<sup>(1)~(3)</sup>。通常、このような素子は巨視的なプレーナ微小構造で、波長の2~3倍から数十ミクロンのサイズで構成され、回折理論にもとづく高度な数値アルゴリズムで設計されている。これらの素子は光リソグラフィ、レーザや電子ビームによる直接描画、反応性イオンエッチングなどの新しいマイクロマシニング技術によって作製されている。

過去10年間、回折光学素子は伝統的な光学素子では不可能で実現できなかったさまざまな機能をもつ光学機能を実現するための強力な手段として発展した。並行して、マイクロレンズの技術が高効率のバッチ生産を可能にする同様な製法にもとづいて開発された。

現在、このような屈折表面あるいは回折表面を利用する素子は、レーザによる材料加工でのビーム成形から通信用のインターコネクタまで、さまざまな応用を見出している。

従来の光学系と比較した場合の微小光学系の強みは、微小光学系を用いることによって大きくて複雑な光学系が小型の形状に集積できることにある。また、射出成形法などの複製技術の進歩によって、微小光学素子の低コスト大量生産も可能になっている。その一例は小型のフーリエ変換分光計だ(図1)。この分光計の心臓部はシリコンのマイクロマシニング技術で実現された可変深さ(数百マイクロメートル)をもつチューナブル回折格子から構成されている<sup>(4)</sup>。

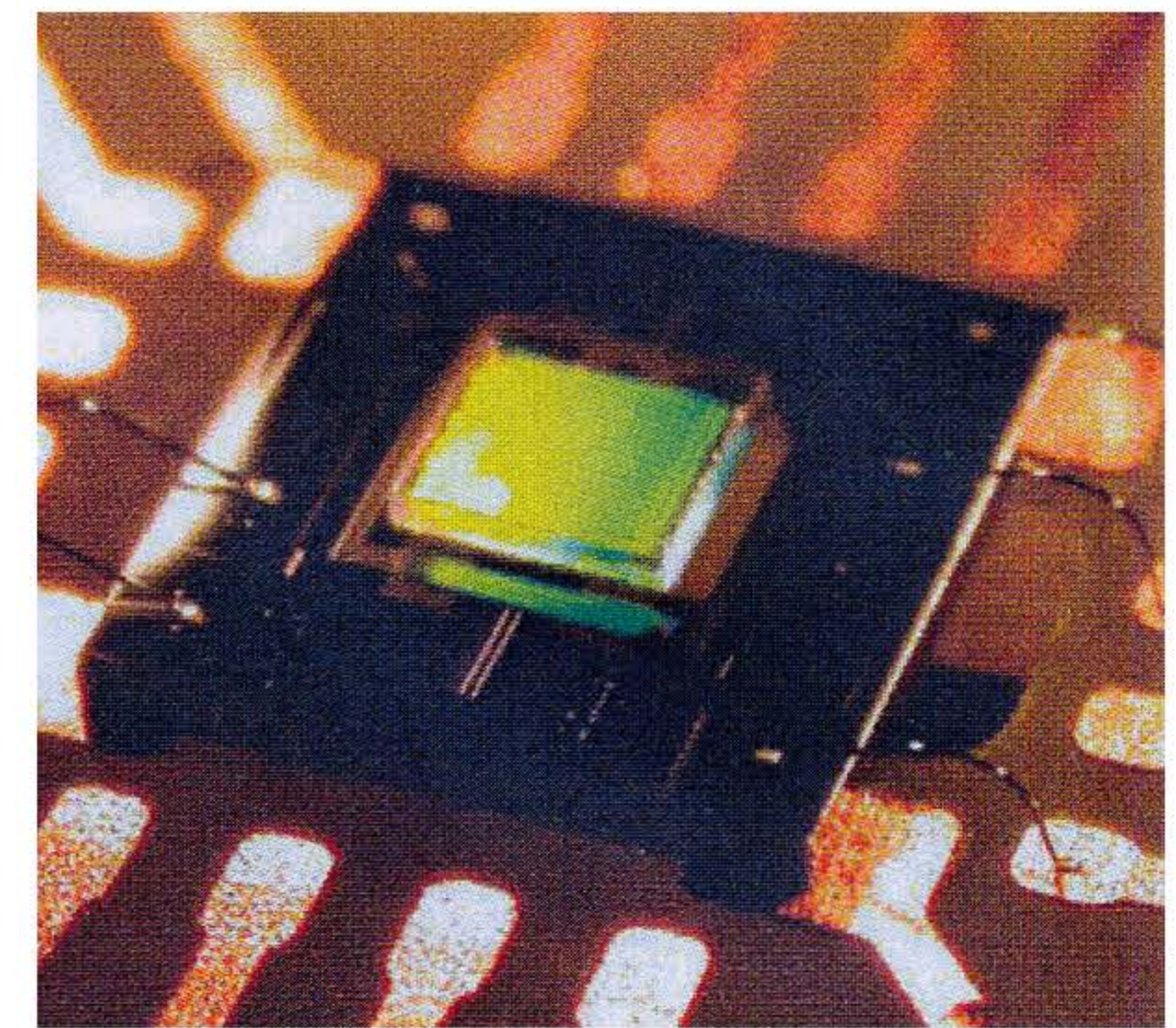


図2 共振回折格子フィルタは傾斜型のMEMSプラットフォーム上に搭載されている。

回折光学系あるいは一般の微小光学系の進歩は微細加工技術の進歩と密接に関係している。また、現在では、マクスウェル方程式にもとづく複雑な光学構造の高効率計算が高性能コンピュータによって可能になり、波長以下のサイズをもつ構造を研究する回折光学素子の研究者はますます増えている。

## 共振回折格子フィルタ

微細構造と薄膜とを組み合わせると、反射と透過が波長、入射角、偏光によって非常に強く変化する素子を創成することが可能になる。このような素子の一例は共振グレーティングフィルタ(RGF)だ<sup>(5)</sup>。RGFは回折格子を利用して入射光を導波路層の漏れモードに結合する。回折格子のピッチ、深さおよび層厚を選択すると、共振波長での高い反射率と妥当な帯域での低い反射率のいずれかを得ることができる。このような設計の利点は、わずか3層を使

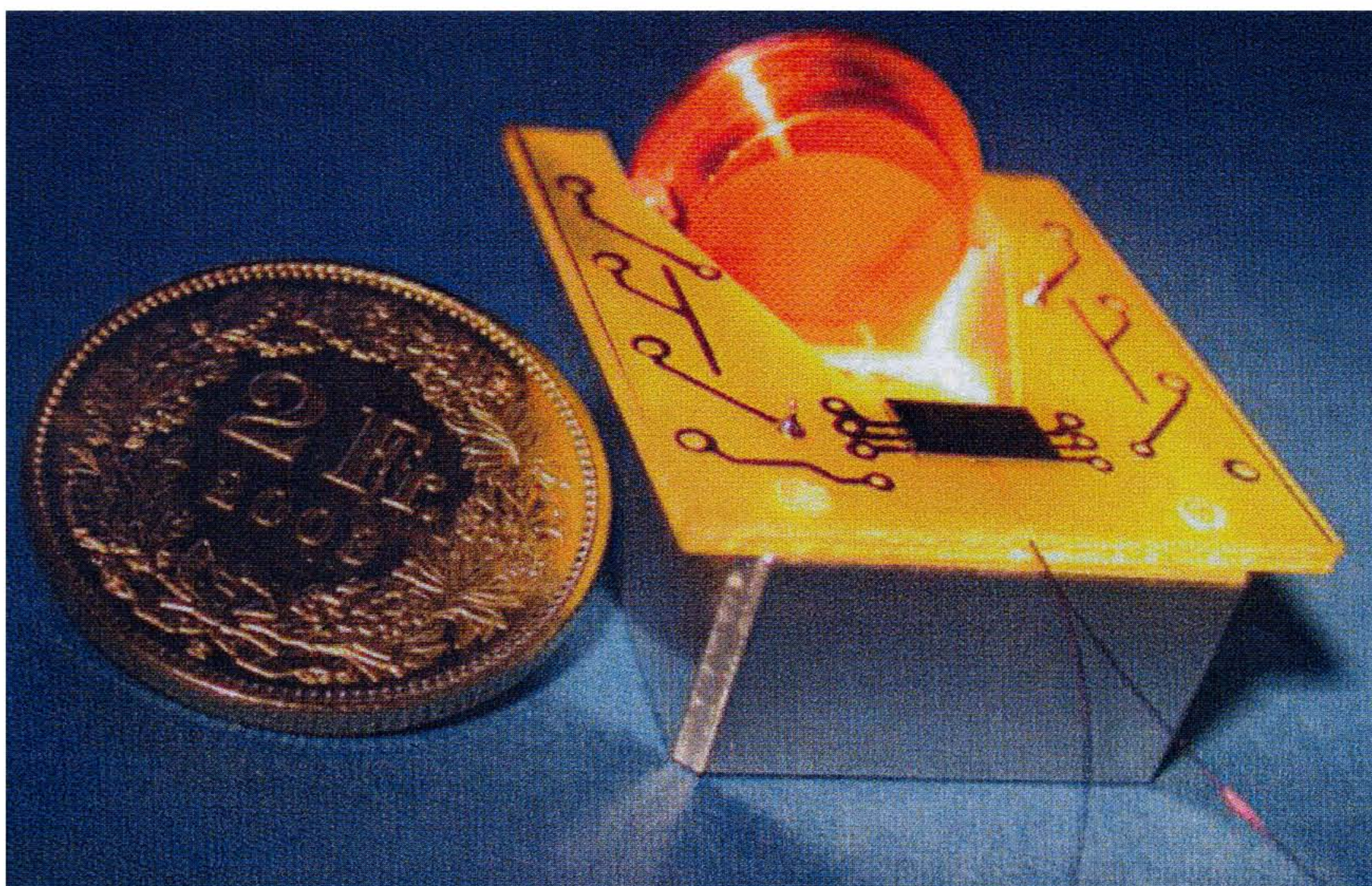


図1 小型化したフーリエ変換分光計は可変同調形回折格子を使用している。

用することで100%に近い狭域な反射率が得られ、光MEMS(微小電気機械システム)プラットフォームへの実装にとって重要な軽量で薄型の構造の作製が可能になることだ(図2)<sup>6)</sup>。この素子は通信用のスイッチや波長フィルタとして利用できる。同様の構造には預金通帳やクレジットカードの安全対策としての興味深い応用もある。特に、試料の方位に依存した色彩効果を得ることができ、蝶、甲虫あるいは蜘蛛と同様の構造が実現されている。

### フォトニック結晶

フォトニック結晶は回折光学系から生まれた構造だ。フォトニック結晶(PC)の周期構造によって、光を制御する独自の方法が得られ、光学素子のさらなる小型化が可能になる(例えば、[www.laserfocusworld.com/articles/274717](http://www.laserfocusworld.com/articles/274717)を参照)<sup>7)</sup>。PCの最も将来性がある実現例の一つは、面内のフォトニックバンドギャップによる閉じ込めと垂直方向の屈折率導波による光の閉じ込めにもとづく2DプレーナPC膜だ。このような構造を利用すると、垂直または曲がり導波路、波長フィルタ、微小共振器などの小型化したフォトニック部品の創成が可能になる<sup>8)</sup>。このような構造に制御や同調の機能は集積光回路の汎用性を広げ、新しい可能性を開拓することができる。特に、PC共振器は非常に小さい体積で高い空間分解能が得られ、光を閉じ込めることができるため、能動可変同調形のフォトニック部品を実現する方法として非常に興味深い。

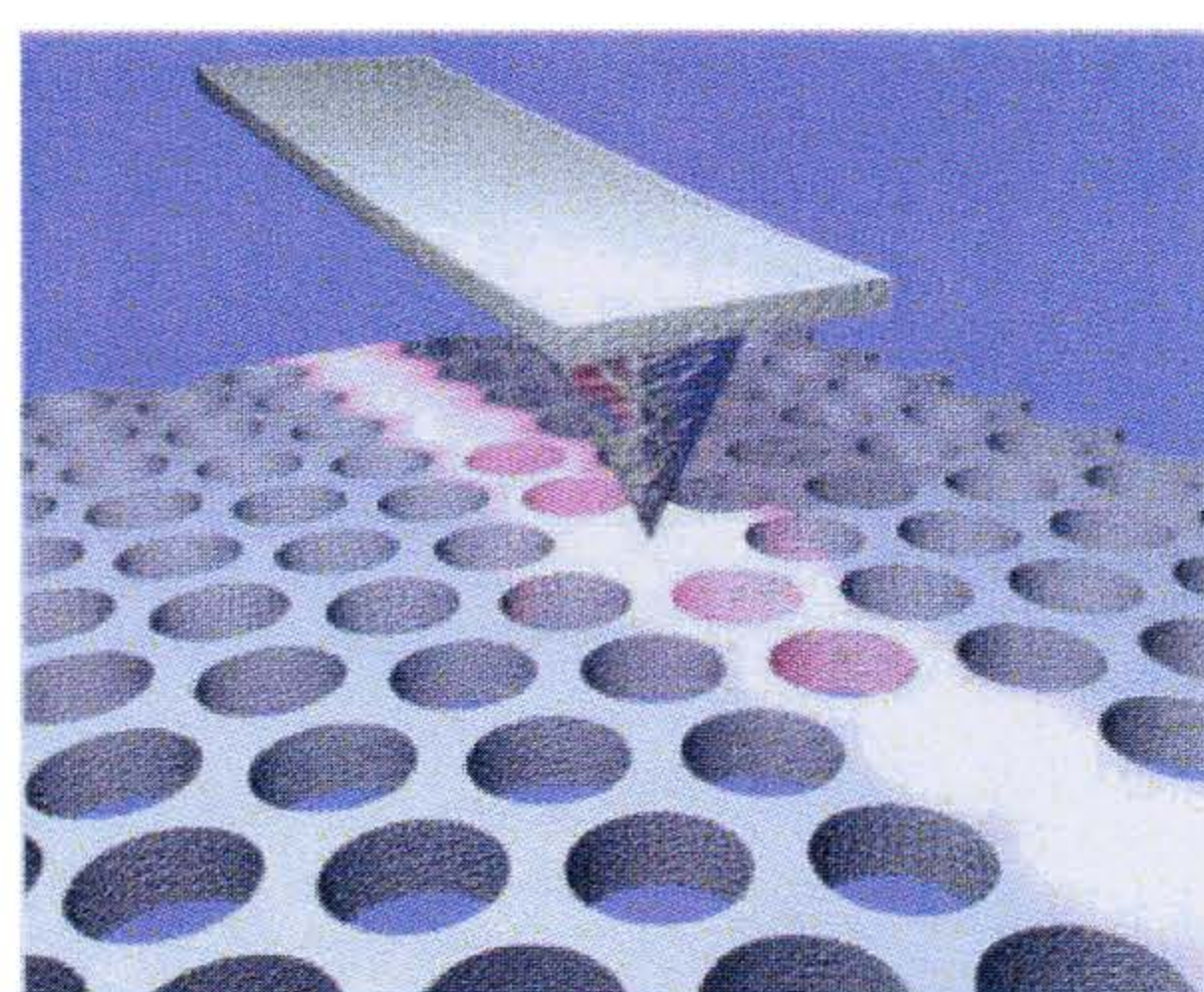


図3 フォトニック結晶共振器は共振器近傍のAFMチップの位置決めで波長同調を行う。

さまざまな機械的および光学的同調機構を理論と実験で調べた<sup>9),10)</sup>。機械的方法による摂動は原子間力顕微鏡(AFM)のチップを使って実現できた(図3)。この場合の自立シリコン膜のPC構造は、微小共振器の領域へのアクセスが可能になる。簡単な共振器構造を使用し、チップと膜との距離を変調することで、光学場に摂動を加える共振器上に配置したシリコンチップの3次元(3D)シミュレーションを行った。共振器ミラーを形成する細孔の一つにチップを挿入すると、共振周波数は10nm以上もシフトした。その結果、共振器の同調は可能になり、チップを使うオンオフスイッチやチューナブルフィルタ用の独立型MEMSの技術基盤を確立することができた。

微小共振器の中心に波長よりも短いレーザーを集光する光学的方法によっても、微小共振器内部の閉じ込め場に対して摂動を加えることができる。レーザー誘起による5nmの波長シフトを実現した。出力信号はプローブレーザーの変調によって変化させることができた。変調深さは微小共振器の品質因子Qと

誘起される共振波長シフトに依存することが分かった。100kHzの変調周波数を観測したが、これはプローブレーザーの最大変調速度であり、共振器によるものではなかった。最近の実験において、われわれはさらに高いメガヘルツ領域の周波数を実現したが、これもプローブ光の最大変調速度によって決まる周波数であった。この摂動の方法は高速の全光式光変調器の基盤として利用できる。

### ナノ粒子

複雑な人工フォトニック材料は、ナノスケールのさまざまな光学的性質をもつ材料の自己組織化を探索することで実現できる。これらの材料を使用すると、媒質の分散関係を制御して操作する光学素子を実現するためのさまざまな方式を創成することができる。

プラズモニック材料の封入は狭いスペクトル領域において材料分散の強い共鳴を得るための望ましい方法になる。最も洗練された方法は巨大分子に金属ナノ粒子を含ませて、このような液晶相の分子の自己組織化を探索することだろう(図4)。プラズモンはエレクトロニクス、光学、ナノサイエンスおよび情報技術を結び付ける重要な役割を果たす。ナノメートルスケールで光を制御し操作する新しい方式のフォトニクスとエレクトロニクスの素子の創成が可能になり、医学診断、化学センシング、自国の保安、環境科学、高速データ通信、コンピュータ部品などの用途でのデジタル情報の発生、伝送、検出にも応用することができる<sup>11)</sup>。

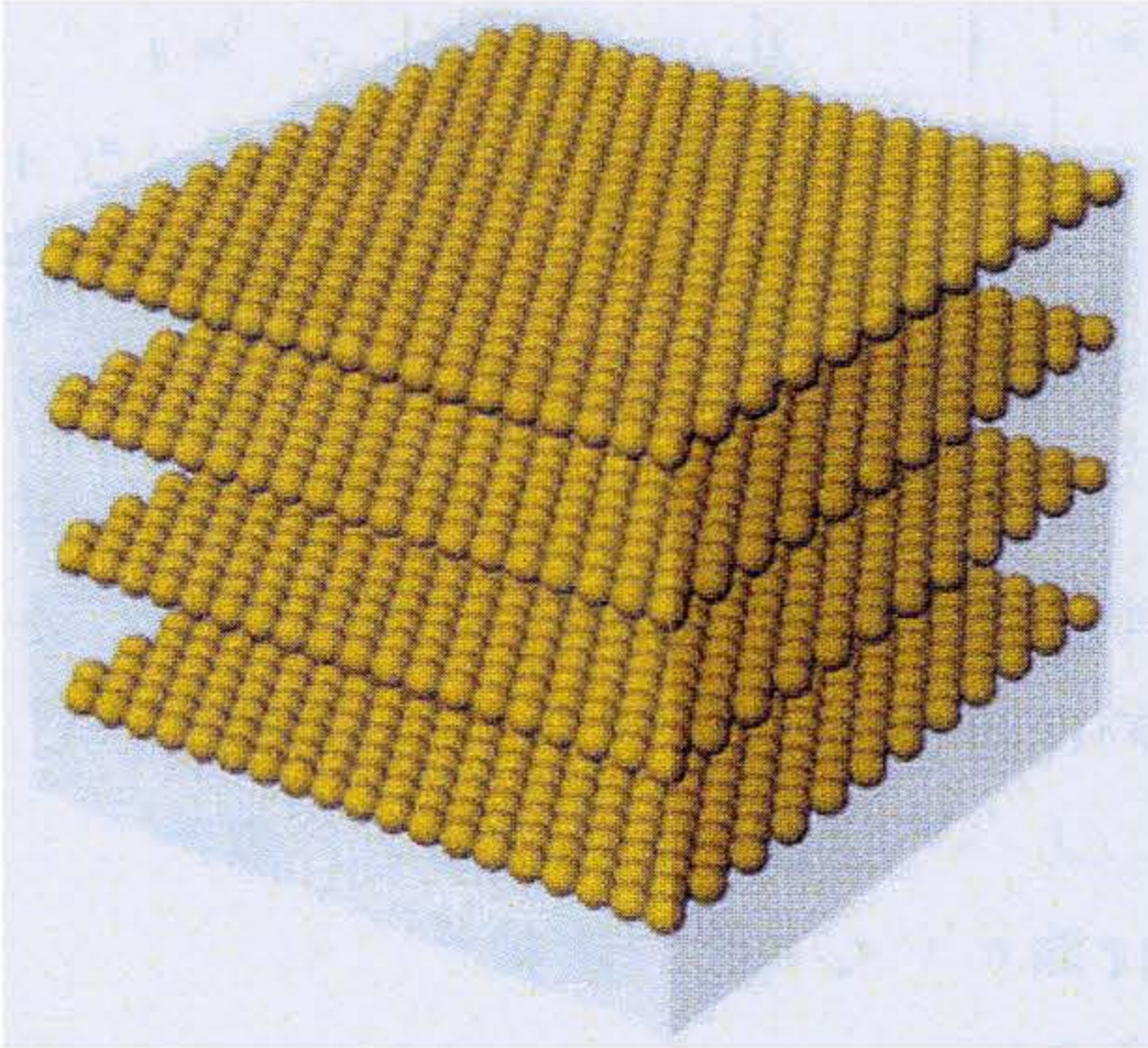


図4 プラズモニック材料は金ナノ粒子の層から構成されている。

### ナノスケールでの観測

ナノスケールの作製にはナノスケールの観測が必要になる。走査プローブ光学顕微鏡法を利用すると、ナノスケールまでの波長以下の形状サイズを表示する光学場の3D検出が可能になる。このような計測機器は走査型近接場光学顕微鏡法から発展した。この場合は試料の光学近接場を検出することによって、ナノスケールの空間分解能を得ることができる。

フォトリソグラフィ結晶導波路のようなフ

ォトニック素子の構造内部の電磁場分布をナノスケールの空間分解能で測定することは、素子の基本的な挙動の理解と構造の最適化にとって重要だ。この情報は従来のレンズ系では可視化できなかった。走査型近接場顕微鏡法を使うと、波長以下のスケールの構造変化とエバネセント波の観測が可能になる<sup>(12)</sup>。特に興味深いことは、ヘテロダイナミクス技術を利用した振幅と位相の測定によって、光分布の完全な情報の取得が可能になることだ。

### 参考文献

- (1) H.P. Herzig, ed., *Micro-Optics: Elements, Systems, and Applications* (Taylor & Francis, London, 1997).
- (2) J. Turunen, F. Wyrowski, eds., *Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications* (Akademie Verlag, Berlin, 1997).
- (3) S. Sinzinger and J. Jahns, *Microoptics* (Wiley-VCH, Weinheim, 1999).
- (4) O. Manzardo et al., *Optics Lett.* 29 (13), 1437 (2004).
- (5) S. Tibuleac and R. Magnusson, *J. Opt. Soc. Am. A* 14, 1617 (1997).
- (6) T. Overstolz et al., *Proc. SPIE* 5455, 240 (2004).
- (7) E. Yablonovitch, *J. Opt. Soc. Am. B* 10, 283 (1993).
- (8) B.S. Song et al., *Nature Materials* 4 (3), 207 (2005).
- (9) I. Märki et al., *Optics Express* 14 (7), 2969 (2006).
- (10) Iwan Märki et al., *Optics Lett.* 31 (4), 513 (2006).
- (11) EOS Topical Meeting on Molecular Plasmonic Devices, April 27-29, 2006, Engelberg, Switzerland (European Optical Society, 2006).
- (12) P. Tortora et al., *Optics Lett.* 30 (21), 2885 (2005).

### 著者紹介

ハンスペーター・ヘルジグ (Hans Peter Herzig) はスイスのヌーシャテル (Neuchâtel) 大学マイクロテクノロジー研究所の正教授、イワン・マールキ (Iwan Märki) は同所の博士研究員、トラルフ・シャーフ (Toralf Scharf) は同所のグループリーダー兼講師、中川 亘 (Wataru Nakagawa) は同所のグループリーダー。 e-mail: HansPeter.Herzig@unine.ch.