

2018年フォトニクス技術20選

ジョン・ウォレス

2018年には、産業界、科学界、学術分野、そしてそれ以外のすべての人々に影響を与える、フォトニクスのさらなるイノベーションが生み出された。

技術革新のペース(1年に考案される素晴らしい技術的アイデアの数)は増加傾向にある、と読者は思っているかもしれない。それを裏付ける事実がいくつ也存在する。世界人口は毎年増加するので、それに伴って知性も増加している。発明のための手段は向上しており、なかには劇的に進歩している分野もある(コンピューティング、人工知能、先進フォトニクス、その他ハードウェア)。中国を筆頭に多くの国々で、科学や工学における発明性が高まっている。また、より基本的なレベルでは、知識の量が増えて、より多くの情報が引き出せるようになってきている。あるいは読者は、発明のペースが実は頭打ちになって、今では減少傾向にあると思っているかもしれない。ネコ動画ばかり見ていたのでは、それも有り得るだろう。

フォトニクスは成長期にある。複雑さとともに成長を遂げる分野であり、世界はデジタル革命に牽引されて、急速に複雑さを増している。2018年の技術レビュー20選は、フォトニクスにおけるこの1年間の重要な進歩を示すサンプルで構成されている。そのそれぞれが、間違いなく業界内に影響を与え、さらに重要な点として、それ以外の世界にも影響を与えることだろう。

流行の先端を行くフォトニクス

1 モノのインターネット：ネットワーク接続されたスマートデバイスが、互いや、より大規模な世界と通信するモノのインターネット(IoT:

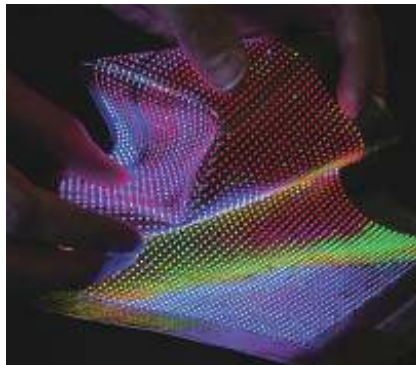


図1 高密度に敷き詰められた微細ピクセルをフレキシブル素材に実装して、個人用ウェアラブルディスプレイが構成できることを示す、microLEDパネル。(提供:ホルストセンター)

Internet of Things)は、もう数年前から流行語となっているが、ようやく実現に向けて動き出している。イメージングセンサ、光学部品、光ファイバ、位置決め装置、ソフトウェアの使用が、ビルや自動車やその他の場所におけるIoTの拡大を促進している。IoTは、LiFi(light fidelity、WiFiのフォトニクス版)から、身体に装着するセンサ、スマートホーム、車両間データ通信にいたるまでのあらゆるものを含有する(Laser Focus World日本語版7月号「フォトニクス—モノのインターネットの基盤となる実現技術」参照)。

2 顔認証：顔認証は、大小を問わずセキュリティシステムに恩恵をもたらしている。従来の顔認証は、2次元画像のソフトウェア解析に基づいていた。しかし、それでは顔写真を使用することによって突破できてしまう可能性がある。顔認証に3つめの次元を追

加することにより、この簡単な抜け穴をふさぐことができる。3Dセンシングの1つの形態である飛行時間(TOF: Time Of Flight)イメージングを、顔認証に適用することにより、高い深度精度と画質で顔を表現することができる。スイスのエスプロス・フォトニクス社(Espros Photonics)が開発したシステムは、0.13mmの距離分解能で1秒あたり156枚のTOF画像を収集できる(Laser Focus World日本語版9月号「3D TOFカメラ技術で顔認証精度とセキュリティ向上」参照)。

3 量子センシング：量子コンピューティングと暗号化は、科学誌や技術誌でよく特集されるが、それ以外にも、別の種類の量子技術として注目を集めつつあるのが、量子センシングである。フォトニクスに大きく依存する量子センシングは、実は、量子コンピューティングや暗号化よりも実用化に近い可能性がある。すでにテスト段階にある微小量子センシングシステムとして、2017年にテストされた観測ロケットによる微小重力下での冷却原子効果の調査や、2018年5月に初めて実施されたロケットによるヨウ素周波数基準のテストであるJOKARUSなどがある。将来的な用途としては、石油、ガス、水探査用のセンサや、マッピングなどがある(Laser Focus World日本語版5月号「量子センシングのペースが速まり利用空間も拡大」参照)。

4 ウェアラブル・フォトニクス：ウェアラブル・フォトニクス技術も、何年も前から議論されており、進歩してい

る。ウェアラブル・フォトニクスは、情報を表示し、フィットネスや健康状態に関する個人的なパラメータを追跡し、ファッションによる自己主張を支え、夜間や高放射線環境における安全性をサポートすることができる。ウェアラブル・フォトニクスが、フレキシブルな生地に組み込むことのできるmicroLEDの主要な応用分野であることは、あまり知られていないかもしれない(図1)。そしてもちろん、仮想現実(VR: Virtual Reality)／拡張現実(AR: Augmented Reality)用のハードウェア／ソフトウェア開発は、導波路をベースとするホログラフィック光学部品を使用した、超軽量メガネ型ディスプレイに対する革新的なアプローチを促進している(Laser Focus World日本語版5月号「フォトニクスはますます身近な存在に: 光でウェアラブル技術の進歩を促進」参照)。

最先端

フォトニクスコンポーネント

5 シリコンフォトニクス: 完全なアクティブシステム(光源、中間コンポーネント、光検出器)を備えたシリコンフォトニクス回路は、とてつもなく複雑である。シリコンに、ある程度の高いレベルで光を放射させるのは非常に難しいので、このようなフォトニクス回路は一般的にハイブリッド構造を持ち、III-V族半導体物質からなる光源が、シリコン回路に正確に配置されて固定されている。この複雑さを緩和するために、中国復旦大(Fudan University)の研究者らは、シリコンナノ結晶と最適化された分布帰還型(DFB: distributed feedback)共振器をベースとする、完全にシリコンの光励起レーザを開発した。さらに開発を重ねることによって、シリコンフォト

ニクスに利用できる可能性がある(Laser Focus World英語版4月号「All-silicon laser achieves high optical gain」(<http://bit.ly/2018techreview5>)参照)。

6 中赤外光学材料: コヒーレントな赤外(IR: infrared)光源には、所望の波長を達成するために、非線形光学材料でできたコンポーネントが必要になる場合が多い。英BAEシステムズ社(BAE Systems)のエンジニアらは、幅広い種類の新しい中赤外非線形材料を使用することによって、そのようなコンポーネントの有用性を拡大している(図2)。それらの多くは、パターン化または構造化されており、近赤外波長を入力として用いて、より長波長のIR出力を達成することができる。低損失で高い性能指数を備える結晶には、スペクトル透過率が非常に高い領域があり、それによって高度に設計されたレーザ光源の波長範囲が大幅に拡大される。そうした結晶を作製するための新しい手法も、材料そのものと同等に重要である(Laser Focus World英語版4月号「New materials extend laser spectral coverage deep into the infrared」(<http://bit.ly/2018techreview6>)参照)。

7 フラットなメタ表面レンズ: Laser Focus World誌の読者ならば、メタ表面光学素子についてすでによく知っていることだろう。研磨および研削された表面ではなく、一般的にはフラットな光学基板上に作製される、緩やかに変化するほぼ周期的なナノ構造に基づく光学特性を備える素子である。米ハーバード大(Harvard University)のフェデリコ・カパッソ教授(Federico Capasso)の研究室で何度も実証され

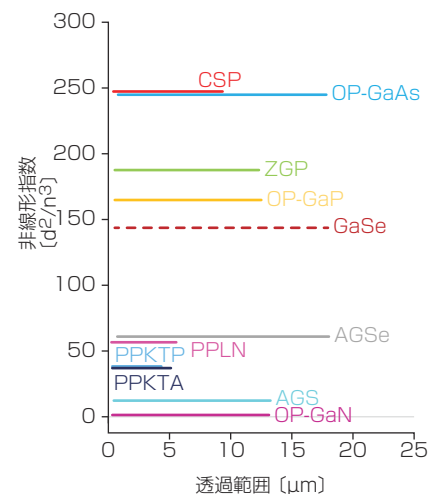


図2 さまざまな中赤外非線形光学(NLO: nonlinear optical)結晶の非線形性能指数(d^2/n^3)と透過範囲の関係。

ているように、用途によっては、1枚のメタ表面レンズで、複数の従来型光学素子を置き換えることができる。シンガポール科学技術研究庁(A*STAR: Agency for Science, Technology and Research)のData Storage Institute(DSI)と、同国の南洋理工大(Nanyang Technological University)の研究者らは2018年、715nmの波長において開口数(NA: Numerical Aperture)が0.99のフラットなメタ表面レンズを実証した(Laser Focus World英語版5月号「Metamaterial lens has numerical aperture of 0.99」(<http://bit.ly/2018techreview7>)参照)。

8 超高速グラフェン光検出器: 光検出に用いられるグラフェンは、0.6 ~ 20μmにわたるスペクトル感度を持ち、その範囲は、従来のどの半導体検出器材料と比べてもはるかに広い。しかし残念ながら、グラフェンの光吸収率は、その範囲全体にわたってわずか2%ほどしかない。米カリフォルニア大ロサンゼルス校(UCLA: University of Cal-

ifornia Los Angeles)のあるグループは、グラフェンでナノストリップを形成して金パッチに接続することにより、グラフェン光検出器の吸収率を大幅に向上させた。その結果、最大50 GHzの超高速検出機能を達成するデバイスが得られた。今後の改良によって、この速度を425GHzにまで高めることができる(Laser Focus World英語版8月号「Graphene photodetector has 50GHz speed and high responsivity from 0.6 to 20 μ m」(<http://bit.ly/2018techreview8>)参照)。

工夫に富んだ計測器

9 シンプルなシアリング干渉計：シアリング干渉計は、テスト波面を、位置をずらして複製した波面と干渉させるもので、連続波(CW:Continuous Wave)レーザビームの空間情報は、十分に簡単に測定できるが、フェムト秒レーザになると、その処理が難しくなる。標準的なシアリング干渉計のゼロでないパス長によって、得られた2つのパルスの干渉が妨げられるためである。米ロチェスター大(University of Rochester)のチュンレイ・グオ教授(Chunlei Guo)と博士課程に在籍するビリー・ラム氏(Billy Lam)は、パス長の差がほぼゼロで、フェムト秒パルスでも空間特性評価が可能な、シンプルなシアリング干渉計を作成した(ただし、実験デバイスで測定したパルスの持続時間は、わずか65fsだった)。(Laser Focus World英語版8月号「Simple shearing interferometer measures wavefront of femto-second laser pulses」(<http://bit.ly/2018techreview9>)参照)。

10 チップベースの分光計：分光計は、センシング、材料分析、医用画像処理

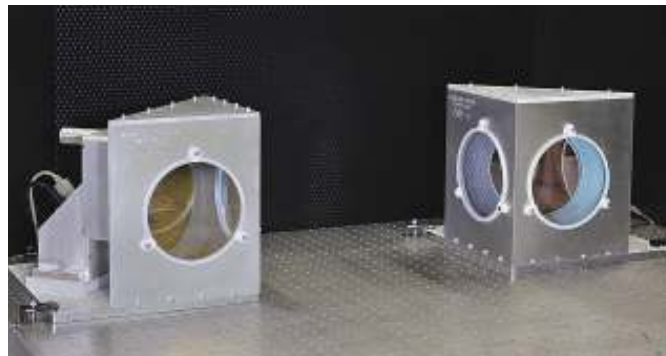


図3 NISTのこの2台の放射圧パワーメーターは、どちらも垂直天秤に接続されたミラーが金属筐体の中に収容されている。写真の角度からは、ミラーがやや黄色(左)とピンク(右)に見える。(提供：NIST)

における光干渉断層撮影(OCT:Optical Coherence Tomography)、光ネットワークの性能監視に広く用いられている。分光計の小型化は、応用分野の拡大につながるが、従来の分光計のサイズを縮小すると、感度が低下する。米マサチューセッツ工科大(MIT:Massachusetts Institute of Technology)の研究者らは、干渉計をオンチップに搭載するチップベースの分光計を作成することにより(標準のチップ製造プロセスを使用)、この問題を回避する方法を発見した。干渉計の各アーム上には光スイッチがあり、異なる一意のパス長を持つ導波路に光を導く。導波路は2のべき乗でスケールされる。その結果、チャンネル数は光スイッチの数に伴って指数的に増加し、例えば、10個のスイッチによって1024のチャンネルが生成される(Laser Focus Worldオンライン記事「MIT develops low-cost on-chip optical spectrometers with high channel count and signal-to-noise ratio」(<http://bit.ly/2018techreview10>)参照)。

11 高出力レーザビームの計測方法：レーザビームのパワーを計測するための従来の方法は、ビームの吸収を利用する。この方法は、低パワーのビームには有効だが、ビームが非常に強力な場合は、レーザパワーメーターからの

伝熱を非常に適切に処理しなければ、メーターが破壊してしまう恐れがある。米国立標準技術研究所(NIST:National Institute of Standards and Technology)はこれに代わる手段として、ビームによって生成された放射圧をミラーで計測する方法を考案した(図3)。この方法は、ビームのパワーが高いほど計測が容易になる。NISTは、この放射圧レーザパワーメーターを、製造環境において20kWのビームでテストし、米軍が運営している高エネルギーレーザシステムテスト施設(HELSTF:High Energy Laser Systems Test Facility)において50kWのビームでテストした(Laser Focus World英語版1月号「NIST tests radiation-pressure laser power meter in manufacturing environment」(<http://bit.ly/2018techreview11>)と、英語版6月号「NIST tests its radiation-pressure power meter (RPPM) with a 50kW laser」(<http://bit.ly/2018techreview12>)参照)。

新しい機能を備えたバイオオプティクス

12 ディープラーニング：ディープラーニングを利用することにより、ハードウェアや設計に変更を加えることなく、光学顕微鏡の性能を高められることが、UCLAの研究者らによって

実証された。人工ニューラルネットワークが積層された構造を持つ、ディープ畳み込みニューラルネットワーク(CNN: Convolutional Neural Network)を、低解像度と高解像度の画像を関連付けるようにトレーニングする。トレーニング後、顕微鏡によって取得した低解像度の画像データをCNNによって処理することにより、画像の解像度を高めることができる。実験として、CNNを肺組織モデルでトレーニングし、腎組織に対してテストした結果、空間周期 $0.345\mu\text{m}$ の解像度が得られた(Laser Focus World 英語版1月号「Deep learning improves microscopy images—without system adjustments」(<http://bit.ly/2018techreview13>)参照)。

13 脳を覗き込むウィンドウ：二光子顕微鏡など、脳を観察するための光学顕微鏡技術は、生体脳に対する非侵襲ウィンドウが作成できれば、これまでよりもはるかに適用範囲が拡大される。中国華南科技大(Huazhong University of Science and Technology)の研究者らは、透徹剤を用いてマウスの頭蓋骨の透明性を高めることによって、まさにこれを行った。透徹剤としては、若いマウスにはコラゲナーゼとグリセロール、それよりも年齢が高く骨量が多いマウスには、EDTA二ナトリウムとグリセロールを用いた。この方法により、マウス脳の皮質をシナプスの分解能で撮像することができる(Laser Focus

World オンライン記事「Noninvasive optical window created in the skull allows brain imaging」(<http://bit.ly/2018techreview14>)参照)。

14 リアルタイム生検：例えば内視鏡検査において、その場で組織を分析し、リアルタイムに生検を行えるようにしたいという目的の下、仏フレネル研究所(Institut Fresnel)の研究者らは、光学切片(すなわち3次元イメージング)を含むイメージングを利用している。これによって、手術中にラベルフリーのイメージングを行い、リアルタイムの組織病理学的診断が行えるようになる可能性がある。このマルチモーダルな非線形イメージング手法では、二光子自己蛍光(TPF: Two Photon Fluorescence)励起、第二高調波発生(SHG: Second Harmonic Generation)、誘導ラマンを利用して、細胞体や核、細胞外マトリックスを撮像する。ガラス微小球を先端に備えた中空コアファイバによって生成されるスポットが、圧電アクチュエータによって走査される(図4)。このマルチモーダル内視鏡により、ヒト組織の複雑な形態学的構造を明らかにできることが示されている(Laser Focus World 日本語版9月号「リアルタイム生検を目指すマルチモーダル顕微鏡法」参照)。

15 数兆フレーム毎秒のカメラ：生物学では現在、生体組織が動的に光を散乱する媒体であり、ミリ秒単位のス

ペックル無相関が存在するという事実がネックとなっている。米カリフォルニア工科大(California Institute of Technology)の科学者らと、同大の光学イメージング研究所(COIL: Caltech Optical Imaging Laboratory)所長は、「T-CUP」と名付けた、シングルショットの超高速圧縮写真撮影法(CUP: Compressed Ultrafast Photography)の一種を利用して、一回の露光で生体内組織内の過渡光パターンのフェムト秒イメージングを行っている。フェムト秒ストリークカメラで撮影した画像データに、いわゆるラドン変換を適用することにより、高品質画像が得られる。シングルショットから10兆フレーム毎秒の記録レートに対応する(Laser Focus World 英語版11月号「Real-time 10 trillion frames/s camera will facilitate in vivo imaging」(<http://bit.ly/2018techreview16>)参照)。

新しい応用分野

16 オールオプティカルの極低温冷却：極低温冷却器は、赤外線検出器を冷却して信号対雑音比(SNR)を低減するためによく用いられる。液体窒素を満たしたデュワー(dewar)は、検出器を短時間で冷却可能だが、リモートアプリケーションでは、機械式の極低温冷却器が用いられるのが一般的である。しかし、機械式の極低温冷却器には、それ自体が機械振動を発生させて信号を劣化させるという問題がある。米ロスアラモス国立研究所(Los Alamos National Laboratory)と米ニューメキシコ大(University of New Mexico)の研究者らは、可動部品がないために振動が生じない、オールオプティカルの極低温冷却器を実証した。レーザの蛍光励起によって、イッテルビウムドープのフッ化物結晶はエネルギー

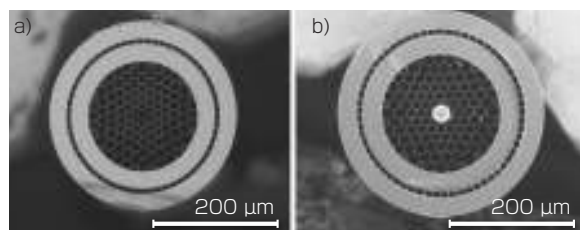


図4 (a)フェムト秒パルスの効率的な伝送と非線形シグナルの取得を可能にする、ダブルクラッドの中空コアファイバの断面図。(b)同じファイバの先端に $30\mu\text{m}$ のシリカビーズを埋め込んだもの。(提供:フレネル研究所)

ギーを失い、冷却される。水銀・カドミウム・テルル (HgCdTe) 光センサを 134.9K の温度に維持する実験が行われた (図5)。応用分野としては、宇宙でのセンシングなどがある (Laser Focus World 日本語版 11月号「センサのオールオプティカル極低温冷却で振動を除去」参照)。

17 高出力青色レーザー：銅のレーザー溶接は、リチウムイオンバッテリーの製造で広く用いられているが、ほとんどの産業用レーザーの近赤外波長域に対し、銅の吸収率は低い。緑色の波長域になると銅の吸収率が高まることを利用して、高出力の緑色レーザーが開発されているが、青色光の方が吸収率はさらに高くなる。米ヌブル社 (Nuburu) は、銅溶接用の高出力の青色ダイレクトダイオード (ファイバに結合されたレーザーダイオード) レーザシステムを商用提供している。150W のシステムで、厚さ $10\mu\text{m}$ の銅箔 40 枚を、ポイド (空洞) やスパッタを生じることなく溶接できることが実証されており、500W のシステムもまもなく発売される予定である (Laser Focus World 日本語版 11月号「ブルーダイレクトダイオードレーザーが産業レーザー機能を拡張」参照)。

18 光ファイバ上のテラビット毎秒のデータ伝送：光ファイバを介したデータ伝送は、テラビット毎秒を大きく超える領域に達している。国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT: National Institute of Information and Communications Technology) とフジクラのグループは、3モードの光ファイバによって、毎秒 159 テラビットのデータを 1045km の距離で伝送する実験に成功した。モード多重化に、348 波長すべてに対して 16QAM (Quadrature Am-

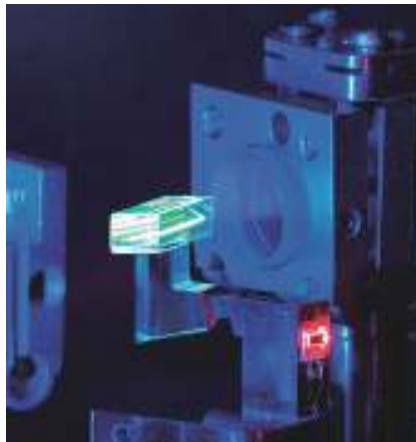


図5 光冷却器は、イッテルビウムドープのフッ化物結晶をレーザー冷却することにより、振動を発生することなく、HgCdTe センサを極低温に保つ。(提供: ニューメキシコ大)

plitude Modulation、直角位相振幅変調) という実用性の高い高密度な多値変調光信号を組み合わせた。MIMO (Multiple Input and Multiple Output) 処理により、1000km 以上を伝送した後でも、異なるモードが混合する信号の解読が可能である。3モードの光ファイバは、外径が標準的な $125\mu\text{m}$ であるため、既存の装置で配線することができる (Laser Focus World オンライン記事「NICT researchers show world-record 159 Tbit/s transmission over 1045km with three-mode optical fiber」(http://bit.ly/2018techreview19) 参照)。

19 成形されたフェムト秒レーザーパルス：超高速レーザーは、材料加工の分野に広く浸透している。物質を溶融するのではなく除去するパルスを生成することにより、クレーターやデブリは、ほとんどあるいはまったく生じない。中国北京理工大 (Beijing Institute of Technology)、米ミネソタ大 (University of Minnesota)、米ネブラスカ大リンカーン校 (University of Nebraska-Lincoln) の科学者らは、フェムト秒

レーザーパルスを成形して、超高速微細加工の品質を向上させ、これらの加工処理を詳細にコンピュータモデル化している。研究者らは、フェムト秒パルスを時間的および空間的に成形し、電子格子結合に固有の時間スケールよりもパルス遅延分だけ短いサブパルスを生成する実験を行った。多数の非常に大きなメリットが、結果として得られている。一例として、マイクロチャンネル作製の加工効率は 56 倍となり、マイクロチャンネルの最大アスペクト比は 3 倍となった (Laser Focus World オンライン記事「Shaped femtosecond laser pulses alter electron dynamics to improve ultrafast-laser micromachining quality」(http://bit.ly/2018techreview20) 参照)。

20 効率的な微小規模の核融合：コロラド州立大 (CSU: Colorado State University) の科学者らは、実験室における微小規模のレーザー誘導の核融合に成功した。中性子を利用した撮像技術や、中性子プローブによる物質の構造や特性の観察に、進歩をもたらす可能性がある。持続時間 60fs、最大エネルギー 1.65J、中心波長 400nm のパルスを、直径が 200 または 400nm の重水素化ポリスチレン (CD_2 : deuterated polyethylene) のナノワイヤのアレイに照射することにより、重水素同士の核融合 (D-D 反応) を起こした。1ショットあたりの最大中性子数は、1.64J のレーザーパルスエネルギーで約 3.6×10^6 個であるため、1ジュールあたりの中性子数は 2.2×10^6 個ということになる (Laser Focus World 英語版 4月号「Laser-heated nanowires produce microscale nuclear fusion with record efficiency」(http://bit.ly/2018techreview21) 参照)。