

# Laser Focus World、 2020年上位20のフォトニクス技術選定

ジョン・ウォレス

2020年のフォトニクスの進歩には、商用中空ファイバ、多目的深層学習（ディープラーニング）、材料加工向け最先端超高速レーザが含まれる。

Laser Focus Worldがカバーする技術は、おそらく大まかに「フォトン関連のもの」と分類できる。もちろん一定の前提条件があり、有用性、斬新さ、かなり高い技術レベルが含まれる。結果的には、Laser Focus Worldは単一市場に焦点をあてた種類の媒体誌ではない。むしろ、広い範囲の人間の専門技術をかなり熱心にカバーしている（ただし、フォトンに関する限りだが）。

従って、昨年技術成果の上位20リスト選定は難題である。われわれがカバーする技術と市場のタイプの間は、簡単に分割及び細分化されるため、各リストが20を超えるアイテムを含むからである。結果としての選定は、従って、われわれがカバーする技術と市場のサンプリングにすぎない。以下の選定は、大まかに任意のグループに分けられ、優劣のランキングはない。2020年フォトニクス領域に取り組んだエンジニア、技術者、研究者のスキルと発明性により、ここすべてのアイテムが最良のものであり、リストの最上位に来るべきものである（注：ここには、多くのディープラーニングとAI関連アプリケーションがあるが、主にイメージング関連である）。

## ファイバオプティクスにおける進歩

**1** 中空コア光ファイバは、フォトニックバンドギャップあるいは反共鳴などの現象を利用して、

空気充填コアに光を流す。数年の研究で、この種のファイバの光損失は大幅に低減された。このファイバの大きな利点の1つは、相対的に高いデータ伝送速度である。光は、ガラスよりも空気を通してのほうが伝搬速度は大幅に高くなるからである。今年、米OFS社は、特に高速伝送を重視する市場、つまり高頻度トレーダーを対象としたフォトニックバンドギャップ中空コアファイバを商業的に導入した（図1）。OFS社のファイバは、マイクロ波タワーとデータセンター間接続「ラストマイル」のマイクロ波伝送を置き換えることができる。ガラスファイバに対するそのスピードの優位性は、取引間の時間から価値あるミリ秒を削り、トレーダーの利益を増やす（参照“中空コアファイバは高頻度トレーダーに利益をもたらす”October 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev1>）

**2** ハイパワーレーザ光は、光ファイバにより、そのアプリケーションポイントまで簡単にダクトを通せる。しかし、手術やある種の材料加工などの中赤外アプリケーションで使用される既存のソリッドコアアルコゲナイドガラスファイバは、過熱するほどのエネルギーを吸収し、損傷を起こすことさえある。英サウサンプトン大のオプトエレクトロニクス研究センターとチェコのパルドゥビツェ大の、材料・ナノテクノロジーセンターで開発され

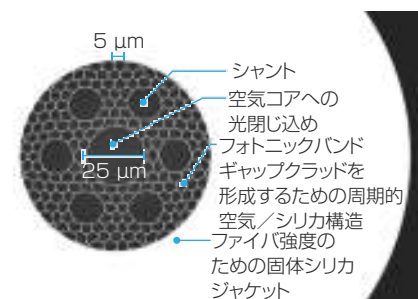


図1 中空コアフォトニック結晶ファイバの横断面は、コア、格子構造とシャントを示す。

た、中赤外バージョンの反共鳴中空コアファイバは、この問題を解決している。ファイバ外面が、フッ素化エチレンプロピレン（FEP）ポリマーで被覆されて耐久性が高くなり、湿気からファイバを保護する。テルライトガラスファイバ材料は、高い熱安定性があり、外気環境で合成可能である。そのファイバの動作は、シングルモードに近い（参照“中赤外向けテルライト中空コア反共鳴ファイバは、かなり曲げやすい”June 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev2>）。

**3** 超高速レーザ材料加工の世界では、ピコ秒、フェムト秒ファイバレーザが、現在、存在感が増してきている。これらのレーザでは、アクティブファイバそのものの特性が、パルスエネルギー向上を制約する。従来、パルスエネルギーを上げるためにファイバ径を大きくしてきたが、これら大きな有効モードエリア（LMA）ファイバのビーム品質は、ファイバベンディングに極めて敏感である。現在、テーパ型ダブルクラッドファイバ（T-DCF）増

幅器が、優れたビーム特性を持つハイパワーに有望である。欧州PULSEプロジェクトで開発されたT-DCFは、ファイバ線引き工程を利用して製造されたダブルクラッド光ファイバであり、ファイバ長に沿ってテーパーを形成している。欧州PULSEプロジェクトには、フィンランドのタンペレ大と同アンプリコンクス社 (Ampliconyx) が含まれる。コアとクラッドの両方ともテーパー状になっている。ファイバパラメータの変更結果は、ますます増加するコア径の増幅器チェーンであり、従来の小径、ダブルクラッドシングルモードファイバとハイパワー増幅に用いられるはるかに大きな径、ダブルクラッドマルチモードファイバの特性の組合せである。(参照“テーパー状ダブルクラッドファイバ:超高速ハイパワーレーザ加工の未来” May 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev3>.)

## 計測器が観察能力を高める

**4** スイス連邦ローザンヌ工科大のバイオメディカルオプティクス研究所で開発された超分解能光変動イメージング (SOFI) は、生物学向けの新しい顕微鏡技術である。これは、他の多色蛍光技術と違い、顕微鏡の多様なスペクトルチャンネル間のクロストークを奨励する。これにより、付加的に「仮想」スペクトルチャンネルを実現する統計分析が可能になる。ソフトウェアアルゴリズムが、点滅フルオロフォアの時系列の高次時空統計を統計的に分析する。結果として、個々のフルオロフォアの発光の分離が不要になる。一見複雑に見える技術は、実際にはフルオロフォア選択と実験を簡素化する。(参照“超分解能光変動イメージング顕微鏡はマルチカラー” July 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev4>.)

**5** シート蛍光顕微鏡 (LSFM) は、サンプル面を照射し、サンプルの2D部分を撮像する。LSFMの改善は、香港大のグループが行った。コード化ライトシートアレイ顕微鏡 (CLAM) という技術により、多数のライトシートからデータを同時取得でき、単一のライトシートでサンプルをスキヤニングすることに時間をかけることなく、3D画像を得ることができるようになる。単一光源からの光は、2枚の鏡の間を跳ね回り、多数の光源となり、パス長差が光源間で非干渉になる (図2)。回転レチクルにより各光源に独自のコードを与える。レチクルは、個々のビームレットに異なる変調周波数を与える。すると円筒型レンズがライトシートセットを作る。最大40の同時ライトシートが実証された。(参照“コード化されたライトシートが蛍光容積イメージングを改善” June 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev5>.)

**6** 白色光干渉計は、超高精度3D表面計測の実績ある方法である。とはいえ、それから得られる情報は、拡張可能である。米KLA社は、干渉計3D光学プロファイラを開発した。これは、センサ融合技術を使い干渉計からのデータでマッピングされる色画像エリアを統合して、正確なカラー3D表面プロファイルマップを提供する。加えて、他のセンサからのデータを取り込んでさらに多くの種類のデータ統合ができる。白色光干渉計 (WLI)、位相シフト干渉計 (PSI)、True Colorイメージング (KLA社のブランド名)、及びステッチング (多くの隣接画像フィールドを統合し、より大きなフィールドを作る) を1つの光学プロファイラに統合して、フレキシブル電子デバイス、材料、製造工程の特性評価を行う。複

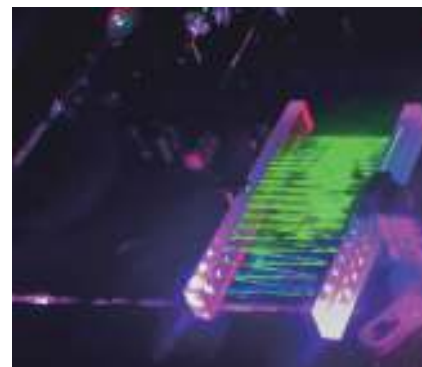


図2 コード化ライトシートアレイ顕微鏡 (CLAM) では、ほぼ並行な2枚の平面鏡の間でレーザービームを反射させることで、相互に非干渉な仮想光源の1セットを作成する。仮想光源は並行なライトシートを作ると同時に、生物学サンプルの全体ポリウムを照射する。(提供:ケビン・ツィア氏)

合 WLI+PSI 技術により、WLI よりも10倍以上高い垂直分解能が実現し、平滑面の特性評価に役立つ。同時に、カラー増強機能が付加される。例えば、導体層のインクジェットプリンティングでは、オーバーラップ領域は、True Color 画像では色変動が直ぐに見える。(参照“可視化3D光学干渉計で、フレキシブルエレクトロニクスの理解が向上する” September 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev6>.)

**7** 単分子顕微鏡は、完全なままの細胞内で個々の分子間の相互作用を調べることができる。しかし、これらの分子の相互作用は、既存の単分子顕微鏡で解像できるものよりも少なくとも4分の1のスケールで起こる。「単分子顕微鏡の位置決定精度が、通常20nmから30nmである理由は、実際のところ、その信号を検出しようとしている間に顕微鏡が動くからである」とカタリーナ・ガウス氏 (Katharina Gaus) は話している。同氏は、豪ニューサウスウェールズ大医学部のEMBL オーストラリアノード (EMBL Australia Node in Single Molecule Science) を率

いている。UNSWのチームは、安定性を1nm以上に、また位置決定精度を約1nmに改善した。これは、サンプルとステージ位置の間にフィードバックループを、またエミッションパスに自律的光学フィードバックループを挿入し、顕微鏡のEMCCDカメラの特性評価と色彩補正を行うことによるものである。UNSWチームが設計したフィードバックシステムは、既存の顕微鏡に適合している。(参照“自己整合顕微鏡は、超解像度顕微鏡の制約を克服する”Laser Focus World online [April 23, 2020]; <https://bit.ly/2020TechRev7>.)

**8** デジタル光ホログラムは、定量位相顕微鏡(QPM)システムで長期生細胞イメージングに使用されており、ここでは低レベル照射光が利用されている。細胞が自然環境で活動する際に細胞内解像度で細胞をとらえるためである。しかし、微光レベルは、低品質ホログラムになりがちである、つまり基本的なノイズ制約、ショットノイズにより粒子が粗く見える。オーストラリア国立大のチームは、Holo-UNetというニューラルネットワークを利用することでこの問題を回避した。これは数千の学習サイクルで訓練され、ホログラムのノイズを除去す

る。Holo-UNetは視野の位相物体エリアの並行強度フリンジに沿った変化を学習し、トレーニング後、余分な強度変化やショットノイズ関連の強度変化を除去し、フリンジ可視性を改善する。微光(サブミリ秒イメージング速度でほぼ真暗)を使ってもまだ、その設定は、ホログラムをほぼ完璧に回復することができる。(参照“ニューラルネットワークはショットノイズ制約のある顕微鏡ホログラムを改善する”October 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev8>.)

**9** ウィーン医科大学の研究者は、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)形式のディープラーニングを使い、眼科OCT画像を分割する。眼の涙メニスカスを認識するためである。涙メニスカスとは、まぶたが眼の表面を動くに従って変化する液体層。ドライアイ症状の患者は、異常なメニスカス形状があり、涙メニスカス量、高さ、あるいは曲率半径などの計測により定量化できる。そのような計測は、涙メニスカスが画像の他の領域から分離されていることが必要である。これはCNNが人よりも確実にできる可能性がある。2つの新しいアプローチがある。大きなOCT画像から涙メニスカスを分割するワンフェーズニューラルネット

ワークと最初に関心のある領域を選んで次により小さな領域から涙メニスカスを分離するツーフェーズニューラルネットワーク。両方とも、標準の画像処理と同様に正確であり、また大幅に高速である。(参照“OCT画像解析向けディープラーニング”May 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev9>.)

## 量子及び他の用途向け フォトニックデバイス

**10** 大規模CMOSプロセス製造フォトニクスを実現する可能性のある最初の集積フォトン光源は、英ブリストル大の物理学者チームが作製した。光源は、インターモーダル自然放出4光波混合(SWFM)に基づいており、ここではシリコン導波路を伝搬する光のマルチモードが非線形干渉し、シングルフォトン生成の理想的な条件を作る。標準的なSWFMと対照的に、インターモーダルSWFMは、強力なスペクトル反相関(量子オプティクス回路で必要となるものの反対)を持つフォトンを生じない。チームは、フォトニック量子コンピューティング用にそのような光源の利用をホン・オウ・マンデル(HOM)実験でベンチマークテストし、96%というこれまでに観察された最高品質のオンチップフォトニック量子干渉が得られた(図3)。HOMは、光量子情報処理の基本要素。そのシリコンフォトニックデバイスは、商用ファウンドリのCMOS適合プロセスで作製された。結果として、数千の光源が、単一のデバイスに簡単に集積可能である。研究者は、単一チップに数十から数百の量子光源を集積する計画である。(参照“シリコンフォトニックフォトン光源は、量子光技術向けのほぼ理想的な光源”July 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev10>.)

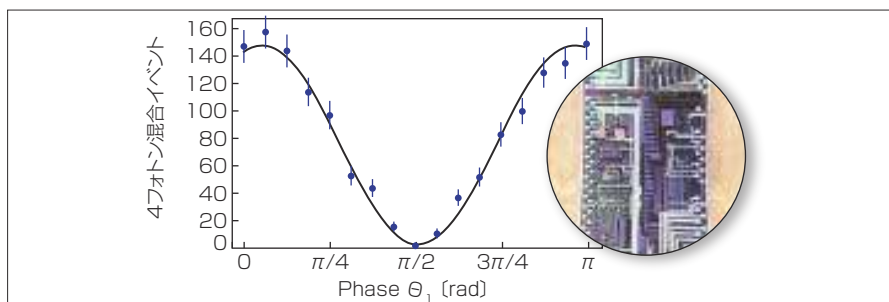


図3 発表済みのホン・オウ・マンデル(HOM)の結果を示す。縦軸は4フォトン混合イベント、また横軸は位相。このデータを得るために、2つの異なる量子フォトン光源を干渉させた(理想的には、この位相依存干渉曲線は、 $\pi/2$ 位相シフトでゼロに落ち込む)。プロット上の点はフォトンカウント、またエラーバーは1つの標準偏差を示す。実線フィットは、96%可視性に等価。挿入図は、研究で用いられたシリコンフォトニックチップ。



## 11 真の乱数生成器が、暗号データ通信には重要である。

いわゆる擬似ランダム数は、ソフトウェアアルゴリズムで生成可能であるが、そのような数で構築される暗号は、十分な時間があれば解読可能である。数字の生成がランダムでないからである。対照的に、真の乱数は、真のランダム物理プロセスに基づいた設定でのみ生成可能である。新しいフォトニクスハードウェアベースのランダムビット生成器が、世界にまたがる研究グループによって開発された。チップベースであるので、そのデバイスは拡張性があり、堅牢で小型、エネルギー効率が良い。その新しいデバイスは、超高速、100Tbit/sオーダーであり、これは以前の物理的ランダムビット生成器よりも2ケタ高速。その簡素なデバイスは、1個のガリウムヒ素/ヒ化アルミニウムガリウム (GaAs/AlGaAs) レーザダイオードと2個のフォトディテクタアレイで構成されている。この構成のレーザダイオードは、多数の時空干渉するレーザ発振モードを可能にするので、多くの時空干渉レーザ発振モードが可能になり、自然放出ノイズとなる、2つのフォトディテクタアレイは、ノイズを検知するためのものである。(参照“砂時計形状レーザダイオードキャビティが、パラレル超高速ランダムビット生成器になる”May 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev11>.)

## 12 シングルフォトンアバランシユダイオード (SPAD) を使う新世代イメージセンサ技術をベースにした初のMHzピクセルフォトンカウンティングカメラが、スイス連邦工科大の先端量子アーキテクチャ研究所 (AQUALab) の研究者により開発された。9.4 $\mu$ mピッチで、そのカメラのピ

クセルは、これまでに考案された最小SPADピクセル。ピクセル当たりの消費電力は1 $\mu$ W以下であり、同時にスピードとタイミング精度を維持している。その新しいカメラは、最大1秒に24000フレーム (fps) のスピードで画像を取得する。高度な集積回路技術を活用して、大規模ピクセルアレイに高速電気信号を極めて均一に分布した。シャッタ速度はMHzピクセルアレイでわずか3%の変動だった。カメラは、仮想現実とライドでの利用を想定した。(参照“フォトンカウンティングカメラは、メガピクセルSPADアレイであり、シングルフォトンTOF及び他のイメージング用”Laser Focus World online [April 16, 2020]; <https://bit.ly/2020TechRev12>.)

## 13 中波から長波赤外 (MWIR から LWIR) スペクトル領域は、環境モニタリング、ガスセンシング、サーマルイメージング、食品及び薬剤品質制御などを含むアプリケーションで重要である。

しかし、既存のMWIRとLWIRディテクタは、一般に複雑で高価である。硫化鉛 (PbS) コロイド量子ドット (CQD) が、CMOS技術適合、コスト競争力がある高性能フォトディテクタ技術として出現したが、それらは以前は、短波赤外 (SWIR) 域でしか成功を実証していなかった。今回、スペインのThe Institute of Photonic Sciences (ICFO) の研究者が、CQDディテクタを作製した。これは、初の水銀フリー材料でできたPbS CQDを使い、LWIRで光を検出できる。そのデバイスは、5~9 $\mu$ m域、80Kで10<sup>4</sup>A/Wオーダーでの応答性を持つ。そのディテクタのスペクトル範囲は、ドットサイズを変えることで調整可能である。CQDが大きければ大きいほど、IRにおける吸収

はますます遠赤外になる。(参照“量子ドットフォトディテクタは、今では長波赤外光を検出できる”Laser Focus World online [January 17, 2020]; <https://bit.ly/2020TechRev13>.)

## オブティクスと光学材料

## 14 多層光コーティング用薄膜成長プロセスは、特にイオンビームスパッタリング (IBS) では、コーティング歪みの原因になり得る。

その結果、下層の光部品に歪みを与え、それを反らせる可能性がある。現在、米コロラド州立大の研究者は、改善されたIBSプロセスを開発した。これは、薄膜成長中に、高エネルギーO<sub>2</sub>アシストイオン照射を使い、高い光品質の二酸化ケイ素 (SiO<sub>2</sub>) 薄膜を堆積することができる。残留応力は、490MPaから48MPaに低減される。その結果の狙いは、高反射率五酸化タンタル/二酸化ケイ素 (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>) 多層スタック製造改善である。特に、適応光学波面補償用薄型ミラーのためである。酸化物ターゲットからのSiO<sub>2</sub>膜は、45MPa残留応力で堆積され、光吸収は、1064nm波長で20ppm未満、時には9ppm未満が達成された。(参照“イオンビーム堆積二酸化ケイ素光学薄膜は、残留応力が10以下”Laser Focus World online [March 24, 2020]; <https://bit.ly/2020TechRev14>.)

## 15 赤外 (IR) サーマルイメージングは、軍、偵察、セキュリティコミュニティで頻繁に用いられている。

目的は、悪行を見分け、特徴を明らかにすることである。サーマルイメージングを欺くことは容易ではないが、米カリフォルニア大バークリー校の研究者は、これをする方法を開発した。視覚的な「おとり」を物体表面

に埋込み、おとりの表面が実際の温度とは異なるとIRカメラやシステムに思わせるのである。さらに、物体の温度が変わっても、おとりの表面の見せかけの温度は変わらない。その表面には、タングステン添加二酸化バナジウムの薄膜でできた特殊構造が含まれており、そこではタングステンのドーピングレベルが、コーティングの前から後へと変化している。二酸化バナジウムは、ある温度で絶縁体から金属へ位相シフトする。絶縁体は、伝導性を抑制し、金属は電気を通す。その構造にさまざまなレベルのタングステンをドーピングすると位相シフト温度が変化し、こうしておとりの温度は15℃から70℃のどこかにシフトする。また、おとり表面の放射率は、 $T^4$ の逆数の温度で変化するように設計されている。これは、まさに $T^4$ 依存黒体放射に対抗する。(参照“傾斜金属/絶縁体被覆は、偽の一定温度赤外画像を生み出す”Laser Focus World online [July 27, 2020]; <https://bit.ly/2020TechRev15>.)

**16** データセンターでは、コンピュータバックプレーンがプリント回路ボードを接続してコンピュータバスを形成している。ここで、バックプレーン通信法を電気から光に変えると、データ転送速度を大幅に向上させ、高性能コンピュータ(HPC)の実現に寄与する。中国の華中科技大学のグループが、高速、大容量、コンパクトな光バックプレーンを開発した。これは、ガラス基板上の光ポリマー導波路ベースであり、データ転送に850nm面発光レーザ(VCSEL)を用いている。そのバックプレーンネットワークは、8並列チャンネルで15Gbyte/sエラーフリー伝送を達成している。光バックプレーンでは、フィールドプログ

ラムブルゲートアレイ(FPGA)チップにより、チャンネルあたり10Gbit/sでエラーフリー処理される。実験プラットフォームを構築してバックプレーンのテストを行った。擬似ランダムビットシーケンス(PRBS)信号を光トランシーバで変調した。光信号は、カプラと4ポートの1×8並列ポリマー導波路アレイで伝送され、次に別のカプラで第2のトランシーバに伝送され、光-電気変換が行われた。最後に、ビットエラーレート補正が行われた。全4チャンネルで、ビットエラーはゼロだった。(参照“高性能コンピュータ向け光ポリマー導波路バックプレーンのビットエラーはゼロ”October 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev16>.)

**17** 物体が透明であるが位相に影響を与える顕微鏡など、ある種のイメージングシステムでは、位相情報の検出あるいは回復は、イメ

ージングプロセス改善に役立つ。位相回復は、強度情報に隠れた位相情報をコンピュータで回復する。これは従来型にも存在するが遅いので、使える量の位相情報を回復するには強力な計算が必要になる。米スタンフォード大の研究者は、ディープレジデュアルニューラルネットワーク(NN)に基づいた位相回復技術(図4)を開発した。これは、隠れた位相を抽出して一般的な点像分布関数(PSF)にする。NNがその情報を処理して、1から6オーダー(いわゆる2から28までのノル係数に対応)のゼルニケ係数を出力する。多数のPSFトレーニングが必要だった。20万では十分ではなく、最終的に2百万PSFに落ち着いた。そのアプローチは、ゼルニケではない位相情報の位相回復にも拡張できる可能性があり、また位相マスク設計でも役立つ。(参照“ディープニューラルネットワークは、3D点像分布関数から正確に位相情報を回復できる”January

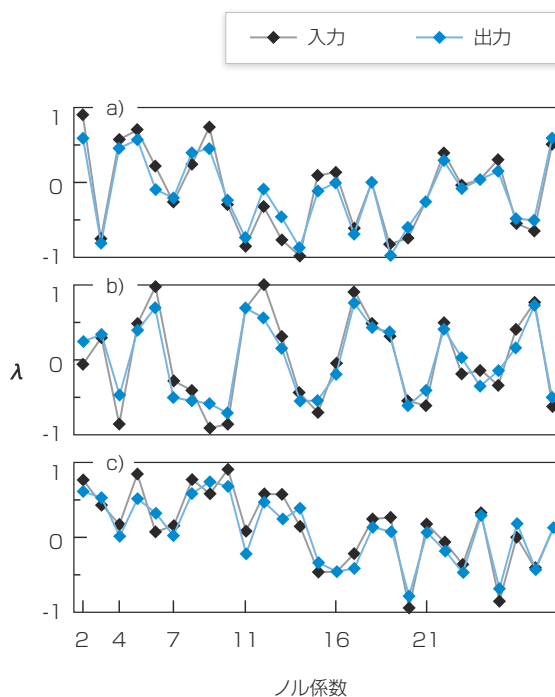


図4 ここでは、2~28までのノル係数に変換されたさまざまなゼルニケ係数の大きさが、ディープレジデュアルニューラルネットワークにより解析されたテストPSFの出力(青)が入力(黒)と比較されている。入力と出力ゼルニケが密接に一致していることがわかる。

2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev17.>)

## 他の厳選

### 18

前述のとおり、ピコ秒とフェムト秒ファイバレーザには、数々の目覚ましい資質があるが、最高平均パワー超高速光を得るには、バルク固体レーザに眼を向けなければならない。独Fraunhofer Cluster of Excellence Advanced Photon Sources (CAPS)の狙いは、超高速レーザのパワー限界克服だけでなく、パルス生成から加工技術までのプロセスチェーンに沿った技術と実際のアプリケーションを開発することである。InnoSlab技術(コリメートされたレーザダイオードによる縦方向励起の2つのヒートシンク間の矩形結晶)を使い、超高速増幅器が構築された。これは、500kHzで1mJ強の圧縮パルスを放出し、平均出力は530Wである(図5)。ガス充填ヘリオット型セルを使い、研究者は、590fsから30fsへのパルス幅短縮を実証した。エネルギー損失は5%以下だった。CAPSプロジェクトは、超高速レーザ平均出力10kWから20kWを狙っている。(参照“産業アプリケーション向け、キロワットパワーの超短パルスレーザ光源”January 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev18.>)

### 19

半導体コンポーネントのプリンティングは、比較的新しい工程であるが、オプトエレクトロニクス産業はすでに、プリントされたOLEDディスプレイとフレキシブル太陽電池の製造に巨額投資をしている。独カールスルーエ工大の研究者は、プリント可能有機フォトダイオードデバイスを開発した。これは、色を検出ことができ、可視光通信(VLC)や

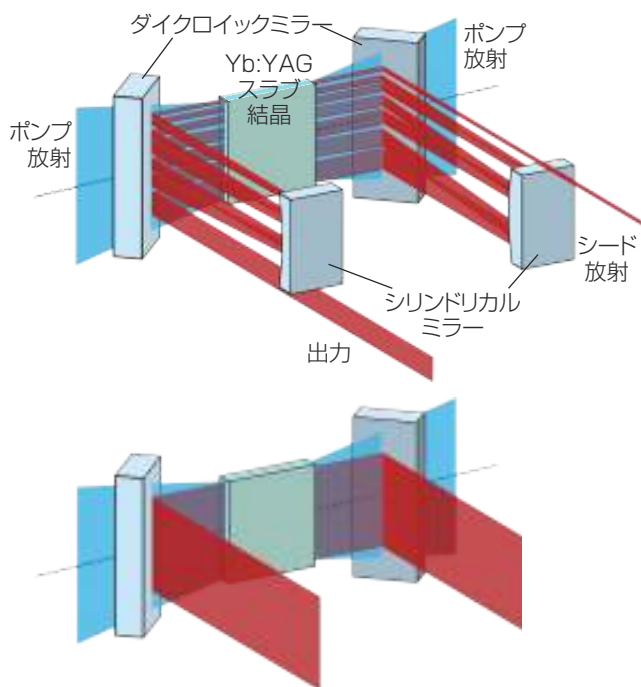


図5 7パス構成500WクラスInnoSlab増幅器、利得=53(上)。500Wクラス、シングルパスInnoSlabパワーブースタ、利得=2(下)。

他のアプリケーションに有用である。そのフォトディテクタ分子は、非フラーレンアクセプタ(NFA)で構成されており、透明ポリインデノフルオレン-8-トリアールアミン(PIF)ポリマーマトリックスに埋め込まれている。異なるNFAは、異なる色吸収バンドとなる、例えば赤や青緑。研究者は、色選択有機フォトディテクタの実証として、デュアルカラーVLCシステムをインクジェットプリントした。研究者によると、その非常に簡素な設定は、3.5Mbit/s伝送が可能である。(参照“簡素なインクジェットプリントの色選択有機フォトダイオードは、光学フィルタ不要である”March 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev19.>)

### 20

世界で約200万人の人々が、網膜色素変性症に苦しんでいる、これは不治の変性疾患で、網膜の光受容体を損傷し、最終的に失明する。米ラムダビジョン社(Lambda

Vision)は、構造化バクテリオロドプシンベースのインプラントを開発している。これは、光受容体に不治の損傷を持つ患者に高品質の視覚を回復する可能性がある。そのデバイスでは、単分子厚のバクテリオロドプシンがポリカチオンポリマーで覆われている。複数の同じバクテリオロドプシン/ポリカチオン層を成長させ、完全なインプラントを形成する。内在的な静電力が分子を整列し安定させる。さらに結果としての配向多層アーキテクチャが光を吸収し、網膜刺激に十分なイオン勾配を生成するために必要な吸光度を持つ。桿体または錐体の電気光学特性を模倣することに加えて、眼の周囲環境が周期的バクテリオロドプシンプロトン励起メカニズム順応に必要なプロトンを提供する。外部パワーは全く不要である。(参照“自己出力人工網膜は、光活性化タンパク質を利用して「有意の視力」を実現する”August 2020 issue; <https://bit.ly/2020TechRev20.>)

LFWJ