# 科学者と技術者：その活発な連携

ジョン・ウォレス

**応用研究とエンジニアリングに対するR&Dは途切れることがない。2010年は、技術革新の流れがまさに激流となった1年であった。**

2010年、あまり公表はされていないが、フォトニクス分野では数多くの興味深い成果が達成され、その技術革新の量と質は素晴らしいものであった。

光は紫外-可視-赤外、赤-緑-青、近赤外-中赤外-遠赤外などの定義が示すように、容易に分類できるが、光デバイスの分類は容易ではない。2010年に達成されたフォトニクス分野の多数の技術革新も、イメージングや光源などの伝統的な方式にしたがって分類することはできる。しかし、本稿のレビューのように、多数の成果を少しずつ簡潔に記述しようとすると、異なる分類の仕方が必要になる。これは一つには、昨年得られた多くの成果が、いずれも一つではなく多数の光技術の組合せから生まれていることが理由に挙げられる。

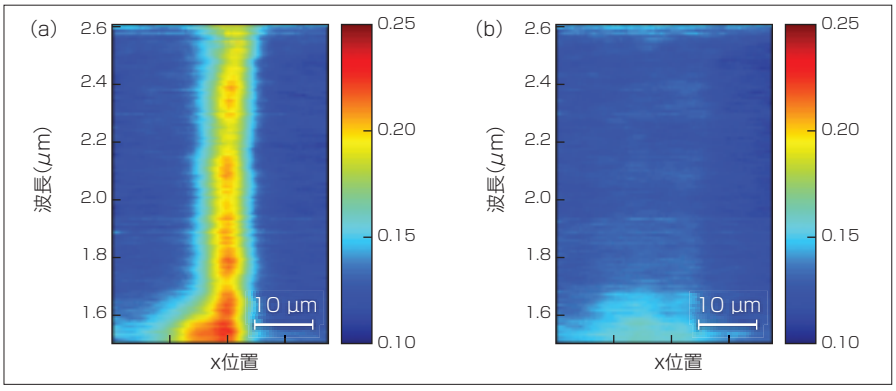


図1　（a）の暗視野画像は金のバンプを観測できるが、（b）の3D不可視クローク画像はバンプが隠蔽されている。明視野画像でも同様の結果が得られる。（資料提供：カールスルーエ工科大学）

## 波長スケールのフォトニクス

光の重要な特性の一つは波長が小さいことにある。その結果、鮮明なイメージングや超高速通信が可能になり、機器の小型化が実現される場合もある。現在の光デバイスは光の波長特性をより深く生かした研究がさらに進み、数波長から波長以下の物理的サイズをもつ光デバイスも開発されている。

例えば、メタ材料を用いて可能になる魔法のような不可視クロークは、従来の2次元（2D）光領域だけの動作ではなく、3次元（3D）光波長を用いた動作にも成功している（**図1**）[1]。独カールスルーエ工科大学と英インペリアルカレッジ・ロンドンの科学者たちはレーザリソグラフィを使用して、高分子／空気のフォトニック結晶（PC）から成る3D「ウッドパイル」構造を作製した。この構造は特別に設定した充填率を利用することで金の反射体のバンプを隠蔽できる（このようなクロークは非常に珍しいように思われるかも知れないが、他の波長スケールの構造を組合せたクロークは実用的な手段になる）。このクロークは1.4～2.7μmの波長の非常に広い帯域幅と60°までの角度の無偏向光に対して動作することが注目されている。

スイス連邦工科大学チューリッヒ校（ETHチューリッヒ）量子エレクトロニクス研究所の研究グループが作製したサブ波長微小共振器レーザは、半径10μmの二つの半円形キャパシタから成る共振器空洞がインダクタとして動作する10μmのリンクに接続され、従来の電気的励起による微小共振器レーザではまったく不可能であった小さな有効モード体積が得られている。この量子カスケードレーザ（QCL）の利得領域は8μm、発振波長は207μmになる。研究グループによると、このような未来のレーザはモード体積をさらに縮小することが可能であり、その場合のレーザ発振は近赤外の波長領域になる。

暖かい白色光を放射する白色LEDは大きな需要を期待できるが、その発光効率は冷白色光を放射する白色LEDよりも低くなる。トルコのビルケント大学とシンガポールのナンヤン工科大学の照明研究グループは、ナノ結晶の量子ドット（QD）蛍光体を用いた暖白色LED

を開発した。この暖白色LEDは従来の暖白色LEDよりも高い発光効率が得られる。QDはセレン化カドミウムのコアと、長鎖アミンの被膜で覆われた硫化亜鉛のシェルから成り、緑色、黄色、橙色の光を放射する。このQD発光体を標準の窒化ガリウム系の青色LEDに集積して、約90の演色指数と3000K以下の色温度をもつ好ましい光が得られている。このQDはそれ自体が350lm/Wを超える記録的な光放射の発光効率を示している(この値は集積されたLEDからではなく、蛍光体から得られたことに留意して欲しい)。

適切な構造の表面を照射した光からは表面プラズモン、つまり金属表面上の電子のコヒーレント振動が生成され、光を操作するもう一つの方法が得られる。米リハイ大学、中国科学院と精華大学および米国立科学財団の研究グループは、有機材料の光起電力(PV)セルの性能改善を目的にして、短距離の表面プラズモンポラリトンモードを導波するナノホール穿孔銀膜の活性層を提案し、その偏光無依存ナノパタニング表面の設計とシミュレーションを行った[2]。彼らの計算によると、この構造のPV性能は39～112%の増加になる。

## 光の高機能化

発明の多くはそれ自体が魅力的だが、将来の実用性が予見される発明も数多い。また、それらが非常に初期の段階であったとしても、フォトニクスの進歩を加速し、多様な応用が生まれると予見される発明もある(これらは光技術の革新ばかりでなく、実世界にも役立つ)。

フェムト秒レーザによるマイクロマシニングは、長パルスや連続波(CW)レーザによるマイクロマシニングよりも大きな利点が得られる。そこでは物質の融解や蒸発ではなく、フェムト秒レーザによる化学結合の解離が起こるため、周囲に発生する損傷は非常に少なく、透明材料の加工も可能になる。このような加工は一般的にガウス分布の強度をもつビームを使用するが、仏フランシュコンテ大学とオーストラリアのマッコーリー大学の研究グループは、ベッセルビーム(「仮想アキシコン」を生成する位相マスクを用いて形成される)の使用を検討した。その結果、彼らは、ガラス内部に最大40のアスペクト比と最小2μmの直径をもつテーパなしのマイクロチャネルの穴あけに成功した(**図2**)。その後、彼らはさらに良好な結果を達成している[3]。研究者の1人のフランソア・クールボアジェ氏(François Courvoisier)は、「われわれは100:1のアスペクト比をもつ非常に長いナノチャネルが単一レーザショットで穴あけできることを実証した」と述べ、この技術を利用すると、直径200nmの周期ナノ構造の穴あけも可能になると指摘している。このグループは得られた結果をPhotonics West 2011の招待講演の場で報告する。

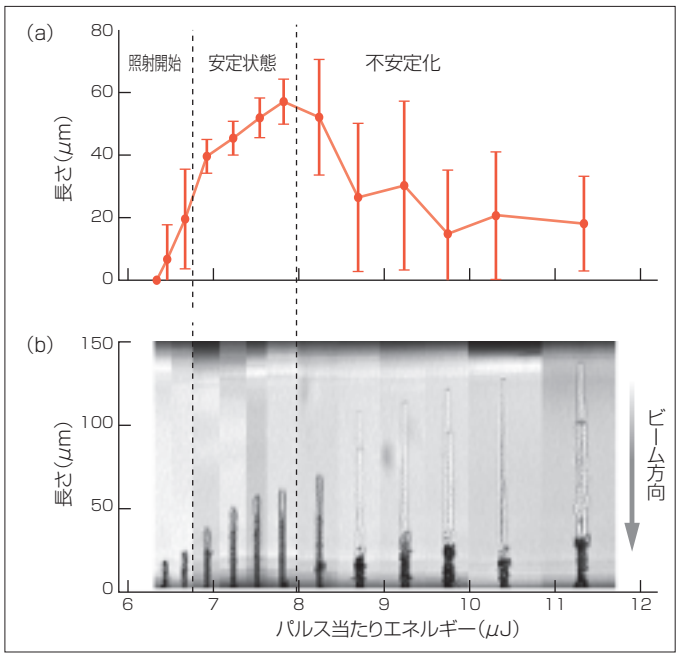


**図2** フェムト秒ベッセルビームを用いて形成したガラス内部のマイクロチャネルのチャネル長(a)とモルフォロジー(b)を示している。(資料提供:フランシュコンテ大学)

米プラナリティカ社(Pranalytica)、インフラサイン社(Infrasign)およびカリフォルニア大学ロサンゼルス校の技術者たちは、爆発物資(この場合はTNT)の痕跡量を最大150mの距離から約70までの信号対雑音(SN)比で認識できるレーザシステムを開発した[4]。このシステムは潜在的な問題があると考えられる対象物に対して波長可変炭酸ガス($CO_2$)レーザ光を照射する。10.653μmの光はTNTにより吸収され、黒体放射が増加する。10.591μmに同調された光はTNTによる吸収が起こらない。両者の光の差を求めると、曖昧さのないターゲット認識が可能になる。最初の試作システムを用いた試験は、爆発物の検出が今日の利用可能な技術に比べて数桁も高い感度で可能になることを実証している。同じ2波長を放射する室温動作の高パワー波長可変QCLからは、空港で人物とその所持品を透視し、爆発物と爆発残留物を認識する装置が開発されている。

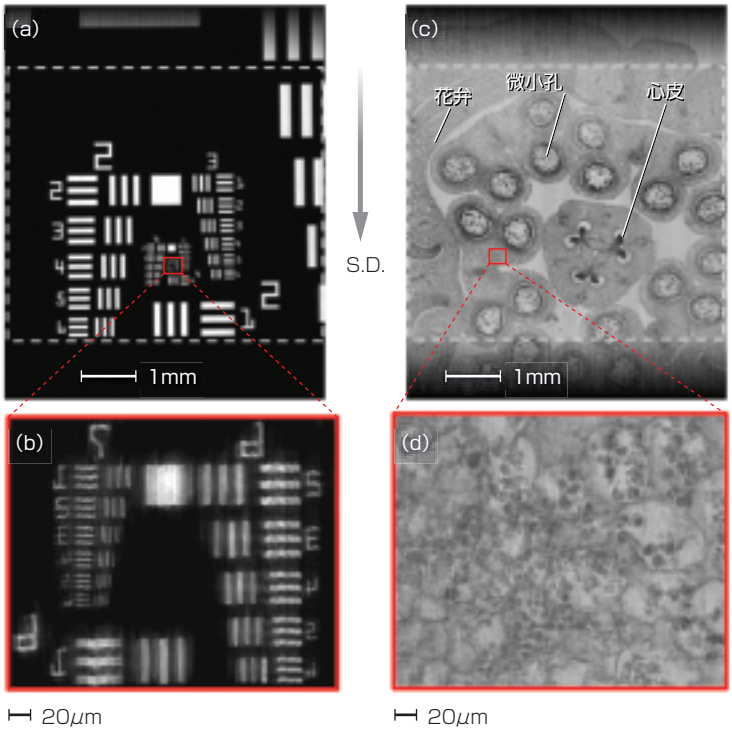


**図3**　ホログラフィック走査顕微鏡を用いて取得した6×5mmの有効FOVをもつ米国陸軍標識の画像（a、b）とユリの葯の画像（c、d）を示している。下の2枚の画像は上の2枚画像の一部をそれぞれ拡大して示している。下左の画像には投影された光スポット間のクロストークによるシャドウアーチファクトが現われている。（資料提供：Caltech）

英フィアニウム社（Fianium）などが開発を先導したファイバによるスーパーコンティニュアム光源は、分光法、顕微鏡法、光学計測などに有用な単一横モード白色光が得られる。現在、英サザンプトン大学とインドのガラス・セラミック研究所（Central Glass & Ceramic Research Institute）の科学者たちは共同して、マスタ発振器パワー増幅器（MOPA）励起スーパーコンティニュアム光源を開発している。この光源は0.4～2.25μmまでの比較的平坦な波長範囲において、これまでで最高となる39Wの平均出力パワーが得られている[5]。この光源は4.4μmのコア径をもつ長さ2mのPCファイバと114.8MHzの繰返しをもつ21psの入力パルスを使用する。研究グループによると、ファイバにエンドキャップを取付け、ファイバを短くすると、吸収損失が減少する。

米カリフォルニア工科大学（Caltech）が開発したホログラフィック走査顕微鏡と呼ばれる新方式の顕微鏡は、高い空間分解能を維持しながら視野（FOV）を大幅に拡大できる（**図3**）。これはホログラフィを使用し、532nmレーザ光の200×40スポットから成る光スポット格子を試料に照射し走査することによって実現され、6×5mmのFOVをもつ全体画像を2.5秒で取得できた。0.74μmのスポットサイズからは1.5μmの分解能が得られた。試作された最初の顕微鏡は焦点のフィードバック制御をしていないが、フィードバック制御を取入れて走査ジッタを減らすと、システム性能のさらなる改善が可能になる。研究グループのジガン・ウー氏（Jigang Wu）によると、将来の応用にはデジタル病理検査も含まれ、そこでは顕微鏡スライドの画像化とデジタル化が行われる。また、広いFOVが診断に役立つ血液やパップスメアの直接撮像と検査も行われる。

太陽電池の検査の高速化を目的にして、シリコン（Si）の光ルミネセンスイメージング技術が開発されている。この技術はオーストラリアのニューサウスウェールズ大学が特許を取得し、スピンオフ企業のBTイメージング社（BT Imaging）が実用化を果たしている。現在、世界中の太陽電池メーカーでこの技術の普及が進んでいる。ウエハから切断されたSiブリック（面積240×15.6mm）と、完全に加工された太陽電池を測定できる。高速の画像処理が行われ、ウエハは毎時2400枚のスループットで走査される。この技術はPVメーカーのインライン監視に使用されようとしているが、将来は半導体やLED産業分野への応用も期待される。

## 光ファイバの多彩な応用

固体コアPCファイバは内部全反射に基づく導波ではなく、すべての光がバンドギャップの存在に厳密にしたがって導波される。現在の固体コアPCファイバはオクターブに広がるバンドギャップがあり、オーストラリアのシドニー大学のグループが作製したファイバには、低屈折率の領域を取囲む高屈折率のリングから成る介在物が含まれている。その結果、導波モードの遮断は特定の波長に集中し、バンドギャップが大幅に広がる。OSA主催のFrontiers in Optics 2010（FiO：2010年10月24日～28日）では、550～1720nmまでの広い透過バンドをもつ高分子ファイバが報告された（セッションFTuW2：1050nmと1170nmには介在物の高次モードによる二つの狭い中断が生じる）。

また、FiO 2010のセッションFTuW1では、米クレムソン大学と米ノースロ

2011

# Strategies in Light®

*The Largest and Fastest-Growing HB LED & Lighting Events Worldwide*

February 22–24, 2011
Santa Clara Convention Center, Santa Clara, CA USA
www.strategiesinlight.com

**REGISTER TODAY!**
SPECIAL BONUS GIFT OFFER
FREE EXPO PASS The Biggest Exhibit Floor Ever!
Record-Breaking Attendance 4-Years Running

# Transforming the LED & Lighting Markets

Participate in the 12th Annual Conference & Expo for the HB LED and Lighting Industry

CONFERENCE & EXPO

## FEATURED SPEAKERS

Aldo Kamper
CEO
OSRAM Opto Semiconductors

Mike Holt
CEO
Philips Lumileds Lighting

Robert Karlicek
Director
Rensselaer Polytechnic Institute

Patricia Glasow
MIES, LC, IALD
Auerbach Glasow French

Nancy Clanton
PE, FIES, LC, IALD
Founder and President
Clanton & Associates

Ella Shum
Director of LED Research
Strategies Unlimited

## EVENT HIGHLIGHTS

- NEW! LED 照明製品を展示する Light and Design Pavilion
- ベンチャーキャピタリストや投資銀行家に向けた Solid -State Lighting Investor Forum
- HB LED Market カンファレンス・トラック
- 照明デザイナー、建築家、施工会社、照明器具メーカーに向けた LED in Lighting カンファレンス・トラック
- ワークショップやチュートリアルも開催！

Visit www.strategiesinlight.com for up-to-date information on the conference, exhibitors, and other event activities.

Presented by: strategies unlimited.
Flagship Media Sponsor: LEDs MAGAZINE
Events: Strategies in Light WORLDWIDE USA · Europe · Japan · China
Owned and Produced by: PennWell

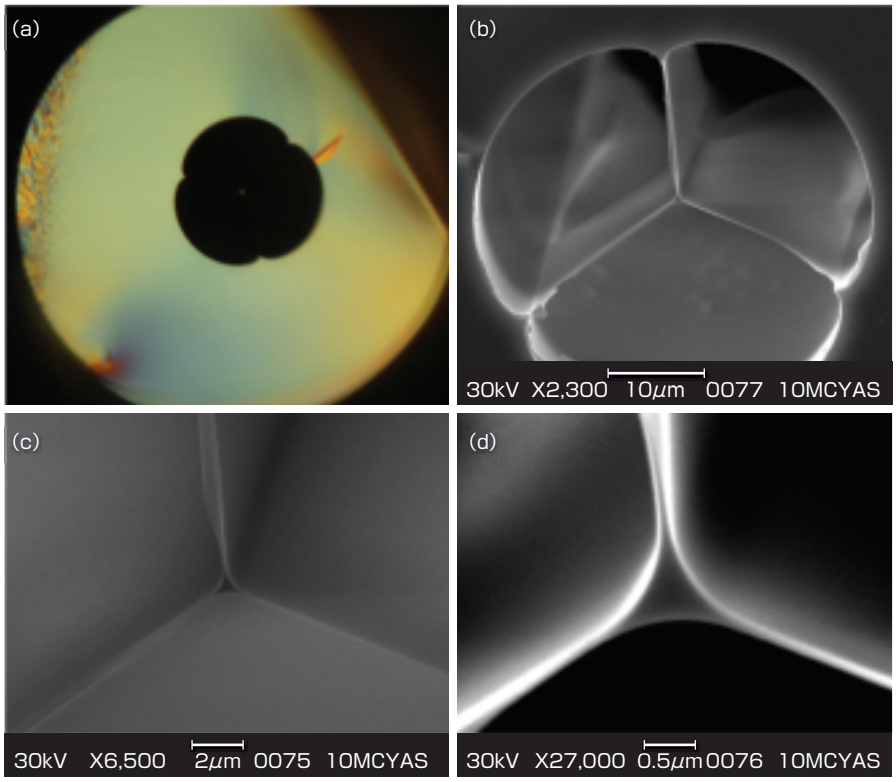


**図4** 480nmのコア径をもつ懸垂コアファイバ断面の光学顕微鏡による画像（a）と走査電子顕微鏡による倍率の異なる画像（b～d）を示している。（資料提供：豊田工業大学）

ップグラマン・スペーステクノロジー社（Northrop Grumman Space Technology）による共同研究を中心にして、クレムソン大学のジョン・バラト氏（John Ballato）が半導体コア - ガラスクラッド光ファイバの進歩を報告した。このようなファイバは赤外線パワー伝送と非線形ファイバ光学への応用可能性がある。一元系（Siとゲルマニウム）および二元系（アンチモン化インジウム）結晶の半導体コアファイバが溶解コア法を用いて作製された。これらのコアは非晶質になると予想されていたが、試作ファイバの結晶性は高く純粋な結晶相を示した。数mから200mまでの長さに線引きされたファイバは多結晶になったが、局所的には単結晶となり、ゲルマニウムコアファイバの場合は最長15mmの長さをもつ単結晶が得られた。Siのラマン利得はシリカの約$10^4$倍になり、このSiコアファイバは3～5μm波長領域のラマン増幅器に応用できることが分かった。この波長領域には大量破壊兵器として使われる化学物質の吸収スペクトル線が含まれる。

懸垂コアファイバは小さな固体コアと大きな気体充填領域から成り、コアが十分に小さければ、懸垂ナノワイヤとなり、興味深い非線形光学効果を示す可能性がある。豊田工業大学の研究グループは、ガス圧力膨張法を使用して、懸垂鉛ケイ酸塩ガラスコアナノファイバを作製した。このファイバはコア径に対する穴直径の比が62以上、コア径が480nm、長さが数百mであった（**図4**）。1557nmの光損失は8±2dB/mとなり、1557nmのフェムト秒レーザを用いて励起すると、単一モードの第3高調波発生（THG）が実現された。

現在の光ファイバ通信の分野では、より高いデータ伝送速度を達成するために、光信号の振幅ばかりでなく、位相も符号化する方式が設計されている。しかし、従来は問題ではなかった非線形位相雑音が発生し、この雑音が性能に対して基本的な限界をもたらす。このことに対応して、サザンプトン大学、スウェーデンのチャルマース工科大学、アイルランドのユニバーシティ・カレッジ・コークとエブラーナフォトニクス社（Eblana Photonics）、デンマークのOFS社、およびギリシャのアテネ大学の研究チームは、二値位相符号化光信号からの位相雑音と振幅雑音の両方の除去が可能になる初めての全光再生器を開発した。研究チームによると、このデバイスは位相有感増幅器の位相スクイージング機能を利用して40Gbpsの信号動作を可能にしているが、それ以上の非常に高速の動作も期待できる。

## 技術を変換するフォトニクス

この場合の「変換」は「変換光学」（不可視クロークなどのメタ材料構造に起こり、電磁場座標を変換する特異な方法に基づいている）の意味ではなく、既存技術の変換の可能性をもつフォトニクスの新しい技術を意味している。

FiO 2010のセッションFMA1では、米マサチューセッツ工科大学（MIT）のカーメル・ロッチャイルド氏（Carmel Rotschild）がMITと米ミシガン大学の共同開発による非共鳴励起マイクロリングレーザの実験データを報告した。このレーザは太陽光による励起が可能であり、太陽電池用の発光性太陽熱集光器（LSC）として動作する将来性を備えている。既存のインコヒーレントLSCに対する利点の一つは、インコヒーレントLSCの場合の全方向への伝搬とは異なり、その集光がレーザ発振に基づくため、すべての光は同一方向に伝搬

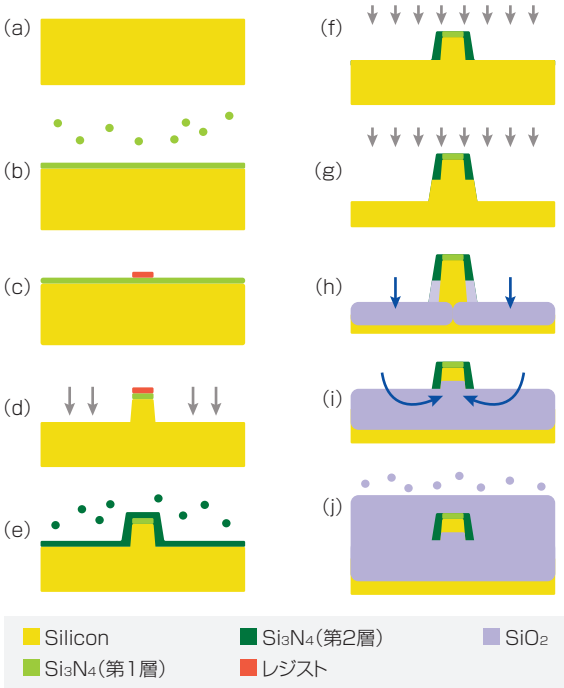


**図5**　Si導波路をSi基板から分離する湿式酸化プロセスを示している。(a)は酸化前、(b)は1時間の酸化後、(c)は6時間の酸化後、(d)は9時間の酸化後に相当する。(資料提供：コーネル大学)

し、光の一部が損失になることはない。このマイクロリングレーザの励起はインコヒーレント光からコヒーレント光へのエネルギー移動を介して行われる。ロツチャイルド氏によると、このグループは集光比が10になる可視領域の太陽光励起レーザを研究している。

カナダのINRS-EMT(Energy, Materials and Telecommunications Center of Institut National de la Recherche Scientifique)とオタワ大学の研究グループは、超高速の光高次複素場時間積分器を初めて作製した。このデバイスは難しく聞こえるかも知れないが(全光方式による光信号の1次および2次積分を2.5psの高速時間で動作する)、将来の光計算機回路や光学メモリの重要なビルディングブロックになる。この535nm近傍の波長で動作する積分器は一般のファイバブラッグ格子の設計に基づいて、任意次元光受動方式の時間積分器として機能する。研究グループのリーダを務めるモハマンド・H・アスガリ氏(Mohammad H. Asghari)によると、この積分器はテラヘルツ帯域幅の光学メモリばかりでなく、アナログモードで使用すると、任意次元の微分方程式を実時間で解くことができる。

もう一つの実用的で重要な集積フォトニクスとしての可能性をもつ開発では、米コーネル大学のニコラス・シャーウッド・ドロー氏(Nicolás Sherwood-Droz)他2名の研究者が、従来の複雑なSi・オン・インシュレータ製法への置き換えの可能性をもつ集積フォトニクスの製法を開発した。この製法は広く使われているマスキングと酸化の技術およびバルクSiを使用することで、完全なCMOS互換性を得ることができる。このプロセスは標準のCMOS生産ラインを使用できる。この場合のSi導波路は導波路の下にあるSiを摘み取る酸化法を用いて形成される(**図5**)。ドロー氏は「コンピュータの設計者が電子では不可能だが、光なら可能になるパワーと帯域幅の必要条件を見出すことは時間の問題だ。そうなると、このようなプロセスは多数の集積回路メーカーに採用され、生産ラインへの導入が始まるだろう」と語っている。

フルカラー(赤-緑-青)レーザプロジェクタは携帯電話メーカーの夢と言えるが、その実用化はコストが低下し、例えば、現在の周波数2倍化で実現している緑色レーザが直接発振方式の純緑色半導体レーザに置き換え可能になるときに初めて可能となる。米マイクロビジョン社(Microvision)は同社のピコプロジェクタの試作品に、緑色半導体レーザの開発をリードしている2社の試作品を初めて搭載したと発表した。マイクロビジョン社は緑色レーザの試作品を供給した企業名を公表していないが、公にされている情報によると、独オスラム社(Osram)、米カーイ社(Kaai、現在はSoraa)、日亜化学、ローム、住友電工の5社が純緑色半導体レーザを開発している。マイクロビジョン社のシド・マドハバン氏(Sid Madhaven)は、「5社の仕様はそれぞれ異なるが、われわれは510～520nmで50mWの出力パワーが得られることを観測した」と語っている。

Explay Japanも全半導体レーザ方式のフルカラーピコプロジェクタモジュールを試作している。同社によると、試作モジュールは852×480画素の空間分解能と14lmの輝度が得られ、画像の投影距離は20～200cmになる。このモジュールは7cm$^3$の体積と7mmの厚みを持つ。

米ソラー社(Soraa)の事業開発担当バイスプレジデントを務めるポール・ルディ氏(Paul Rudy)によると、同社の直接方式の緑色と青色の半導体レーザの開発は急速に進展して商品化に向っている。ルディ氏は「緑色レーザの場合、われわれは520～525nmの単一モードレーザから60mW以上の出力パ

ワーの連続波が約2%のウォールプラグ効率（WPE）で得られることを確認している。青色レーザの場合は750mWの出力パワーをもつ単一モードレーザを23%以上のWPEで実証し、1万時間レベルの寿命を推定している」と語っている。

基礎研究の分野では、独チュービンゲン大学の科学者グループが失明患者の網膜の背後に、外部の電力で動作する光有感マイクロフォトダイオードアレイの埋め込みを行った（**図6**）[6]。このフォトダイオードアレイは患者の眼球を通して受光し、網膜細胞を刺激して、画像を38×40画素の分解能で生成する。被験者実験では3名の失明患者がテーブル上の物体位置を認識した。失明後、数年経過していたある患者は、ナイフ、フォーク、種類の異なる果物などの物体名を当て、大きな文字で書かれた単語を全て読取ることができた。

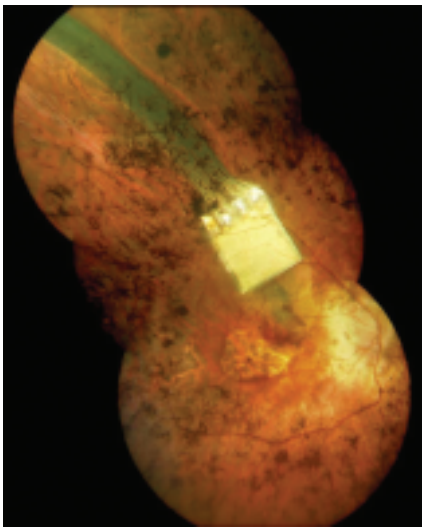

**図6**　網膜下のインプラントによって、失明患者が再び見ることができる。（資料提供：インプラントAG社）

## 極めて特殊なフォトニクス

最後に、光の物理学の一部であり、また、そうなると考えられる非常に奇妙な現象を示すいくつかの光デバイス（現実または理論上のデバイス）を簡単に紹介する。

中国の東南大学の研究グループは電磁「ブラックホール」を実験的に実現した。この素子は実際のところ重力効果がなく、マイクロ波領域の全方位光吸収体として機能する2Dメタ材料でできている。しかし、径方向に変化する誘電率が重力を模倣し、光子に作用する実際のブラックホールとして、すべての光を内部に取込む。この素子では18GHzの周波数をもつマイクロ波のすべての偏波が吸収された。

重力ブラックホールの基本的効果を模擬や模倣ではなく実際に発現させる光学実験装置では、イタリアのミラノ大学、INFNミラノセジョーネ（INFN sezione di Milano）、インスブリア大学、ミラノビコッカ大学と、スコットランドのヘリオット・ワット大学の研究グループが、レーザパルスフィラメントを使用して石英ガラス内部に移動性の屈折率ゆらぎを形成し、通常は重力ブラックホールの彼方でしか起こらないホーキング放射が実際に起こることを観測した。ホーキング放射は純粋な量子効果であり、何もないところから光子対が生まれ、その一つがブラックホールに吸い込まれ、もう一つが宇宙空間に放射される。実験室の場合は移動性の屈折率ゆらぎが量子真空から生成された光子対の分離を引き起こした。

まだアイデアの段階ではあるが、普通の光子が物質に吸収されずに隠れ光子と呼ばれる何らかの状態に変化し、その後に再び普通の光子に戻るという奇妙な現象が予測されている。その結果、光子は不透明な壁（ついでに言えば地球）を通過できる。このアイデアはひも理論から生まれたいくつかの予測に基づいている。この現象の発生を検証する実験では明るい光源が必要になる。独マックスプランク物理学研究所のダビデ・カダマロ氏（Davide Cadamuro）とハビエル・レドンド氏（Javier Redondo）は、太陽を光源として使うことを提案した。普通の光子から隠れ光子への変化が太陽の内部でも起きている可能性があることが、その背景にある[7]。この実験は太陽光利用隠れ光子探索と名付けられ、暗室内の高感度単一光子検出器を利用して行われる。さらに、太陽観測望遠鏡の観測データに基づく探索も予定されている。米ルイジアナ州立大学の科学者グループの提案には量子ウイアードの実験が含まれている。この実験は偏光干渉計を使用し、吸収損失と単一光路偏光回転角を厳密に設定して、光子を干渉計内で循環させる。すべてが適切に行われると、実験装置は量子仕掛けワイヤになり、光子に妨害や古典的干渉を与える物体がなくても、光路に侵入して横切る物体を検出できる。検出は100%ではないが、かなり高い確実性が得られる。しかし、実験装置の組立には至っていない。


**参考文献**

(1) T. Ergin et al., Sciencexpress.org, 10.1126/science.1186351（Mar. 18, 2010）.
(2) W. Bai et al., Opt. Exp., 18, 104（Nov. 8, 2010）.
(3) M.K. Bhuyan et al., Appl. Phys. Lett., 97,081102（2010）.
(4) A. Mukherjee et al., Appl.Opt., 49, 11（April 10,2010）.
(5) K.K. Chen et al., Opt. Exp.,18, 6（Mar. 15, 2010）.
(6) E. Zrenner et al. Proc. Royal Society B, published online before print Nov. 3,2010,doi: 10.1098/rspb.2010.1747.
(7) D. Cadamuro and J. Redondo, arXiv:1010.4689v1[hep-ph]（Oct. 22, 2010）.


LFWJ