

理科学用レーザの産業革命に関する再考

アラン・アシュミード、スティーブ・ブッチャー、マルコ・アッリゴーニ

理科学用ウルトラファーストレーザに産業グレードの信頼性を持たせることによって、期待どおりの性能を達成する研究用ツールが実現されている状況について、解説する。

産業用レーザ応用における何十年にも及ぶ経験と、より良いコンポーネントや材料を生み出すための垂直統合により、レーザメーカーは、産業グレードの信頼性を備えた理科学用レーザを構築できるようになった。米コヒレント社 (Coherent) では、信頼性が重視される他業界で長年にわたって用いられてきた、HALT/HASSという徹底的な信頼性コンセプトへの取り組みが、この目的の達成に役立っている (HALTは Highly Accelerated Life Testing[高加速寿命試験]、HASSは Highly Accelerated Stress Screening[高加速ストレス性能試験]の頭文字語)。例えば、2014年の Laser Focus

World誌の記事「産業用レーザの経験を経て変わる理科学用超短パルスレーザ」において、コヒレント社は、データ生産性の大幅な進歩に向けた道すじを切り拓くレベルの信頼性を備える、ワンボックス型のフェムト秒発振器に言及している。

ウルトラファーストレーザのように目まぐるしく変化する分野において、6年という月日は長いので、この産業革命のその後の進展とその状況、特に実際の理科学研究に与えた影響について、そろそろ評価すべき時期だと思う。2014年の続編となる本稿では、フェムト秒増幅器のさらに複雑で困難な領域に着目する。

チタンサファイア対 イッテルビウム

長年にわたり、チタンサファイア (Ti:サファイア) は、ほぼすべての超短パルス増幅器/発振器に最適な利得材料だった。しかし現在は、イッテルビウム (Yb) をドープした結晶またはファイバが、チタンサファイアの代替として確立されており、その動作能力を補完している。Ybには、レーザダイオードを直接かつ効率的に励起できるために、チタンサファイアよりも量子欠損が小さいというメリットがある。そのため、Ybのほうがコンパクトな構造になる。

応用分野の観点からの重要な相違点は、出力、パルスエネルギー、繰り返し周波数である。チタンサファイア増幅器は、高いパルスエネルギーを供給する能力で、他の追従を許さない。ターンキー式のチタンサファイア増幅器の短パルス (35fs未満) と組み合わせることにより、テラワットレベルに近いピーク出力が得られる。従ってこれらの増幅器は、強磁場物理学や、極端紫外線 (extreme ultraviolet: EUV) 用の高次高調波発生、またはアト秒パルス発生など、高いフルーエンスを必要とする用途に適している。

ワンボックス型のチタンサファイア増幅器は、1~10kHzの低い繰り返し周波数で最適な性能を示す。一方、Yb増幅器は、パルスエネルギーは低い、最大でメガヘルツレベルの非常に柔軟性の高い繰り返し周波数によつ

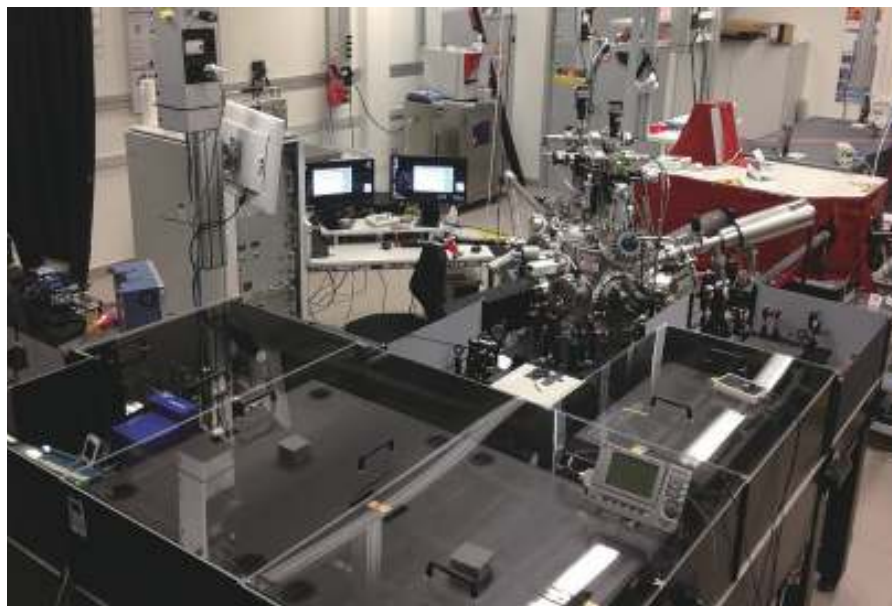


図1 チューリッヒ工科大において、Astrella増幅器は、内部温度が950°Cにも達する蒸着チャンバの近くに配置されているにもかかわらず、出力安定性を維持する。(提供: モーガン・トラッシュン博士)

て、はるかに高い平均出力(数十W)を達成する。従ってYb増幅器は、エネルギー要件は控えめだが高速データ収集を必要とする用途(イメージングや固体分光法など)や、高い平均出力が必須の分野(材料加工など)に最適である。また、新しい材料であることから、Yb増幅器のほうが性能改善の余地が多い。

本稿では、データまたは処理のスループットの面で、「産業革命」が日常的な性能、信頼性、生産性にもたらした影響を象徴する、4つの用途を紹介する。3つは理科学分野、1つは産業分野のものである。

熱安定性の課題への対処

強誘電性の材料や薄膜は、永久電気双極子に使用できるため(電氣的に分極していることを意味する)、電子素子や光学素子に既に広く用いられている。しかし、単位格子数個分ほどの薄さになると、より高密度の電子部品が実装可能になり、新しい独自の(原子スケールの)強誘電性ヘテロ構造を構成できる可能性もあるため、より詳しい情報が必要である。スイス連邦チューリッヒ工科大(ETH Zurich)のモーガン・トラッシン博士(Morgan Trassin)とマンフレッド・フィービヒ教授(Manfred Fiebig)が率いるグループは、エキシマレーザ(コヒレント社の「LPX 220」)を使用して、パルスレーザ蒸着による実際の成長過程における、初となる膜極性の*in situ*測定を行っている。

対称性や長距離秩序に途切れがある任意の材料において、強いレーザ光を放射すると、第二高調波発生(Second Harmonic Generation: SHG)が生じる可能性がある。この効果は過去に既に、厚みのある強磁性サンプルの診断として用いられている。しかしこれまでに、

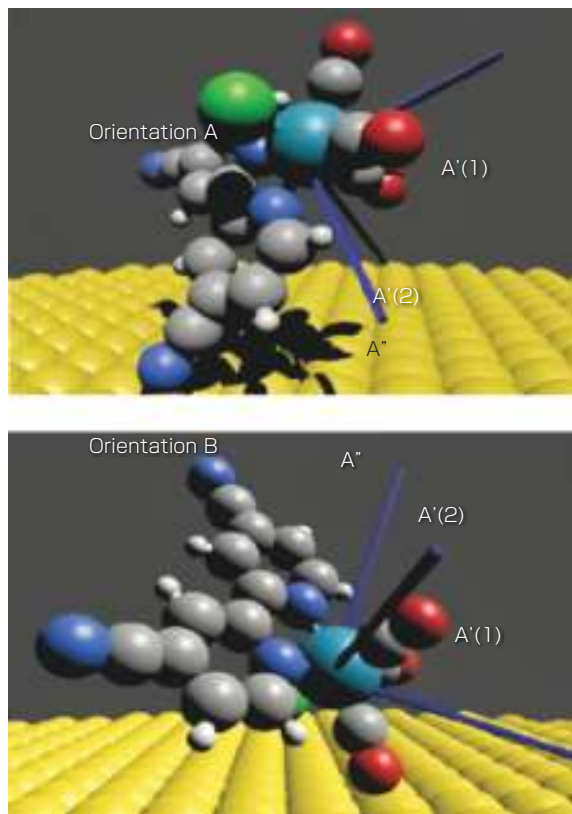


図2 HD 2D SFGデータと、反射モードの赤外分光法によるデータから判定された、金表面上の触媒の向き、密度汎関数理論(Density Functional Theory: DFT)を用いてシミュレーションした。Aの向きのほうが望ましい。青線は、振動モードの方向を表している。(提供:ウエイ・シオン教授)

膜成長過程における*in situ*高調波発生(In Situ Harmonic Generation: ISHG)が実際に示されたことはなかった。

「SHGは、分極の影響を非常に受けやすい。そこで、SHG信号の分極依存性を利用して、強磁性薄膜内のドメイン配置をマッピングできると考えた。また、さらに重要なこととして、エピタキシャル蒸着過程においてISHGが極薄膜の分極(または脱分極)に従う可能性を調査したいと考えた」と、トラッシン氏は述べた。そのSHG装置の光源には、チューナブルな光パラメトリック増幅器(Optical Parametric Amplifier: OPA)を励起するワンボックス型のチタンサファイア増幅器(コヒレント社の「Astrella」)が使われている。

この手法は成功し、膜の厚さがゼロから単位格子数個分にまで成長する過程の強磁性分極特性が測定可能であることが実証された。この成功に基づき、

トラッシン氏のグループは、ヘテロ構造のモデル素子に層を組み込む際の局所分極の向きを調べるために、この手法を適用している。

「産業グレードの信頼性」の影響はどこに現れているだろうか。「周辺温度の変化に対するこの増幅器の安定性は、われわれの取り組みにおいて特に重要である。これらの薄膜の成長は、内部温度が950°Cにも達する蒸着チャンバ内で行われるため、研究室の温度が日中大きく変化するのは避けられない(図1)。しかし、重要な増幅器出力(指向性とパワー)のパラメータは、幸いなことに影響を受けない」と、トラッシン氏は述べた。

数日に及ぶデータ収集: 2D分光法

2D分光法は、光信号をパルスの関数として2つの異なる光周波数で測定

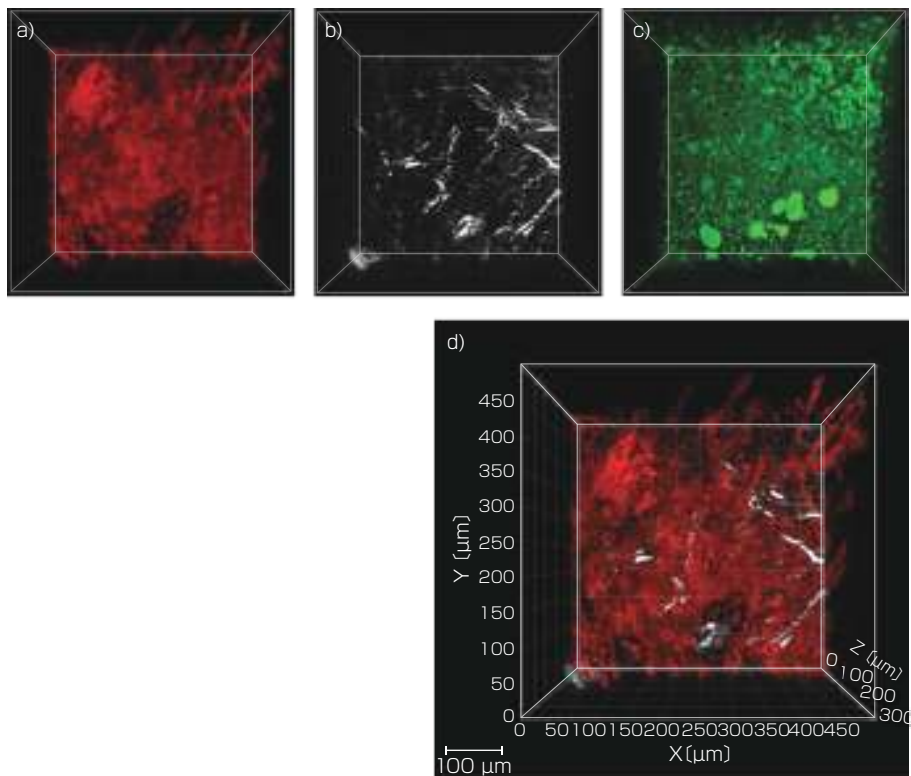


図3 波長1630nmにチューニングしたコヒレント社のMonaco/Opera-Fと、独ラビジョン社(LaVision)のTrim Scope顕微鏡を使って取得した、マウスのリンパ節のzスタック画像(z=300 μm)。(a)の赤色の画像は、波長595(±20)nmで検出されたtdTomato(蛍光タンパク質)の3光子励起。(b)の白色の画像は、波長810(±45)nmで検出されたコラーゲン繊維からのSHG信号。(c)の緑色信号は、脂質二重層、脂質、またはその他の異方性構造のTHGによるもので、波長525(±25)nmで検出されている。(d)は、tdTomatoとSHG信号の合成画像。

し、他の方法では取得不可能な豊富なデータを提供する。信号は、吸収、ラマン散乱、和／差周波発生など、さまざまな処理に基づく場合がある。データは、2つの周波数に対してプロットされた2次元の等高線グラフとして表現できるが、通常は時間領域データとして記録されてから、フーリエ変換によって周波数領域に変換される。一貫性を確保するために、この測定に必要な3つ(または4つ)の異なるフェムト秒パルスは、単一の光源から生成され、パルス整形回路によって、基本的に四光波混合効果がサンプルに適用される。チタンサファイアの短いパルスは、スペクトル帯域幅が非常に広いため、1つのデータセットで広い周波数範囲をカバーすることができる。

米カリフォルニア大サンディエゴ校(University of California, San Diego)のウェイ・シオン教授(Wei Xiong)が率いるグループは最近、2D分光法を

使用して、金の表面に単一層として結合された、異成分からなるCO₂削減触媒である Re(diCN-bpy)(CO)₃Clの調査を行った。実験は、和周波発生(Sum Frequency Generation:SFG)に基づいて行われた。この手法はもともと、シオン教授がマーティン・ザンニ教授(Martin Zanni)の研究室の大学院生だったときに開発したものである。SFGの振動信号は、表面と相界面にのみ生成される。従って、(溶液中の)非結合触媒の2Dスペクトルと比較することにより、シオン教授のグループは、触媒と金の結合状態(図2)と、結合構造に対するその影響を明らかにすることができた。

シオン教授は、産業グレードのワンボックス型増幅器(コヒレント社のAstrella)のシンプルな操作性を、本質的に困難なそれらの実験における主要なメリットとして挙げた。それと同等に重要なのが、長期的安定性である。

一部の時間分解実験(3DSFGなど)では、40時間以上の連続データが必要で、その間、増幅器出力は完璧に安定な状態を維持する必要がある。

神経科学:3光子顕微鏡法、光刺激、光剥離

2光子顕微鏡法と関連手法は、特に神経科学の分野において、ワンボックス型発振器の主要な市場セグメントであり、ワンボックス型のYb増幅器は現在、神経科学の新しい応用分野を開拓し始めている。ここでの主な応用分野は、3光子顕微鏡法、ニューロングループの光刺激、一部のニューロンの光剥離である。これらのすべてに、Yb増幅器の主要メリットである長い出力波長、高い繰り返し周波数、高い平均出力のうちの1つ以上が必要となる。例えば、光遺伝学的発現を用いた数百のニューロンの2光子光刺激には、高い出力が必要である。この出力要件は、



図4 Ybフェムト秒増幅器(コヒレント社のMonaco)によって切断されたワイヤ／ばねのサブアセンブリの例。(提供: モーション・ダイナミクス社)

多数の細胞の同時刺激と、空間光変調器(Spatial Light Modulator: SLM)のシステム損失に起因する。

3光子顕微鏡法は、3光子の同時吸収に依存する比較的新しい手法である。3光子の同時吸収は、確率の低い事象であるため、超短パルス発振器よりも増幅器からの高い光子束が必要である。走査画像処理として、多数のピクセルを取得するために高い繰り返し周波数も必要である。これに対しては、通常はYb増幅器にチューナブルOPAを組み合わせることによって、脳組織などの光を散乱する組織に深く浸透する、 $1.3\mu\text{m}$ と $1.7\mu\text{m}$ の波長ウィンドウにおける高出力を供給する。

ドイツリウマチ研究センター(German Rheumatism Research Center: DFRZ)のラルカ・ニースナー教授(Raluca Niesner)は最近、Yb増幅器(コヒレント社の「Monaco」)をOPA(同社の「Opera-F」)とともに使用して、リンパ節内部の3光子イメージングを行った。リンパ節には細胞が密集しており、2光子顕微鏡法では散乱の問題が生じる。

「私の研究グループの目的の1つは、悪性の炎症反応の理解を深めることである。それは、特に関節リウマチ、一般的には慢性炎症性疾患の原因となる」と、ニースナー教授は述べた。同教授の研究室のRakhymzhan博士に

よるマウス肢のリンパ節を対象とした予備研究では、3光子励起によってディープイメージング能力が大幅に向上することが示されている。具体的には、同一条件下において、3光子と2光子で最大イメージング深さが2倍以上増加した。図3は、典型的な画像を示したものである。

医療器具の精密金属切断

理科学用途と産業用途の両方で同じレーザーを使用することほど、理科学用ウルトラファーストレーザの産業化の成功を確実に示す証拠はない。本稿の締めくくりとして、Yb増幅器の柔軟性と、理科学分野と商業分野に対する「産業革命」アプローチの広範なメリットの両方を示す、ある産業用途を簡単に紹介する。

超短パルス幅のレーザーは、微細加工(切断、穴あけ、スクライブなど)に長い間使われてきた。短いパルス幅によって、熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ)が最小限に抑えられるためである。HAZとは、熔融／再凝固や微小亀裂といった望ましくない熱ダメージを示す、周辺材料の範囲のことである。対象材料における熱拡散時間よりもパルス幅が短く、切断や穴あけに伴う余分な熱の大部分が、周辺材料に拡散する前に、除去されるデブリ(加工屑)とともに放出される場合に、HAZは最小となる。

超短パルス(ultrashort pulse: USP)の産業用レーザーは最近まで、ネオジウム(Nd)ドープの利得媒体の帯域幅に制限されて、ほとんどがピコ秒レベルま

でにとどまっていた。しかし、一部の用途では、ピコ秒レーザーによる小さなHAZでさえも問題で、さらに短いパルス幅が求められていた。残念ながら、チタンサファイアに基づくフェムト秒増幅器は、高い繰り返し周波数と高い平均出力という必須条件を満たさない。そのため、最大60Wの出力を備えるYbフェムト秒増幅器の登場は、この状況を一変させた。最初にこのメリットを享受した用途の1つが、医療器具製造だった。

その顕著な例が見られるのが、米モーション・ダイナミクス社(Motion Dynamics)である。同社は、脳血管内手術用のステアラブルカテーテルなど、「難しい」サブアセンブリを医療市場向けに製造している。同社が使用するのは、定格出力60WのMonacoフェムト秒増幅器を装備する4軸切断装置(コヒレント社の「StarCut Tube」)である(図4)。モーション・ダイナミクス社のクリス・ウィザム社長(Chris Witham)は、「当社の製品には、金を含む、幅広い種類の金属の切断と穴あけが必要で、表面粗さとエッジ品質が重要となる。このフェムト秒レーザーにより、そうした部品のシングルステップでの製造が可能で、一般的に研磨などの後処理は不要である」と述べた。

上記のものを含む、多くの代表的な応用分野において、理科学用ウルトラファーストレーザの「産業革命」の成功は明らかに示されている。それらの応用分野は、この設計／製造アプローチによってもたらされた信頼性と安定性によって、実現されている。

著者紹介

米コヒレント社(Coherent)のリサーチレーザーシステム事業部の副社長、スティーブ・ブッチャー(Steve Butcher)は、同理科学市場担当マーケティングディレクター、マルコ・アッリゴニ(Marco Arrigoni)は、同先端システム事業部マーケティングディレクター。
e-mail: allan.ashmead@coherent.com URL: coherent.com

LFWJ