

フェムト秒レーザー： その始まりから産業応用まで

サミー・ヘンドウ

チャープパルス増幅法は高エネルギーの超短レーザーパルスを生み出し、その利用によって、多くの産業に恩恵がもたらされる。

2018年ノーベル物理学賞は、レーザー物理学における画期的な発明として、アーサー・アシュキン氏、ジェラルド・ムル氏、ドナ・ストリックランド氏に授与された。特に、ムル氏、ストリックランド氏に授与されたノーベル賞は高強度な超短光パルスの発生法に関するものである。この方法は、一般にチャープパルス増幅法(Chirped Pulse Amplification: CPA法) (図1)と呼ばれる。受賞理由は、CPA法の新規性が科学界において認められたというだけでなく、この技術がレーザー産業界に及ぼした影響の大きさである。現在、CPA法はフェムト秒パルスを生成するための主要な手段となっている。

より短い、高強度なレーザーパルスの生成、利用は常に高い関心がもたれてきた。しかし、そのようなパルスを固体増幅器や光学ファイバ中で高強度に増幅するには物理的な障壁がある。パルスの時間幅が短くなり、ピークパワーが高まると、光学的な非線形性が発生し、それによって材料内を伝搬できる光のピークパワーが制約される。光学非線形効果に起因するコヒーレント光散乱は増幅器の効率を下げる。しかし、さらに重要な事は、強いレーザーパルスの高いピークパワーが増幅システム内の部品材料の損傷しきい値に達して部品を損傷させてしまうことである。

CPA法では、長いファイバや回折格子対を使って、レーザーパルスを増幅前



大手自動車メーカー用の量産品自動車用ピストン。エンジン性能向上のためにフェムト秒レーザーで処理されたピストンである。

に時間的に長く引き伸ばすことで、これらの制限を回避する(図1)。引き伸ばされてピークパワーが下げられたパルスは増幅後も、増幅部品の光学損傷しきい値を十分に下回る。増幅後はパルスの長波長成分が短波長成分よりも短い光路を通過するように配置された格子対により、時間的に伸ばされたパルスを反転圧縮する。この概念は、高エネルギー超短レーザーパルスを作り出すため方法を提供し、多くの学術応用、ひいては産業応用の道を開いた。

背景

1990年代初期、研究市場ではチタンサファイアレーザーが多く使われていた。波長バンド幅が広帯域、かつ可変で、短パルス化、高エネルギー化が容易であるため多くの新しい応用研究が

可能になった。二光子顕微鏡に用いられる多光子イメージングはこの性能の恩恵を得た成功例の1つである。

上記の例は確かに成功だったが、この先端的な技術はそのサイズの大きさと複雑さで商業的な広がりを見せなかった。一方、光通信技術の発展に伴い、光ファイバを基盤とするフェムト秒ファイバレーザー技術は、チタンサファイアレーザーの欠点を部分的には改善した。しかし、当時の出力とパルスエネルギーは依然として低く、成功というまでには至らなかった。最終的には、ファイバレーザー技術の進展にCPA技術が組み合わさり、これまで得られなかった産業応用の可能性が拓けることとなった。

CPAの発明が公のものとなって以来、多くの学問分野と産業応用でこの概念が採用され、多くの驚きと成果をもたらしている。1991年、米カリフォルニア工科大のアハメッド・ズヴェイル氏は、フェムト秒分光を用いた化学反応中の遷移状態の研究によりノーベル化学賞を授与された。

科学研究用途以外の最初の際立った応用は眼科分野だった。高強度のフェムト秒パルスは、熱損傷を起さずに透明な生体組織を切除するために理想的な道具である。角膜フラップをフェムト秒レーザーで作成した後、角膜実質をエキシマーレーザーで成型する技術が、近視矯正として商業化された。

今日では、すべての工程にフェムト秒レーザを用いた角膜視力矯正が可能となっている。ファイバを基盤としたCPA(すなわちFCPA: Fiber Chirped Pulse Amplification)は、その高信頼性に基づいた光学性能から、このような先端的な眼科应用到に理想的であることが実証されている。

2000年初めの経済的な停滞によって、むしろ技術の発展に新しい道が開かれた。これらの中で最も興味を持たれたのが、高エネルギーレーザ光源であり、ファイバクラッド励起増幅や高エネルギー固体レーザへの興味が巻き起こった。これらの先端的な応用は、軍事目的などの物質の損傷解析だけでなく、部品や装置の検査なども含まれている。

材料加工

その間、材料加工においてピコ秒パルスレーザが、ナノ秒レーザよりも優れていることが認識されてきた。ピコ秒レーザを使えば、材料の熱損傷を抑えられるため、マーキング、穴明け、切断など、製造産業において採用されることとなった(2000年中頃まで)。

しかしながら、その材料加工技術が進歩してくると、その技術特性から多くの応用でフェムト秒レーザが“必要とされる”であろうことが既に認識かつ実証されていた。IMRAアメリカ社はFCPAに基づいたマイクロジュールレベルのフェムト秒レーザを2002年に材料加工用途で初めて発売した⁽²⁾。ファイバ技術を使ったFCPAは高いピークパワー、高平均出力値、高パルスエネルギーを持つフェムト秒レーザを構築するための一般的な手段となった。

一般的にフェムト秒レーザによって生じる熱影響領域(Heat Affected Zone: HAZ)は他のレーザと比較して

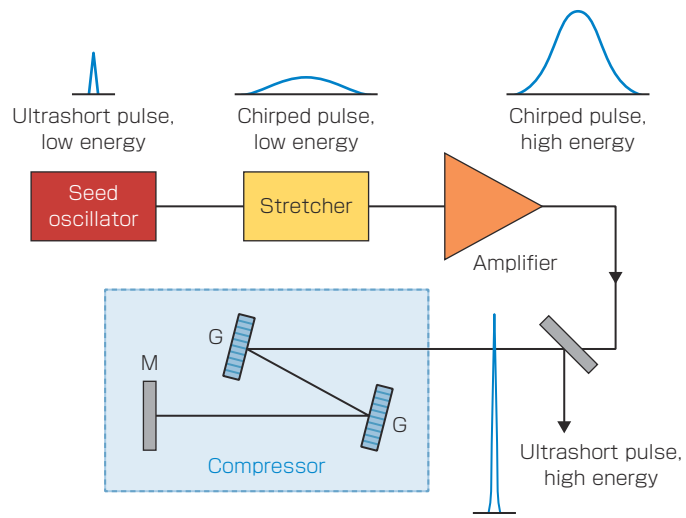


図1 CPAの仕組み(この図は1985年のストリックランドとムルの論文から引用⁽¹⁾)

極めて狭いため、家庭向けの精密電子機器やディスプレイといった産業において、FCPA技術は新たな応用を切り開いてきた。

高いピークパワーを有するフェムト秒レーザは、シリコンなどの半導体ウエハやその表面に堆積させた材料に対して熱的損傷を抑えたアブレーション加工を可能とすることから、フェムト秒レーザによる半導体切断は継続的に興味を持たれている。半導体ウエハの

切断部分にはTEG(Test Element Group)と呼ばれるチップ化前の信頼性試験のための回路が存在するため、レーザによる切断技術で一般的なステルスダイシング法を適用することができない。そのため、ステルスダイシングの前工程としてフェムト秒レーザは選択的にこの回路を除去することが検討されている。また、固くて透明なサファイアを基板とする高輝度LEDのチップ化においてもフェムト秒レーザの

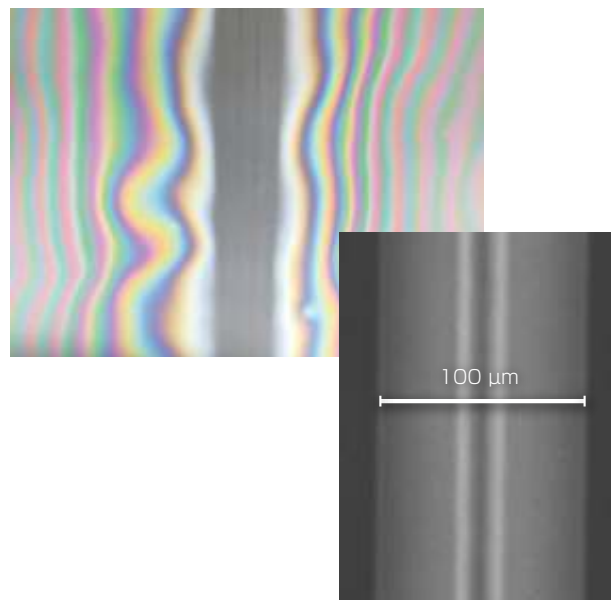


図2 フェムト秒レーザで溶接した2枚のガラス基板を上から見た写真。光学的な干渉縞(フリッジ)で囲まれた4本の垂直な溶接線が見える。右図はそのうちの1本の拡大図で、溶接幅は100μmである。

非線形吸収現象を利用することで切断が可能になった。

ガラス加工

家庭向け電子機器産業におけるガラスの切断や仕上げは、機械加工による方法がとられてきたが、フェムト秒レーザーによるガラス加工応用が注目されてきている。例として穴あけ加工が挙げられる。フェムト秒レーザーによって照射されたガラス部位はその屈折率が変化する。このガラスを酸性液に浸すことで、屈折率変化した領域だけを選択的に除去することができ、高アスペクト比の穴あけが実現できるのである。応用先としては高密度な3次元実装デバイスを実現するための各基板間の電極用インターポーザーが挙げられる。

その他の応用先として、酸化インジウムスズ (ITO) 膜やエレクトロクロミック膜などとして知られる、ガラス上の薄膜フィルムのパターニングや除去がある。

フェムト秒レーザーによるガラス溶接はフィラーなどの仲介剤 (光吸収接着材料) を用いることなく実現できるために大変興味深いものである。この技術は、マイクロエレクトロニクス産業において、電子機器の内部汚染やアウトガスの課題を取り除き、物質を吸収するために添加される不純物の使用を必要としない重要な技術に位置付けられる。フェムト秒レーザーによる溶接工程は、2つのガラス材を光学的に密着させ、レーザーを2つのガラス材間に集光照射させるだけで実現できる。この時、高ピークパワーのフェムト秒レーザーは、その集光位置において多光子吸収を引き起こし、部分的にガラスを溶解させることで2つのガラス材を溶接させるため、耐久性のある気密封止を実現する (図2)。



図3 このフェムト秒レーザーによってテクスチャ加工されたピストンは、大手自動車部品メーカーによって製造された。摩擦軽減と潤滑のためにスカート部分に表面のテクスチャ加工が施されている。

自動車産業

製造におけるフェムト秒パルスレーザーの使用形態は、進化し拡大が続いている。自動車産業は高い信頼性と安定性が必要な革新的技術を必要とすることから、特に興味深い領域である。例えばフェムト秒レーザーはエンジン部品のピストンの量産に使用されている (図3)。

自動車の燃費を向上させるためには、車両の軽量化と部品効率の向上が必要となる。エンジンは軽量であるアルミニウム合金で作られているが、これらの合金を使用すると、摩擦を減らし寿命を延ばすための工学的な設計が不可欠になる。そのために可動部品の表面にはテクスチャやハッチング加工が施され、摩擦の低減と耐久性の向上を図っている。フェムト秒レーザーによる表面クロスハッチングは、従来の機械的な刻み目や、より長いパルスのレーザーによる溝掘り、または表面ショットピーニ

ングなどと比較して油膜を効率的に拡散させオイル保持を著しく改善する。

この表面クロスハッチングは、シリンダーと接触するピストンスカート領域の大部分に適用された場合、未加工品と比較して2000rpmで最大25%まで摩擦を減少させることが示されている。また、フェムト秒レーザーを使用することにより、加工領域上のバリやデブリなどの発生が極めて少ないため、バリ取りや洗浄工程を排除することができるため、製造効率が改善されている。

医療から自動車に至るまでのさまざまな市場でのFCPAの商品化は、信頼性が高く革新的な製品を開発するための推進力となってきた。今後は、特定用途向けの信頼性と試験方法の標準化 (レーザー産業の試験標準とその試験方法の進化) が組み合わせられることで、要求の厳しい市場で止まることのないレーザーの運用が可能になっていくと考えられる。

謝辞

執筆に際し助言をいただいた Emily Grish と Jason Alexander に感謝する。

参考文献

- (1) D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun., 56, 3, 219 (Dec. 1, 1985).
- (2) See <http://bit.ly/femtosecondref2>.

著者紹介

サミー・ヘンドゥは、米IMRA アメリカ社の応用開発センター、副部長。
e-mail: shendow@imra.com www.imra.com