波長変換により拡がる産業応用

サイバーレーザー㈱
今鉾友洋

1 はじめに

第3回，第4回において波長変換によるレーザーや発生方法について述べたが本稿では主にその応用に関して記述する。近年，赤外域（Nd:YAG）等のLD励起固体レーザー（Diode pump solid state laser:以下DPSS）と波長変換技術を組み合わせた紫外コヒーレント光が注目されている。この動きは，エレクトロニクス業界における真空管からトランジスタへの技術革新かの如く，従来の微細加工等で用いられていたガスレーザーからの転換の展開を見せ始めている。一方，そのような紫外コヒーレント光の用途は微細加工のみならず高精度計測・検査等多岐にわたる。このように波長変換技術は紫外コヒーレント光応用だけであっても様々な可能性を秘めており，すでに産業・理化学応用においてレーザーにはなくてはならない技術となっている。

本稿の構成は2章において主に使われる波長変換技術とその応用を述べ，3章では波長変換技術の中で最も利用される"短波長化"による微細・高機能プロセッシングについて述べる。4章では近年紫外コヒーレント光とともに注目を浴びているフェムト秒レーザーと波長変換等で得られる紫外コヒーレント光の比較とすみわけについて述べ，5章はまとめる。

2 波長変換技術と広がる応用

波長変換は次式のフォトン間のエネルギー保存則に従う現象である。

$$\frac{1}{\lambda_1}+\frac{1}{\lambda_2}=\frac{1}{\lambda_3}\quad(\lambda_1,\ \lambda_2>\lambda_3)$$

この現象を使うことで入力の波長から別の波長をつくりだせるのである。どの波長をどの出力レベル，効率で発生させるか等の技術は単純なものから複雑な系まで様々である（第2回，第3回参照）。上式の3波混合はパラメトリック相互作用（parametric interaction）とも呼ばれており，3つの光のうち，どれを入射光，出射光とするかによって多くの種類がある。
その代表例の4つを図1に示す。

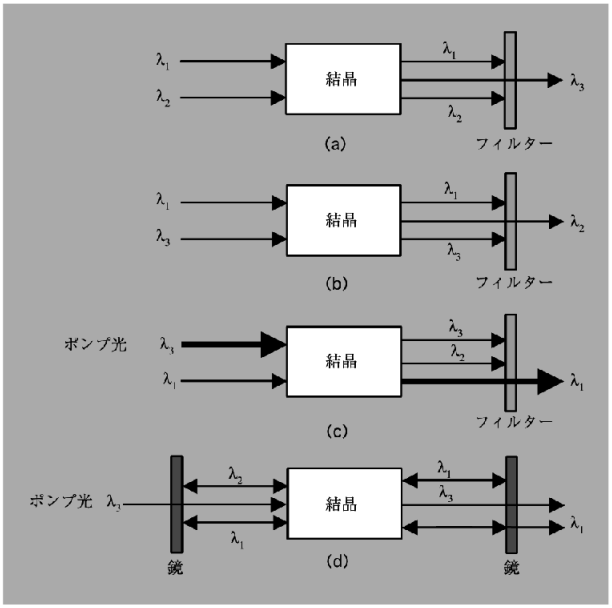

図1　3波混合（a）周波数上昇変換（b）周波数下方変換（c）光パラメトリック増幅（d）光パラメトリック発振

① 周波数上昇変換（up-conversion）
λ_1とλ_2の光を媒質に入射して，λ_3となる光を発生する。周波数fと波長λとの関係はf・λ＝c（光速）の関係が成り立ち，前式に代入すると周波数が加算される現象なので周波数上昇変換と呼ばれる。②は周波数が差分されるため下方変換となる。
② 周波数下降変換（down-conversion）
λ_1，λ_3を入射して，λ_2（$1/\lambda_3 - 1/\lambda_1 = 1/\lambda_2$）の光を発生する。
③ 光パラメトリック増幅（optical parametric amplifier）
2つの光を入射し，3波混合によりλ_3の光のエネルギーを使ってλ_1の光のエネルギーを増幅する。
④ 光パラメトリック発振（optical parametric oscillator）
パラメトリック増幅器を光共振器の中に入れ自励発振を起こさせるものである。
λ_1とλ_2の光を媒質に入射して，λ_3となる光を発生する。

他にも発生技術はあるが主に①～④のような組み合わせで自分の得たい波長を発生させるのである。中でも①はもっとも良く利用される技術であり，短波長化する際に利用される。その応用は，下記のような幅広い分野に広がっている。

▶微細加工応用：マーキング，トリミング，リペアリング，光露光等
▶精密計測応用：半導体検査，蛍光顕微鏡等
▶医療応用：PDT研究用等
▶レーザー自身の高機能化：OPCPA（フェムト秒増幅），フェムト秒波形計測等

3 波長変換がもたらす微細・高機能プロセッシング

年々，エレクトロニクスの小型化が進みより一層，微細加工のできるツールが求められている。その中で紫外コヒーレント光を発生させるDPSSレーザーへの期待・役割が拡大しつつある。

図2に主な金属の反射率特性を示す[1]。金属は短波長になるほど反射率の低下，すなわち光の吸収が高くなり加工が容易になるということである。これは，材料個々の電子の移動度が異なるということに起因している。

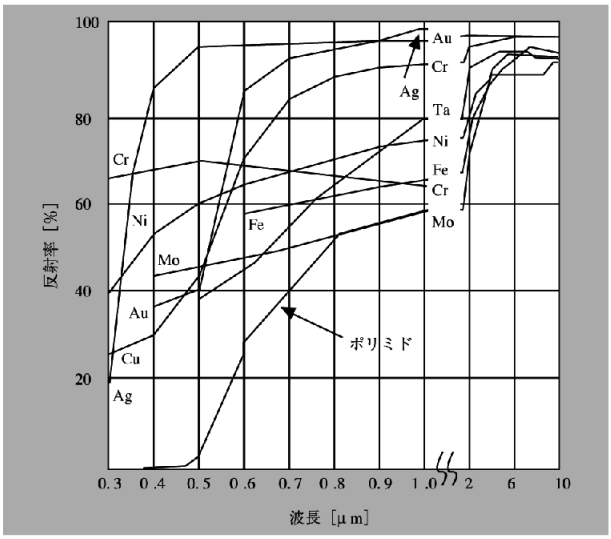

図2 金属とポリミドの反射率

レーザーの加工応用としてすでに機械式ドリルに代わってCO_2レーザーが穴あけで用いられている。しかしながら，CO_2レーザーは10.6 μmと波長が比較的長いため
・微小な穴径への限界（<直径10 μm）
・加工物への熱影響が大きい
ということがすでに課題となっている。そのため，熱的影響が少ない上，波長が短いということからより微小な穴あけができる紫外DPSSレーザーには多方面から期待が寄せられている。

このDPSSレーザーの波長変換による短波長化に対する競合といえばKrF（波長248 nm），ArF（波長193 nm）に代表されるエキシマレーザーなどのガスレーザーである。このようなガスレーザーは高出力で大面積の加工に適しているのだが，その中で紫外DPSSレーザーが近年注目されている理由として以下のことがあげられる。
・省電力
・省スペース

表1 CO_2，エキシマ，DPSSレーザーの特徴

	CO_2レーザー	エキシマレーザー	DPSSレーザー*
出力/効率	大出力/高効率	大出力/低効率	中・低出力/高効率
サイズ	大型	大型	小型
寿命	長い	短い	長い
メンテナンス	容易	難	フリー
加工穴径	10μm程度	<1μm	<1μm
加工物への熱影響	大	小	小

*DPSSレーザーは波長1μm以下のものと想定

・長寿命
・メンテナンス性

まとめるとCO_2，エキシマ，DPSSレーザーの特徴は**表1**のようになる。

以下に可視/紫外DPSSレーザーが適用できる微細応用例をあげる[1]。

ビアホール加工

電子回路の集積化に伴いプリント基板（PWB）の高密度化・多層化が進み，ビアホール加工はますます微細化する傾向にある。従来はCO_2レーザー，エキシマレーザーを用いて加工が行われてきた。集積化による基板の多層化に伴いCu層のスルーホール加工，100 μm以下の微細径加工，高速の加工スループットや低ランニングコストなど要求が高まっている。また，多層基板の材質をうまく選択することで波長の吸収の差による層の選択的加工が可能であろう。また，紫外光のLD励起固体レーザーは微細加工，非熱的，乾式かつ後処理なくできるのでこの分野での応用が急速に広がるものと期待できる。

レーザーマーキング

近年，PL法施行でチップ一つであっても製造者責任がより問われるようになっている。レーザーマーキングは製造情報（品名，商標，管理番号など）を製品に直接書き込むのに用いられ，クリーンで半永久的に書き込めるのが特長である。そのため，機械部品の金属材料から電子部品のICパッケージ，回路基板，キートップなどの樹脂系材料，半導体関連のウエハと幅広く応用されている。特にウエハマーキングではSi上に視認性が良く，かつ汚染物の発生が少ないクリーンな加工が求められている。紫外光によるマーキングは数μmの表層でエネルギーが吸収し非熱的であるため，その下の物質には影響を与えない。集積化の続く電子デバイス，コンタクトレンズ等の難加工物には特に有力である。

レーザートリミング

抵抗体（薄膜，厚膜）にレーザーで切り込みを入れ抵抗値をチューニングする加工である。一般にトリミングとはチップ抵抗の抵抗値を測定しながらレーザーで幅20 μmのL字カットを行い目標の抵抗値とするというものである。携帯電話等の移動体通信機器に代表される電気機器の小型化が近年急速に進んでおり，これらに搭載するチップ抵抗の小型化が一層進んでいる。そのサイズは1005型（1 mm×0.5 mm）から0603型（0.6 mm×0.3 mm）へと移行しつつある。抵抗体の材質は低抵抗体では金属成分，高抵抗体ではガラス成分が多い。トリミングの精度は数％以内で，高速の精密加工が要求される。また，高精度のトリミングにはエッジ部のスムーズさ，内蔵型であれば基板にダメージを与えないことが必須条件である。このため，金属・ガラスに比較的高い吸収があり，高ピークパワーで高繰り返しのレーザーが用いられはじめている。

レーザーパターンニング

主に液晶ディスプレイや太陽電池の電極などに用いられている透明導電膜やα-Si薄膜を加工するものであり，1m^2の大型基板を1m/s以上の高速で数10 μm程度の線幅で絶縁加工する必要がある。また，透明導電膜に代表されるITO膜（酸化インジウム（In_2O_3）に少量の酸化スズ（SnO_2）を混ぜたもの，Indium Tin Oxideの頭文字）のパターンニングは従来，化学薬品を用いるウエット法で行われてきており，工程の複雑さと環境の点でドライエッチング技術が求められている。そのためレーザーによるパターンニングは液晶，有機EL（Electroluminescence），無機ELパネルの製作工程で必須となってきている。透明導電膜は液晶や銀行のATM等のタッチパネルに用いられており今後一層の需要が伸びる材料と考えられる。材質はガラスまたはPETが主であり可視光に対し透明であるため，レーザーの中でも吸収のある短波長側のものが好まれている。

リペアリング

近年，電気回路の高集積化が進む一方で，薄膜プロセスの歩留まり向上は重要な課題である。その中の一技術としてレーザーによるリペアリングが上げられる。リペアリングの対象は，マスク，液晶，配線，メモリ等，多種多様である。欠陥には黒欠陥（残留欠陥），白欠陥（欠損欠陥）がある。黒欠陥に対しては，レーザーの蒸

散作用を用い，白欠陥に対しては金属ガス中で紫外DPSSレーザーによる光化学反応で成膜を行うレーザーCVD（Chemical Vapor Deposition）法で膜を形成する方法がとられる。

テクスチャリング

ハードディスク等は高密度記録のためヘッドの浮上量が微小になっている。そのため回転する際にヘッドとディスクが吸着し壊れる恐れがでてくる。これを防ぐためにハードディスクの場合，最内周のトラックに数100 Å程度の凹凸の穴をつくり，ヘッドとディスクとの摩擦を減少させるテクスチャ加工を行っている。その高さ精度は20 Åが必要であり，高出力安定のレーザーの登場で実現できるようになった技術である。

光造形

光造形法は液状の光硬化性樹脂を直接，紫外のレーザーでライン走査（ビーム径100 μm程度）して照射し1層ずつ硬化させ，それを積層することにより成型用の型や切削工具を用いずに3次元構造物を作製する技術である。現在ではCADデータから簡易に3次元モデルを形成でき，精度の高い造形法として実用化されている。従来の光源はArガスレーザーなどのガスレーザーが用いられていたが，レーザー管が短寿命なため交換の頻度が高く，メンテナンス費用がかかるのが欠点であった。近年のNd:YAGのTHG（Third Harmonic Generation）を用いたDPSSレーザー（355 nm）は長寿命，メンテナンスフリー，高ビーム品質，出力安定な特性をもつため，ガスレーザーのかわりに使用され始めている。

光露光

DRAMメモリにも応用は広がっている。現在大容量化開発は256 Mbitから1 Gbit以上に移行している。すでに，KrFエキシマレーザーは繰り返し周波数4kHz，平均出力40 Wの装置が実用化されており，引き続きArF（193nm）エキシマレーザーがこの分野を引っ張っていくことはほぼ確実であろう。しかしながら，メンテナンス等の利点から，エキシマレーザーに替わる全固体化の真空紫外DPSSレーザーの高出力化，高繰り返し化，長寿命化の開発には期待が高い。

次世代検査光源

波長変換を用いた紫外光応用は分光・測定の分野にも広がっている。特に微細化の進む半導体マスク検査において，連続発振深紫外レーザーの需要が高まっている。微細化に伴う半導体関連部品の検査装置の光源に求められる性能は

・高速スキャン
・高スループット
・高分解能

つまり，より短波長で高出力な光源が求められている。サイバーレーザーは266 nmの光を安定且つ最大5 W発生，波長200 nm以下の連続発振深紫外光の発生にも成功している[2)]。ラインナップとしてALTAIR（図3）があり，この分野で大きく貢献できる可能性をもっている。

以上，主に赤外のDPSSレーザーを波長変換した短波長光のレーザーの微細応用について述べた。サイバーレーザーでは連続発振深紫外レーザーALTAIRの他，水冷高出力タイプでSIVAシリーズ（図4），空冷中低出力タ

図3　連続発振深紫外レーザー：ALTAIR

図4　産業用空冷個体レーザー：SPICA

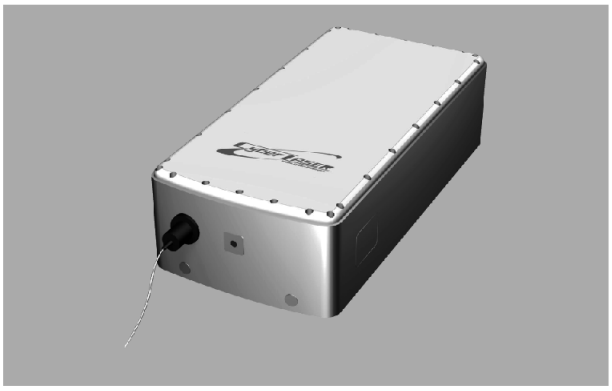

図5　産業用高出力水冷固体レーザー：SIVA（ファイバーオプションタイプ）

イプでSPICAシリーズ（図5）を揃えており，上記のような様々な可視/紫外/深紫外領域の産業応用に対応できる。また，加工等における動作フレキシビリティを持たせるためファイバー出力オプションもあり，我々の装置が産業の発展に貢献できれば幸いである。

4　紫外vsフェムト秒レーザー

図6はレーザーの照射時間（レーザーパルス幅）とパワー密度による各レーザープロセスを示している[3]。特に微細加工において加工周辺に熱影響による"ただれ"を残さないことが重要となる。図によるとパルス幅を短くして照射パワー密度を大きくすることにより加工プロセスは熱的加工から非熱的な蒸発除去加工（アブレーション）加工へ移行する。つまり，パルス幅が短いほど微細加工に適しており，この究極ともいえるレーザーが前稿までに取り上げたフェムト秒レーザーである。また，フェムト秒レーザーは多光子過程を経て，本来光を構成する波長帯に吸収がないバンドギャップの大きい物質も微細な加工ができる。3章まで，特に波長変換で得られる紫外コヒーレント光の微細応用への優位性を述べてきた。用途が競合しがちに思えるが，それぞれ特長をもつため優位な分野がある。以下にフェムト秒レーザーとのすみわけについて述べる。

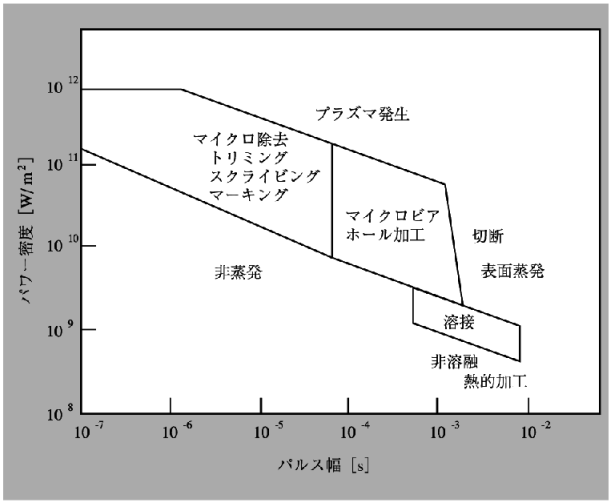

図6　レーザーパルス幅とパワー密度によるプロセスの違い

文献[4]ではDUV（深紫外，概ね波長200nm～300nm）/VUV（真空紫外，概ね波長200nm以下）レーザーとフェムト秒レーザー加工の比較を行っている。主に真空紫外であるF_2レーザー（157nm）との比較を取り上げている。波長変換によるDUV/VUVレーザー発生も含めて考えると，それぞれのレーザーは各々の特長があり用途によって表2のように切り分けできる。

このような差は主に波長の違い，非線形過程であるか線形過程であるかに起因している。例えば表面加工においては非線形過程を用いるとビームの形状に大きく依存する。すなわち誘電体のようなバンドギャップの大きい物質の表面精密加工にはDUV，穴あけや高アスペクト比加工，透明材料の内部改質にフェムト秒レーザーがより適しているといえよう。また，波長変換に関していえば物質の吸収率の差を利用した多層物の選択的加工ができるという利点がある。このようなレーザーはそれぞれに特長をもっており今後，この短波長化と短パルス化のレーザーのさらなる進展及び産業進出が期待される。

サイバーレーザーではフェムト秒の特性を生かしつつ

表2　DUV/VUVレーザーとフェムト秒レーザーの比較

	DUV/VUVレーザー	フェムト秒レーザー
パターンニング	◎（投射焼付け）	◎（直接描画）
誘電体表面加工	◎	○
金属加工	△	◎
高アスペクト比加工	△	◎
内部加工	△	◎
空間分解能	◎	○
波長選択性	◎	○
加工速度	◎	△

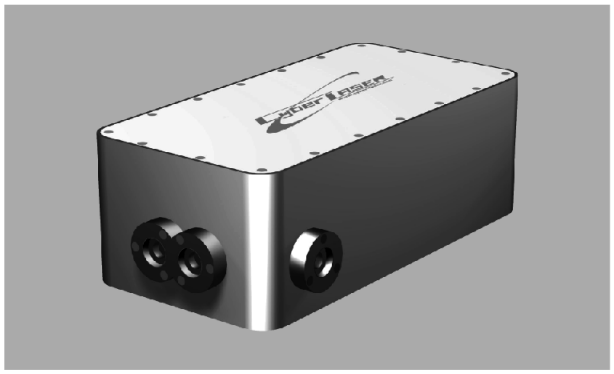

図7　フェムト秒SHG/THGユニット

紫外領域の波長でプロセッシングを行いたいという要求に答えるべく，高安定フェムト秒レーザー"イフリート"と当社の波長変換技術を組み合わせたSHG/THGユニットのオプションがある。こちらを用いればお客様のアプリケーションを一層広げられるかと思う。

5　まとめ

本稿は主に波長変換によって短波長化されたDPSSレーザーの産業応用をメインにとりあげた。波長変換の応用において，今回取り上げた項目はほんの一部にすぎずレーザー加工のみならず，医用，精密計測，より物理よりではレーザー冷却など様々な分野にすでに大きく展開をみせている。GaNのブルー光発振や高出力半導体レーザーが急速に発展し，将来生き残るレーザーは半導体レーザーのみと言われているが，その中で波長変換は質の良い高出力光がだせる上，広帯域の光をカバーできる，また紫外領域は半導体レーザーや固体レーザーから直接発振することができないので，今後も重要な技術であろう。

本稿で紹介した内容が，レーザーに興味を持ち始めた方やこれから本格的にレーザーを開発するような若手技術者の方々に対して少しでもお役に立てることを祈念する。

参考文献

1）窪田恵一 レーザー研究 28,3(2000).
2）J.Sakuma,Y.Asakawa, and M. Obara, *Opt. Lett*, **1**, 1(2004).
3）電気学会編，レーザーアプレーションとその応用,コロナ社, p.3 (1999).
4）杉岡幸次 レーザー研究 30,226(2002)

■ FIndustrial applications expanded by frequency conversion

■ Tomohiro Imahoko

■ Cyber-Laser Inc. Development dept.

イマホコ　トモヒロ
所属：サイバーレーザー㈱　開発部
連絡先：〒212-0054　神奈川県川崎市幸区小倉308-10　KBIC 205号室
Tel. 044-588-3803　Fax. 044-580-3805
E-mail：imahoko@cyber-laser.com
経歴：2002年慶応義塾大学院を卒業。同年，松下電器産業に入社したもののベンチャーへの夢をあきらめきれず1年で退社，2003年にサイバーレーザー㈱入社。学生時代はパルス幅可変フェムト秒レーザーシステム開発に従事。現在，主に可視/紫外固体レーザー及び繰り返しフェムト秒レーザーの開発を行っている。趣味はテニス，卓球等の球技。