

カスケード、マルチ高調波発生から 全固体 DUV 発光

ピーター・コッホ、ユルゲン・バーチケ、ヨハネス A. リュリエ

エキシマレーザーに代わる全固体深紫外(DUV)光源として、ネオジウム・イットリウム・バナジウムレーザーによるカスケード高調波と和周波発生に成功、同時に高ビーム品質と安定性も得られた。

深紫外(DUV)スペクトル領域における干渉性放射は、200nm以下の波長で、リソグラフィ、計測、分光学、ファイバブラッググレーティング(FBG)の作製など、いくつかのアプリケーションで関心が高い。これらのアプリケーションのほとんどは、狭線幅と回折限界ビームプロファイルから利益を受けている。例えば、干渉描画法を用いると、FBGの最大長は、自己アポダイゼーションにより、描き込むレーザーの帯域によって制限される。

DUVスペクトル範囲で直接レーザー発光ができる固体レーザー材料はないが、フッ化アルゴン(ArF)エキシマレーザーが100Wを超える出力レベルで193nmのダイレクトレーザー発光ができるので、リソグラフィなどのハイパワーアプリケーションで優勢である。

反対に、全固体DUV光源は、計測やFBG製造などのローパワーアプリケーションで有利である。これらの全固体光源は、赤外レーザーの周波数変換で実現されており、ArFエキシマレーザーと比較して優れたビーム品質とスペクトル特性を提供するが、その実現はまだ容易ではない。半導体業界における、例えば複雑なステッパオプティクスの評価など計測アプリケーションでは、出力波長193.368nmと狭帯域が不可欠である。しかし、FBGの製造では、DUVスペクトル範囲の200nm以下で

あればどの波長でも十分である。

IR波長変換

全固体DUV光源は一般に、IR固体レーザーのカスケード第二高調波発生(SHG)、和周波生成(SFG)、差周波発生(DFG)をベースにしている。したがって、基本波と変換方式の選択からなる可能なコンセプトは、DUVスペクトル領域における位相整合と透過性を提供する材料によって決まる。

こうした必要な特性を提供する非線形結晶ですぐに利用可能なものには、ホウ酸バリウム(BBO)、三ホウ酸リチウム(LBO)、四ホウ酸リチウム(LTB)、セシウム・リチウム・ボレート(CLBO)、また最近ではKBBFが含まれる。しかし、KBBFはその板状構造のために、数ミリ長の結晶しか利用できない。したがって、KBBFは主にピコ秒およびフェムト秒パルスの効果的変換に用いられ、狭帯域ナノ秒パルスの効果的変換には不適切である。

BBO、LBO、LTBおよびCLBOは低複屈折であるために、200nm以下のDUV放射は、これらの結晶の可視光あるいはIR放射を用いて200nm以上のUV光のSFGによってしか得られない。またLTBは非線形性が小さいので、ほとんどの狭帯域全固体DUV光源は、最後の和周波混合ステージでBBO、LBO、あるいはCLBOを使う。

以前は、DUV光源はチタンサファイアレーザー(Ti:Sapphire)マスターオシレータとパワーアンプ、ファイバアンプ、それに1μmネオジウム(Nd)レーザー、あるいはそれらの組み合わせで実証されていた。Ndレーザー技術は信頼性があり成熟度が高いため、DUVへの全固体周波数変換チェーンへの多くのアプローチは1064nm基本波で始まる。しかし、190~200nm間のDUVへの和周波混合はパラメトリック変換ステージを必要とする。これは効率を制限し、帯域を狭くする必要がある。

第7高調波発生による DUV

200nm以下のDUVスペクトル領域に至る魅力的な代替法は1342nmネオジウム・イットリウム・四酸化バナジウム(Nd:YVO₄)のSHGとSFGのカスケードで191.7nm第7高調波を発生させる。これは、DUVスペクトル領域の特定波長を必要としないため、FBG製造では特に関心もたれている。

この変換方式では、変換ステージが4段。ビスマスホレートで第2高調波671nm(BiBOでSHG)、447nm第3高調波は第2高調波と基本波の和周波混合(LBOでTHG)、224nm第6高調波は第3高調波の周波数通倍(BBOで6HG)、最後に第6高調波と基本波の和周波混合で第7高調波を生成し191.7nm DUV光源が得られる(図1)。

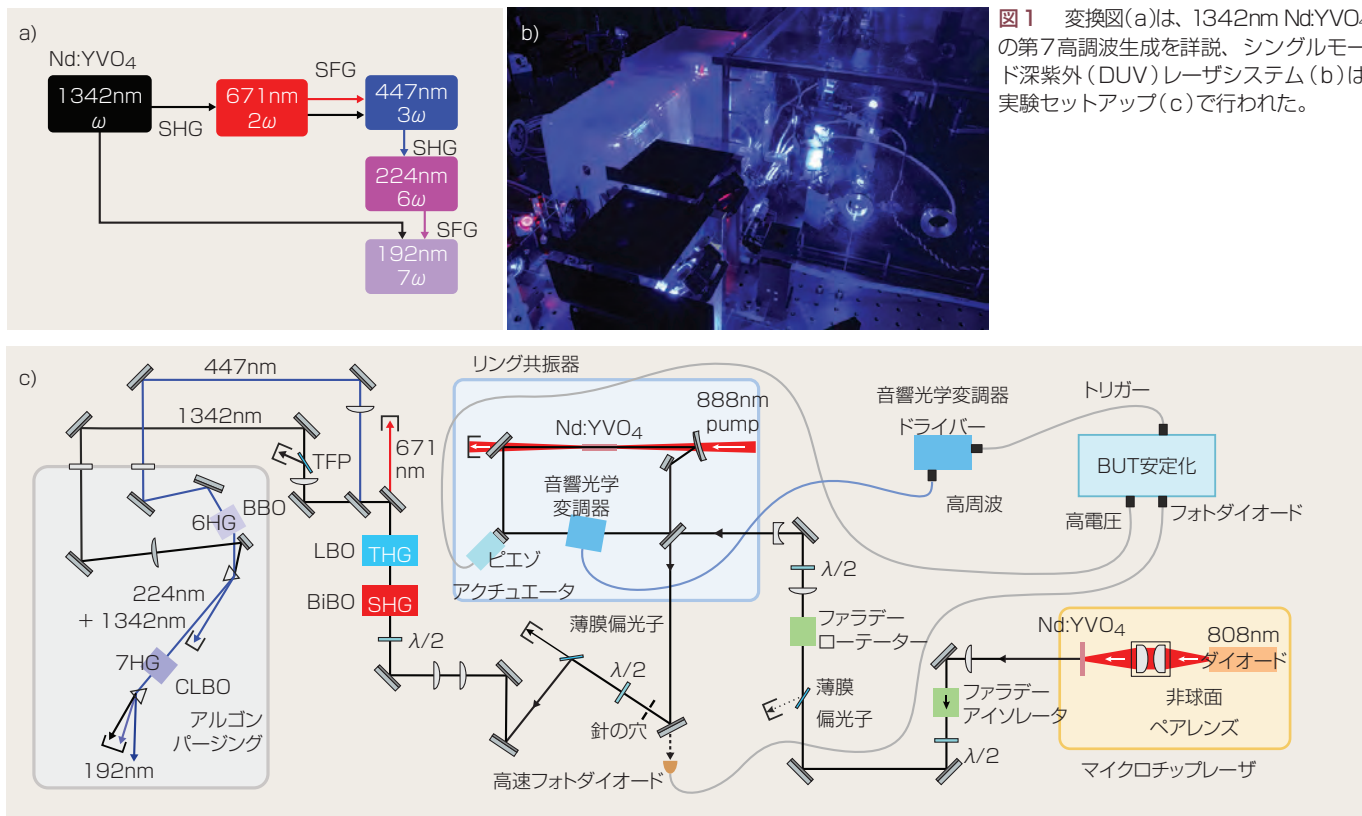


図1 変換図(a)は、1342nm Nd:YVO₄の第7高調波生成を詳説、シングルモード深紫外(DUV)レーザシステム(b)は実験セットアップ(c)で行われた。

最初の変換2段は非臨界位相整合を用い、ウォークオフや有限角許容帯域の有害な効果なしで長尺結晶が使える。これらをカスケードすることで、高調波発生法によってわれわれのチームは、独カイザー・スラウテルン・フォトニクセンター(Photonik-Zentrum Kaiserslautern)で、ブロードバンドおよび単一縦モードDUV光源を両方とも実証することができた。

ブロードバンドDUV

ブロードバンドセットアップは、マルチ縦モードQスイッチ1342nm Nd:YVO₄レーザをベースにしている。このレーザの平均パワーは15.2W、パルス幅は16.3ns、パルス繰り返し周波数10kHz、スペクトル幅29GHzである⁽¹⁾。同レーザのパルスエネルギー変動は低く<1%、また回折限界光束品質である($M^2 < 1.1$)。

周波数3倍段は、位相不整合SHGプロセスの非線形位相シフトを利用して最適化した⁽²⁾。原理的に、この位相シフトは、非変換基本および基本モードの重ね合わせによって起こるものであり、第2高調波の逆変換によって生ずる。この非線形位相シフトが、基本光束のカー的自発動作(Kerr-like self-action)の理由である。この自発動作で、第2高調波とTHG結晶内の基本波の光束径が整合し、第3高調波の品質を著しく向上させることになる。SHG結晶の位相整合温度を離調することで、第3高調波の光束品質とともに基本波から第3高調波への変換効率が、最大化される。これは、基本波から第2高調波および空間重ね合わせのパワー比率を最適化することによるものである。

われわれはSHG段の前に偏向バイパスを用いて1342nmのパワーの一部を

バイパスし、最後の変換段で残余1342nm光束の利用を回避した。残余光束と違い、バイパスされた1342nm光束は優れた光束品質を持ち、これが7HG変換段のパフォーマンスと光束品質を改善することになる。38%のバイパス、191.7nmで最大240mWのパワーが実証され、これは全体的な効率1.8%に一致している。可変アッテネータ後の総励起パワー9.45Wで、われわれはガウシアン形状光束プロファイルおよび $M^2 < 1.9$ で190mW(全体的効率2%)のパワーを得た。

さらに優れた光束品質 $M^2 < 1.7$ が、25%のバイパス、総励起パワー8Wで実証され、結果は191.7nmで155Wである。第7高調波のパルス幅は12.1ns、パルスエネルギー変動は極めて高い(<10%)、これはマルチ縦モード動作によるものである。

シングルモード DUV

われわれのシングルモード DUV セットアップは、注入同期 Q スイッチ 1342nm Nd:YVO₄ リングレーザーをベースにしている。平均出力 13.9W、パルス繰り返し周波数 10kHz でパルス幅 18.2ns である⁽³⁾。パルスエネルギー変動は非常に低く (<0.6%)、ビーム品質は $M^2 < 1.05$ 。シードレーザーは、連続波 (CW) 単一周波数 Nd:YVO₄ マイクロチップレーザーで、リング共振器は、立上り時間 (BUT) 法で安定化している。

第 2 高調波では、シングルモード Q スイッチレーザーは、計測時間 11ms でスペクトル幅 45MHz を示し、長期スペクトル幅 75MHz は振動、BUT 抑制による安定化のためのキャピティ長調整によって広がったものである。DUV スペクトル領域への変換に向けた実験セットアップは、われわれのブロードバンドセットアップの最適化バージョンである。

同様に、6HG と 7HG は、結晶とプリズムの劣化を避けるためにアルゴンを除去した気密ボックスで行われる。われわれは、シングルモードセットアップで 22% の偏向バイパスを用いた。7HG 段後の分離プリズムへの損傷を避けるために、可変減衰器でトータルパワーを 10.8W に制限した。トータルパワー 10.8W でわれわれの第 7 高調波セットアップは、191.7nm で 230mW のパワーレベルを生み出し、これは全体的効率 2.13% に一致している (図 2)。しかし第 7 高調波のビーム品質が励起パワー 8.94W 以上でわずかに劣化しているので、この励起パワーレベルはよりよい選択である。それでも 191.7nm で 185mW とかなりのレベルにあり、全体的な効率は 2.07% である。この動作点でわれわれのナローバンド DUV 光源はパルス幅 9ns、 $M^2 < 1.5$ 、またパルスエネルギー変動は <3% と非常に低い。

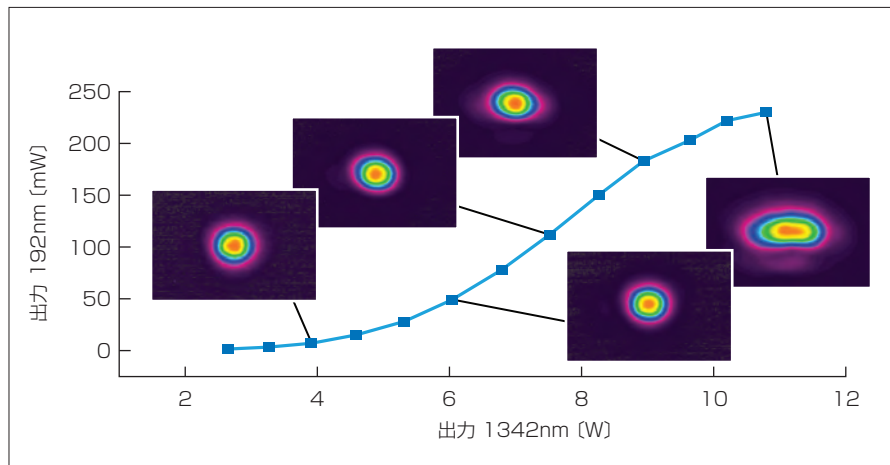


図 2 192nm で平均パワーは、可変減衰器後、1342nm のパワーに関して特徴づけられている。挿入図は、出力パワーに対応した第 7 高調波のビームプロファイルを示している。

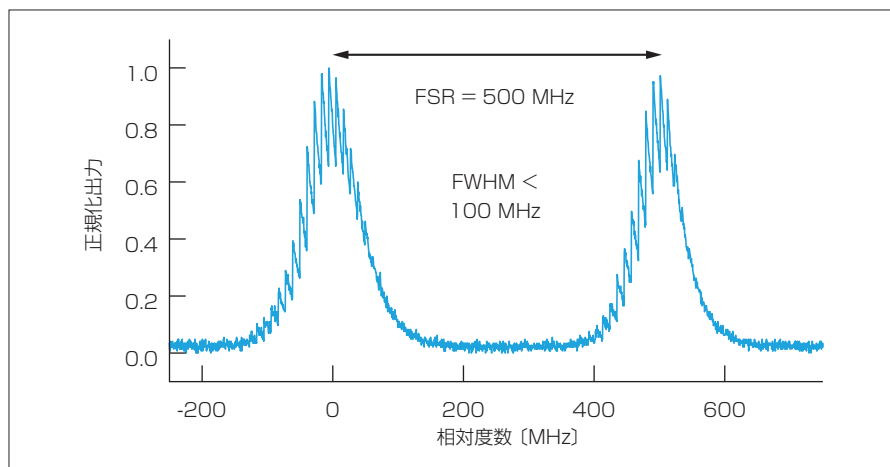


図 3 192nm DUV レーザのスペクトル幅は、手作りのスキャニング共焦点ファブリペロ干渉計、フリースペクトルレンジ (FSR) 500MHz で計測。計測時間は 10ms 以下。

これは単一縦モード動作のためである⁽⁴⁾。

最後に、われわれの DUV レーザは、手作りのスキャニング共焦点ファブリペロ干渉計 (FPI)、フリースペクトルレンジ (FSR) 500MHz で評価した (図 3)。計測時間 10ms 以下で、スペクトル幅は半値幅 100MHz 以下。共振器

安定化に関連する振動と周波数ジッタが加わっているため、長期スペクトル幅の値は 240MHz FWHM のオーダー。191.7nm で高いコヒレンスのためにわれわれの DUV 光源は、FBG 製造ラインで長いグレーティングの描画に最適である。

参考文献

- (1) P. Koch et al., Opt. Express, 22, 11, 13648-13658 (2014).
- (2) P. Koch et al., Opt. Express, 23, 10, 13648-13658 (2015).
- (3) P. Koch et al., Opt. Express, 23, 24, 31357-31366 (2015).
- (4) P. Koch et al., Appl. Opt., 55, 8, 1871-1877 (2016).

著者紹介

ユルゲン・バーチケ氏は Xiton Photonics 社のマネージングダイレクター、ピーター・コッホ氏は研究者で博士号取得候補者、ヨハネス A. リュリエ氏はカイザー・スラウテルン・フォトニックセンタのマネージングダイレクター。e-mail: johannes.lhuillier@pzkl.de URL: www.photonik-zentrum.de