深紫外ダイオードレーザの短波長化

ウルリッヒ・アイスマン、マチアス・ショルツ、ティム・パーシュ＝コルベルク、ユルゲン・シュトゥーラ

周波数変換ダイオードレーザは、真空UVの200nm以下まで連続波を生成する。

研究および産業分野の多くのフォトニクス応用で、紫外（UV）レーザ光が求められている。従来のレーザシステムでUV光を出せるものはわずか数タイプしか存在せず、しかもそれらは固定波長である。

ここでは、連続波可変UV出力ダイオードレーザシステムの最新の開発を紹介する。この最新成果では、デジタル制御エレクトロニクスが性能改善、使いやすさを実現している。新しい周波数逓倍技術により、出力向上、長期安定動作が可能になり、結晶材料研究が非線形変換における古典的限界の克服に寄与し、周波数逓倍出力波長は193nm以下が可能になっている。

深紫外（DUV）領域（300nm以下の波長領域）で動作する新しいレーザ光源は、産業応用や科学応用を効率的にする。例えば、先端的半導体リソグラフィや検査は現在、いささか高価な193nmパルスエキシマレーザを利用して行われる。露光ウエハの化学線検査、つまり露光波長での検査は、連続波光源の方が便利である。

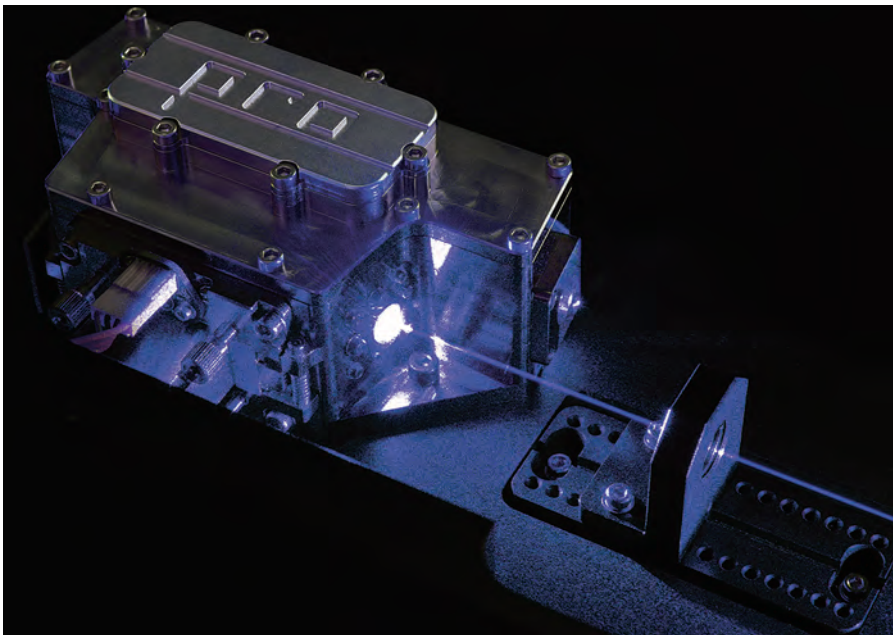
科学分野では、アプリケーションとして角度分解紫外光電子分光法（ARPES）がある。この場合、研究者は、新しい材料のブリルアン領域の大部分を計測するために高エネルギーフォトンを必要としている。170～205nm波長で狭帯域発光のレーザが最も有効であることが証明されている。ハイバンドギャップ材料のフォトルミネセンス研究では200nm以下の波長も必要とされている。こうした材料はUV LED実現のために研究中である[1]。また、ラマン分光領域に新しいアプリケーションがでてきている、例えばタンパク質構造分析や太陽バックグラウンドを超えるラマン分光である[2]。

量子技術では、可変DUVレーザは高分解能分光計測やレーザ冷却に用いられる。例えば、原子時計はアルミニウムや水銀イオンにおける光遷移に直接アクセスできることで大幅に改良できる。また、将来的にはトリウムで原子光時計が実現する可能性がある[3]、[4]。

短波長ダイオードレーザ

ダイオードレーザはコンパクトで軽量、非常にエネルギー効率がよく、メンテナンスがほとんど不要であり、相対的にローコストである。科学・研究分野は、ダイオードレーザ技術の恩恵を受けている、特にそれらの分野は改善された放出光や、波長可変性に依存するところが多い。その例として、外部反射グレーティングを使用する狭線幅レーザ、これは外部キャビティダイオードレーザ（ECDL）が知られている。この技術を使い、トプティカ社のこのタイプのレーザは自走線幅数kHzを達成している。ECDL技術を使わないダイオードレーザと比較すると、こちらは数100GHzである。

ECDLのもう1つの利点は、レーザ発振波長を、モードホップなしで十分に制御して連続的に可変できることであ



このSHGプロ共振器は、すべての電気的、機械的フィードスルーを含め、封止されている。残りのエアリークレートは10^{-3}～10^{-5}mbar l/s（提供：トプティカ社）。

る。通常、モードホップフリー可変範囲は30～50GHzが達成されており、粗チューニングは数ナノメートルである。先進的ECDL技術により、モードホップなしで110nmを超えるスキャンも可能である。

信頼性のある長寿命のダイオードレーザを実現するための半導体材料とその発振波長との完璧な組み合わせは、まだ課題になっている。これまでのところ、赤外領域だけが、異なる半導体を用いて準連続的に利用可能になっている。青色と紫外波長では、488、455、405、375nm波長を含むスペクトル領域をカバーする材料がいくつか存在する。現在、市販で入手可能な最短波長は370nm付近である。今まで、ダイレクトダイオードレーザ技術ではDUV領域の発光はできない。

周波数逓倍により短波長化

ダイオードレーザの波長範囲を広げる別の方法は、レーザ光の周波数を2倍にする第2高調波発生（SHG）である。効率的な周波数逓倍プロセスには、いくつかの技術課題がある。エネルギー保存以外に、3つの関連するフォトン（2入力と1出力）の運動量保存基準が満たされなければならない。これには同じ位相速度が必要になり、したがって非線形結晶内のフォトンにとって屈折率が同じでなければならない。

通常、波長が異なると分散が屈折率の同一性の妨げになる、つまり位相速度を同じにするために結晶の温度とともに、フォトンの偏向や伝搬方向が最適化されるような特殊条件ができていない場合である。この、いわゆる位相整合は、非線形結晶が特殊な角度でカットされていることを必要とする。さらに調整可能なマウントや温度安定性以外に機械的に安定でなければならない。

非線形特性のために、SHGプロセスは十分な基本波レーザのパワーを必要とする。非線形結晶を透過した後、共振光キャビティで非線形結晶を封じ込め、残っている最初の光を再利用することで周波数逓倍効率が数ケタ向上する。干渉パワー増強は、レーザの線幅が数MHzのキャビティ線幅を大幅に下回る条件でのみ達成される。最先端のECDLは、この基準を簡単に満たしており、その出力は半導体テーパー増幅器（TA）を用いて増幅できるので、ECDLは周波数変換レーザシステムの基本光源に理想的な候補となる。

共振動作を維持するために、キャビティの光路長は基本レーザ波長の整数倍でなければならない。これは、コントロールループの圧電アクチュエータによる調整で達成される。エラー信号生成には、トプティカ社のSHGシステムは、PDH法（レーザ周波数安定化法）を使用する。それが最高速で最も信頼性が高い技術だからである。制御信号はデジタル的に処理されるが、2つの圧電アクチュエータスキームは、スローな変動あるいは波長スキャンに大きな振幅を与える。また、音響ノイズや振動の補償には30kHz程度の高帯域にする。

それらのTAチップなど必須の光半導体材料、それに周波数逓倍技術の着実な改善が、周波数逓倍ダイオードレーザシステムの出力増をもたらした（**図1**）。現在、2Wを上回る出力パワーが可視光領域、およびUV波長に近い領域で利用できる[5]。また、これらの領域における多くのスペクトルギャップは、最近埋められた。例としては、400nm付近の領域（イッテルビウムとカルシウムイオン冷却）、461nm（ストロンチウム冷却）、480nm（ルビジウムのリュードベリ励起）、556nm（イッテルビウムレーザ冷却）、589nm（ナトリウムレーザ冷却）、それに671nm（リチウムレーザ冷却）。

TOPTICAの周波数2倍、4倍ダイオードレーザにおける基本周波数レーザ光のノイズは、レーザシステムのデジタルコントロールにより最小化されている。基本レーザ光の低周波ノイズレベ

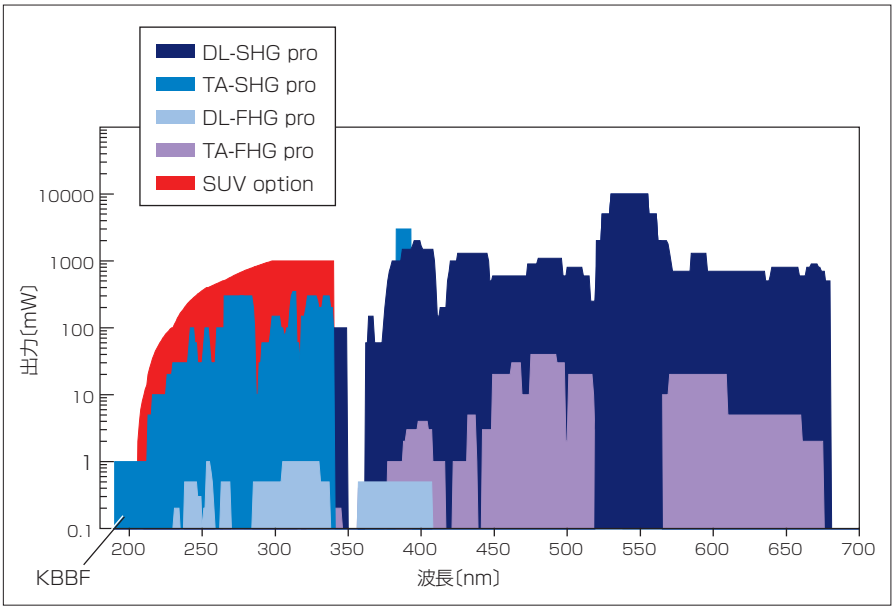


図1　出力パワーvs.波長を波長帯190～780nmと最大10Wまでのパワーで TOPTICA周波数変換システムで示した。基本レーザは650～1560nm範囲で出力。KBBF専用領域がマークされており、その中でTOPTICAのハイパワーレベル（SUVオプション）領域が赤で示されている。

ルは、周波数変換光に移行されている。

さらに短波長の深紫外の課題

DUV領域でさらに短い波長のレーザ光を生成するために最初のSHGステージの出力を第2 SHGステージで再度周波数逓倍する。そのようなダブルSHGレーザは通常、第4高調波発生（FHG）システムと言われている。DUV領域ではさらに技術的課題が生ずる。例えば光学材料による吸収の増加、これは出力パワーレベルの劣化の原因となり得る。全ての光学的、機械的、電気的フィードスルーを封止することでこれは避けられ、残余のリークレート（漏れ率）は10^{-3}～10^{-5}mbar l/s（図1）となる。設計により、ミラーや非線形結晶を含めてすべてがキャビティを開けることなくアクセスでき、調整できる。

この技術で、300nmよりも長い波長で300mW出力は容易に達成される。243nmと254nm、この2つの波長は水素、水銀の分光測定に必要とされている。これらの波長では、60mWの出力が実現可能。また、水銀の波長では、数mWの出力がグリーンECDLのダイレクトSHGから得られる[6]。

230nmでも、20mW以上がインジウムイオン研究あるいはリチウムのリュードベリ状態研究向けに得られる。205nmより短波長では、非線形周波数変換は従来の結晶を使うSHGでは得られない。位相整合は、そのような短波長では達成されないからである。とは言え、FHGシステムは、205nmのこの「古典的なバリア」で出力1mWに到達している。

そのようなシステムから得られる寿命は比較的長くなく、出力も大きくないが、それはデジタル制御FHGシステム用にトプティカ社が開発した技術を使うことで克服可能である。付随する出力パワーの長期安定性計測結果は**図2**に示している。266nmで出力100mWでとった赤色カーブは、アクティブな安定化なしで、500時間以上劣化の兆しは見られない。

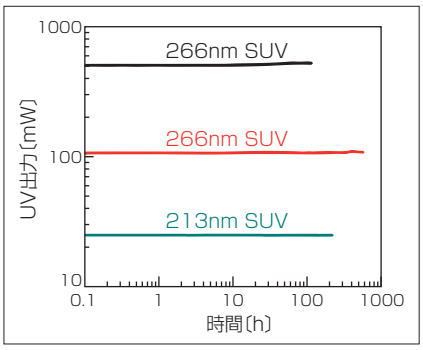


図2　波長と出力レベルを選んで、SUV長期安定性計測をプロット。

計測では、出力と波長範囲がその後増えた。266nmでは5倍に増やしても、110時間以上にわたり266nmでの劣化の兆候は出なかった。213nmでは、内蔵のPowerLock機能を適用して出力を25mW一定に保った。220時間超の計測期間で劣化は観察されなかった。予想される寿命全体は1万時間を超える。現時点で、計測はまだ続いている。

KBBFで最短波長

結晶研究における最近の成果により、205nmより短波長でフッ化ホウ化ベリリウム酸カリウム（KBBF）を使うことでSHGプロセスでの位相整合が可能になっている[7]。KBBFは、他の非線形結晶に比べるとUVにおける透明性は高く、200nmより短波長（**表1**）、真空UV範囲（VUV）で、特定の状況下で位相整合が可能である。

プレート状の成長プロセスのために、現在c軸に沿って成長するKBBF結晶だけが利用できるが、このため結晶を位相整合角度で切断することが難しくなっている（SHGにより、386nmから193nmへの光の変換には56.5°の位相整合角が必要であるが、これは内部全反射値を超える）。そのため、その結晶を2つのプリズム間に結合してSHGステージで使えるようにしている[8]。

そのようなプリズム結合結晶を含むシステム、波長193nmで最大15mWの出力を生成するために波長386nmで1.6Wの基本TA-SHGプロレーザの計測を**図3**に示した。波長191nmと

表1　様々な非線形結晶における第2高調波発生（SHG）関連のパラメータ比較。

Material	LBO	CLBO	BBO	KBBF
UV transmission edge〔nm〕	155	180	185	147
Lowest SHG wavelength〔nm〕	277	237	205	162

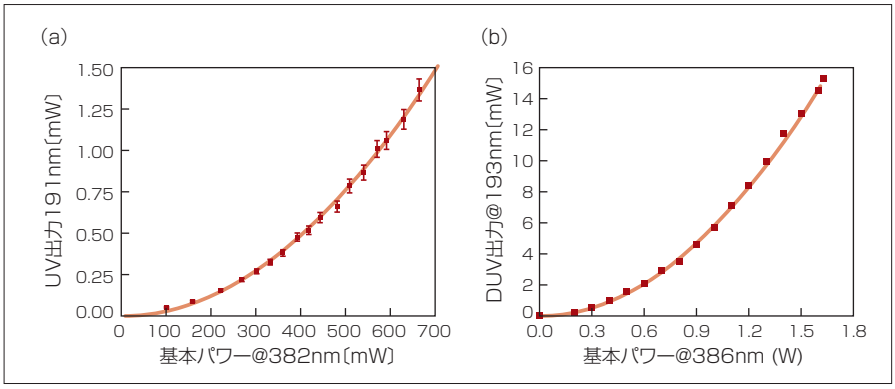


図3　KBBFを用いた共振ダブルステージVUV出力は、191nm(a)と193nm(b)発生に対して、循環基本パワーの関数として示した。

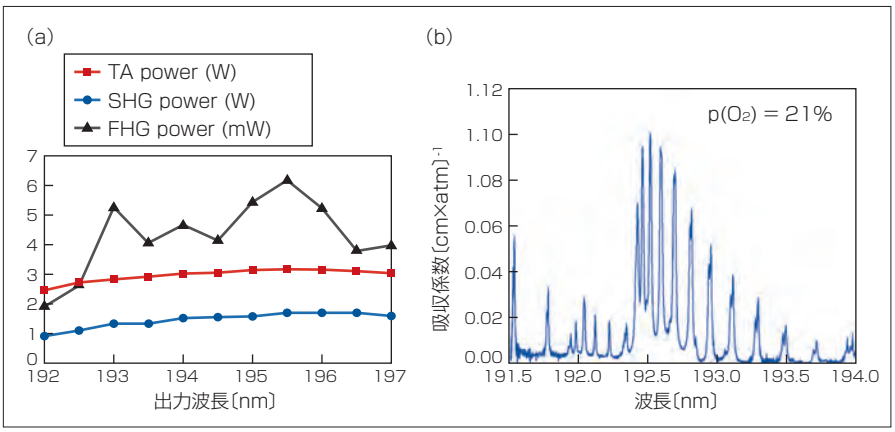


図4　KBBFレーザ（a）の粗チューニングと空気中の酸素の吸収スペクトル（b）の出力対波長を示している。

193nmシステムでの出力は、基本入力の関数として表示[9]、[10]。193nmシステムは単一周波数動作で驚異的なピークパワー15mWに達している。VUV光の線幅は1MHz以下、モードホップフリー周波数チューニング範囲は80GHzを超える。これにより最高分解能のVUV分光計測が可能になる。

線幅も高フィネス共振器を高周波参照することで1Hz以下に狭くできる[11]、[12]。KBBFシステムは、0.3%以下の超低強度ノイズ（相対強度ノイズは10Hz～10MHz）および、そのようなプロトタイプシステムを使う要求が厳しい科学的アプリケーションをサポートする寿命を達成している。

出力波長は、KBBFシステムの光パワーが波長の関数として示されている広い範囲（**図4**）でチューニング可能である。チューニングは、772nm FHGステージのTAステージおよび386nmのSHGステージのパワーに対する影響はわずかであるが、193nmでFHGステージの出力は変動が大きい。これはKBBFの不均質性によって起こる。これは酸素分子吸収の影響を受けており、計測は、酸素濃度21%の期待値と一致する。これは標準的な大気条件に相当する。

参考文献

(1) L. Trinkler and B. Berzina, "Luminescence properties of AlN ceramics and its potential application for solid state dosimetry," InTech, doi:10.5772/18658(2011).
(2) I. K. Lebedev et al., Anal. Bioanal. Chem., 381, 431-437(2005).
(3) T. Rosenband et al., Science, 28, 1808-1812(2008).
(4) See http://www.nuclock.eu.
(5) U. Eismann et al., "Active and passive stabilization of a high-power violet frequency-doubled diode laser," CLEO 2016, JTu5A.65(2016).
(6) G. Almog et al., Rev. Sci. Instrum., 86, 3, 033110(2015).
(7) C. Chen et al., J. Appl. Phys., 77, 2268(1995).
(8) J. Lu et al., Opt. Commun., 200, 415(2001).
(9) M. Scholz et al., Opt. Express, 20, 18659(2012).
(10) M. Scholz et al., Appl. Phys. Lett., 103, 051114(2013).
(11) N. Hoghooghi et al., "Frequency comb with Hz level line widths," Proc. ICOLS, 129, Singapore(2015).
(12) Y. N. Zhao et al., Opt. Commun., 283, 4696-4700(2010).

著者紹介

ウルリッヒ・アイスマン、マチアス・ショルツ、ティム・パーシュ＝コルベルク、ユルゲン・シュトゥーラは、ドイツ、ミュンヘンのトプティカ社に所属。
e-mail: ulrich.eismann@toptica.com　URL: www.toptica.com

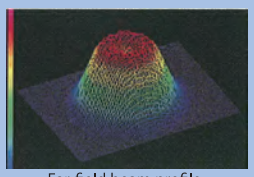
LFWJ

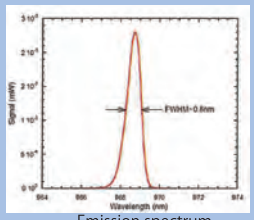
PRINCETON OPTRONICS

これが
高出力 VCSEL
です

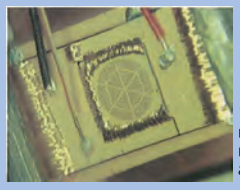
この高出力半導体レーザーは
エッジエミッター方式に比べ
数々の特徴があります！

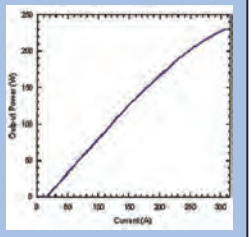
◆ビームの質がよい


Far-field beam profile


Emission spectrum
5mm×5mm VCSEL array at 100W output power

◆高スケーラビリティ


100W CW single mode VCSEL array mounted on a micro cooler



その他の特徴
◆温度依存が低い
◆製品間のばらつきが小さい
◆バックトークが少ない
◆波長の安定度が高い
◆FIT<10

AUTEX オーテックス株式会社
URL　http://www.autex-inc.co.jp
E-mail Sales11@autex-inc.co.jp
東京本社　〒162-0067
東京都新宿区富久町16-5 新宿宿高砂ビル
TEL. 03(3226)6321 FAX. 03(3226)6290
大阪支社　〒530-0004 大阪市北区堂島浜2-1-29
TEL. 06(6344)6328 FAX. 06(6344)6342