

次世代ホログラフィを実現する “すべての波長”

ウルリッヒ・エイスマン、ティム・パシュコルバーク、ハラルド・ロスマイアー

半導体レーザーに関する技術は日々目覚ましい発展を続けている。技術仕様と性能が継続的に進化するにつれてこれら半導体レーザーはホログラフィ用途で使用されてきた従来型のレーザー光源に取って代わりつつある。本稿ではホログラフィ技術に焦点をあてつつ最新世代の直接発振半導体レーザーおよび周波数変換半導体レーザーの今日の可能性の概要について説明する。

Dennis Gáborが1940年代の終わりに電子顕微鏡の解像度を改善しようと奮闘していたとき、彼は恐らく自身の仕事が後世にどのような影響を与えるのか知らなかったであろう。その過程において彼は物体の完全な3次元画像を表示することを可能にするホログラフィック法を発見した。発展を続けたホログラフィ技術はレーザーが発明されるとともに大学の研究室を離れ、数多くの産業向けアプリケーションにおいて数十億ドル規模の事業へと生まれ変わった歴史をもつ。

今日におけるホログラフィの実用化は主にクレジットカード、銀行紙幣、

パスポート、医療ホログラフィなど、よく知られたセキュリティホログラムの分野で顕著である。透過型または反射型の回折格子のような光学部品はレーザーまたは分光計において多数のメリットと用途を見出す。分布帰還型(DFB)および分布ブラッグ反射型(DBR)半導体レーザーまたはファイバブラッググレーティングなどこれらの構成技術要素を応用したマイクロインテグレーションは過去から一般的に行われてきた。近い将来には拡張現実(AR)装置の消費者市場導入により、この分野の著しい成長が予想される。

光学ホログラフィの基本的な原理は

当初に発明されて以来大きく変化していない(図1)。ビームスプリッタを用いてレーザービームを2つの光軸に分割することで物体に照射する照明ビームと、記録媒体(典型的には写真用プレート)に照射する参照ビームとして直接的に供給される。参照光は物体によって反射された照明光と干渉し、その干渉パターンは感光基板に記録される。この手順の後、基板を照明して物体の3次元画像を生成することができる。

1960年代に発明されて以来、レーザー技術の分野は目覚ましい進歩を続けてきた。ガスレーザーはホログラフィ用に広く使用されているがこれらの光源

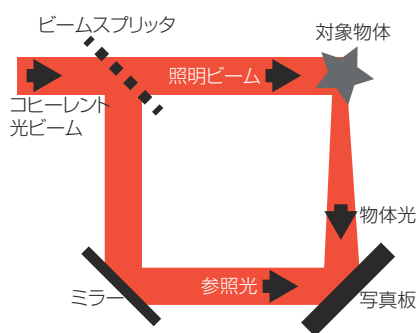


図1 ホログラムを作成するにはレーザービームを2つの光軸に分割する。照明ビームは対象物体を照射する。物体からの反射光(物体光)は写真板に入射し、レーザー光の第2の部分(参照光)と干渉してその干渉パターンを記録する。

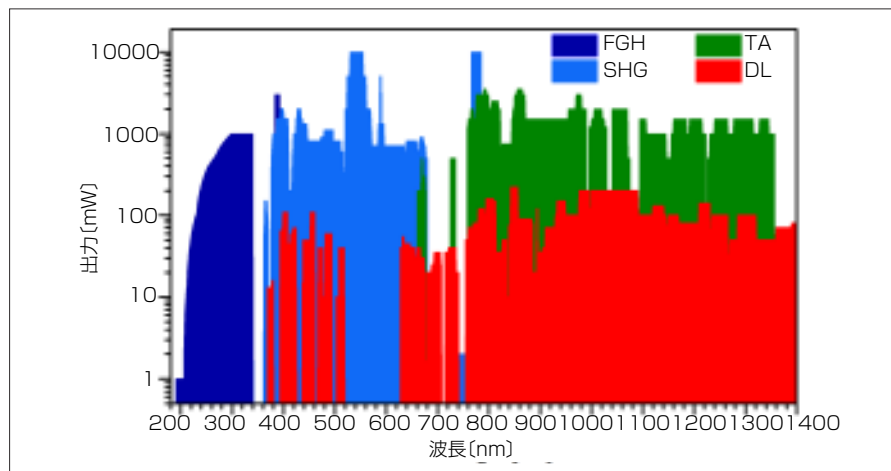


図2 トプティカ社の半導体レーザーは190nm～3500nmに達する超広帯域波長範囲をカバーしている。低出力光源(DL)は、光増幅器(TA)により高出力化され第二高調波(SHG)または第四高調波(FHG)を発生する。

に代わる新しい世代のワットクラスの半導体レーザーが利用できるようになった。半導体レーザーの主な利点は、ほぼすべての波長での利用が可能であることがあげられる。標準的な半導体レーザーは赤外線 (IR) から可視光 (VIS) まで幅広い波長レンジをカバーしている。またこの波長レンジは周波数変換技術⁽¹⁾を採用することによって、紫外 (UV) 波長をはるかに超えて拡張することが可能である。これらはトプティカ社の波長可変半導体レーザーの出力パワースペクトルを示す図2により詳細に示されている。発振可能なレンジは深紫外 DUV (190nm) から中赤外 MIR (3500nm) の波長範囲に達し、数 W までの出力レベルを有する。これには、表1に示された通り 450nm、530nm、650nmの可視「RGB」波長が含まれている。非常に高出力が要求されるアプリケーションではTA半導体ゲインチップを光ファイバ増幅器の代わりに用いることが可能である。最も顕著な例として波長589nmで22Wの出力を提供するトプティカ社のSodiumStarレーザーがあり、今日における最高クラス望遠鏡用の人工ガイド星アプリケーションに用いられている⁽²⁾。

干渉パターン of 解像度は最先端の電子デバイスで使用される、より小さなリソグラフィ構造体を形成するために重要である。これには従来よりも短いレーザー波長が必須となる。深紫外波長領域にアクセスするためにガスレーザーはホログラフィおよび(インコヒーレント)リソグラフィに広く用いられるいくつかの「一般的な」波長を有している。上記で指摘された通り、半導体レーザーは表1に示されるこれらの波長のすべてで利用可能である。装置ハンドリングの容易さ、優れたビームパラメータ、および低い運用コストのため

表1 ホログラフィ分野で広く用いられる波長におけるトプティカ社周波数変換半導体レーザーの出力一覧表。波長チューニングオプションへの対応が可能(*)。

レーザー発振波長	光出力
193nm	0.1mW
213nm	10mW
266nm	300mW
405nm	800mW
457-462nm*	500mW
525-535nm*	500mW
633nm	500mW
645-655nm*	500mW

以前はガスレーザーが主流だったアプリケーションへの道が半導体レーザーに大きく開かれる可能性を有している。たとえば407nmで発光するクリプトンイオンレーザーはわずか数年間で405nm半導体レーザーへの置き換えが劇的に進められている。これには直接発振の半導体レーザーを使用するか、ワットクラスの高出力が必要な場合には強力で安定的な狭線幅IRレーザーを第二高調波発生することによって実現される。さらに紫外波長領域は別の段階の周波数変換技術を用いることによって利用可能となる。広く用いられている266nm UV波長はトプティカ社の画期的なTop Wave製品シリーズによって提供され、ほぼ回折限界のビーム品質 ($M^2 < 1.2$ 、典型値) および300mWのコヒーレントな出力を提供することが可能である。

ある特定の光半導体デバイスの製造プロセスでは材料内部に格子状ホログラフィック構造を生成する必要がある。この製造プロセスには通常、244nmに周波数変換されたガスレーザーまたは半導体レーザーが使用される。5倍波発生されたパルスNd:YAGレー

ザにおける一般的な213nmの波長は、以下に示すすべての機能を含む高出力CW動作半導体レーザーで置換えることができる。より短波長を志向する先端的で重要な技術的進歩は周波数倍化媒体としてのKBBF結晶の登場によりさらに加速する。この技術によりエキシマレーザーの代わりに半導体レーザーを用いて⁽³⁾、波長193nmにおけるホログラフィプロセスを可能にし、コヒーレンス長は数百mのオーダーを実現する。

DLC proはトプティカ社の半導体レーザーを安定的に制御するためのキーとなる重要な要素である。リモートアクセスおよびリモート制御のような典型的なデジタル機能が付加されたこと以外にも基本的な制御エレクトロニクス性能が大幅に改善することによりコヒーレンス長を伸長し、強度ノイズ (RIN) を大幅に減少することを実現した⁽⁴⁾。さらに下記のインテリジェントな機能が実装されている。

- AutoAlign機能は、レーザー出力パワーの自己最適化を可能にするためにレーザー内部の光学コンポーネントおよびステージを自動的に調整する機能である。
- PowerLock機能はアクティブに出力パワーを安定化する。ユーザー装置側から供給される外部センサの信号をフィードバックすることにより、ホログラフィ光学系内で引き起こされる出力ドリフト量を補償することが可能である (図3b)。

近年における一般消費者向けホログラフィアプリケーションの典型的な例は、マイクロソフト社のHololensで見られるような拡張現実 (AR) デバイスである。それは各職場におけるビジネスのペースを完全に変える可能性があり、従来のスマートフォン技術を革新的に変化させる可能性も秘めている。

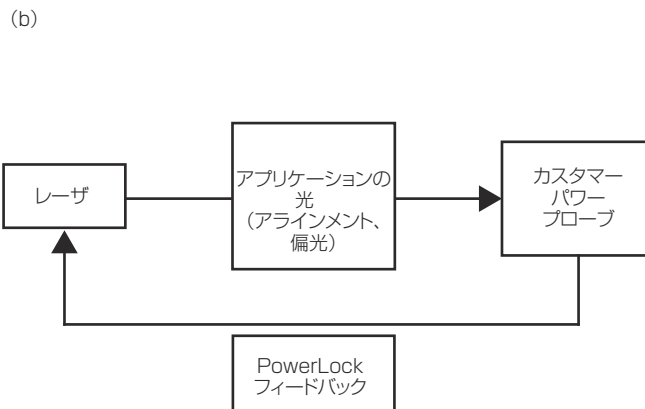
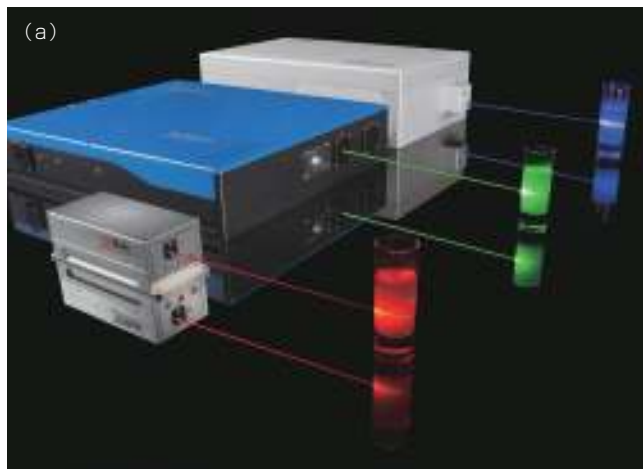


図3 (a) トプティカ社のホログラフィ分野向けレーザーシリーズ：(左から) TopMode, DLC TA-SHG pro, TopWave。(b) PowerLock機能はレーザー出力の安定化を可能にする。ユーザ装置内の任意の一点におけるパワー信号を参照用ポイントとして選択することも可能である。

同様に期待される一般消費者向け市場は自動車部門であり、運転時のスピードのような重要な情報はヘッドアップ型ディスプレイを使用し直接「道路上に」投影することが可能となる。両方の用途においてホログラフィイメージングデバイスは、周囲光と投影イメージ両方の最適な輝度を同時に実現し、かつ融合することを特徴とする。従ってすべてのユーザーは拡張現実の中に没入し現実的な印象を経験することになる。

照明用LEDまたは半導体レーザーは設計波長を中心に数nmだけ発振する発

光波長を有するためイメージ投影結果は非常に薄暗くなるか、または見えなくなることさえありうる。ここでトプティカ社の波長チューニング可能な半導体レーザーの別の利点を活用することができる。すなわち書き込み用レーザーの発光波長を任意の希望する波長に設定することが可能であり、実際のホログラムを書き込む前にデバイス照明用光源の欠陥を検証することが可能になる。波長チューニング曲線の一例が図4に示されており480nm付近において14nmの自動操作による波長チューニングレンジが実証されている。最適化

されていないレーザーでは、出力がピーク出力の90%を下回らない条件に設定された際に中心波長の前後2nmのチューニングレンジにとどまる。これに対し自動最適化されたレーザーでは同じ90%パワー条件下において11nm以上の波長チューニングレンジを達成し、有用なチューニング範囲が5倍になることが実証されている。

ここで論議される半導体レーザーシステムは本質的に非常に効率的であり、典型的には消費電力は100W未満にとどまる。これは大きな電力を必要とする従来型的气体レーザーと比較して数十kW時の電力節約を意味する。加えて水冷装置なしで動作することが可能である。これは、レーザーの導入設定と日々の操作性を簡素化するだけでなくすでに大幅に削減された所有コストをさらに低減する効果がある。保守性にも優れ、部品の大部分がコンパクトな光半導体サブコンポーネントで構成された費用対効果の高い現場交換可能型ユニット(FRU)によって実現されている。ホログラフィックデバイスの製造現場における熱発生量は非常に重要なパラメータであり、また(水冷装置が発生させる)空気流量の大きい変

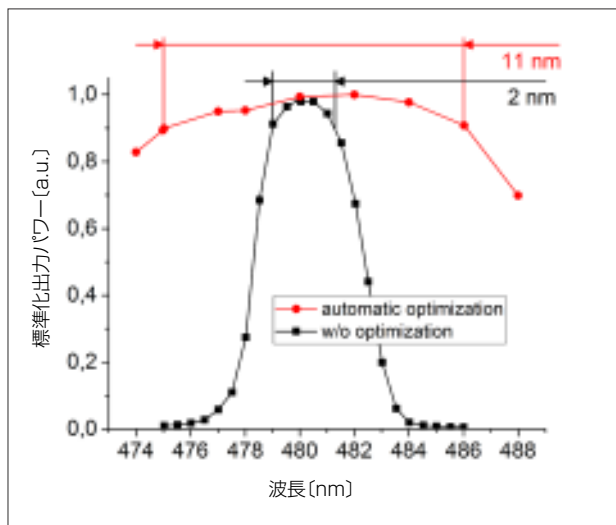


図4 波長チューニングオプション：レーザー出力の自動最適化を行った際(赤色線)と行わない際(黒色線)のSHGレーザーシステムの自動波長チューニング特性。有効調整範囲はピークパワーの90%と定義され、波長可変レンジは自動最適化ルーチンによって5倍に増加される。

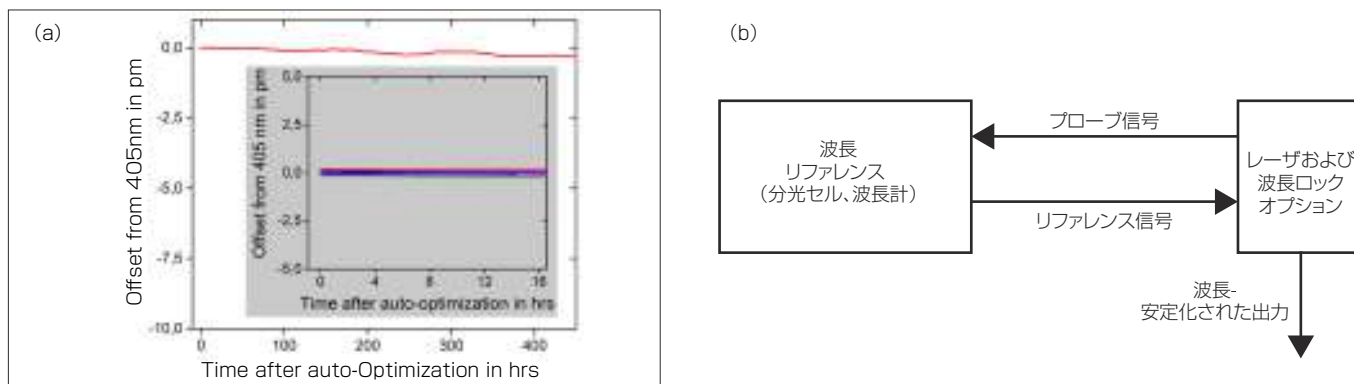


図5 (a)波長405nmにおけるフリーランニングレーザーの相対波長ドリフト量。400時間以上にわたり1pmを十分に下回っている。挿入図:最適化ルーチン(各曲線は1回の実行後に取られたデータセットに対応する)を繰り返し実行した後、フリーランニングレーザーは安定した動作のための最適な波長を確実に見つける。モードホッピングは測定全体にわたり観察されない。(b)アクティブな波長安定化レーザーシステムの概念図。レーザーは外部の波長基準、たとえば分光ガスセル(390.1nmまたは397.5nmのターゲット波長をもつ)、光波長計(すべての波長に対応)を用いて安定化することができる。実際的な多くのケースにおいて波長安定性は波長基準の性能により決定される。

化や音響ノイズによってホログラフィック記録に決定的な影響を与えるリスクの原因となる。従ってトプティカ社のレーザーシステムでは強制的な水冷またはファン空冷なしでも動作可能なことを設計の基本としている。

コヒーレンス長はホログラフィ用光源の重要なパラメータである。書き込みプロセスは対象物および媒体のサイズによって要求されるコヒーレンス長を有する適切な光源を必要とする。原理的にはコヒーレンス長は、少なくとも感光用プレート上での干渉を可能にするために照明ビームと参照ビームとの間の光路長の差に等しくなければならない。単一周波数モードで動作するトプティカ社の波長可変レーザーは標準構成で100mを超えるコヒーレンス長を提供する。さらにDLC proコントローラのもつ独自の周波数ロックングエレクトロニクスにより2台のレーザーを同時に位相ロックすることが可能である。このことから参照ビームは第2のレーザーを用いて媒体において直接生成することも可能である。

多くのアプリケーションにとって、レーザーの絶対波長と安定性は非常に重要なファクターとなる。(周波数ロック

ング機構等の)追加の構成がない状態ではフリーランニング半導体レーザーの出力波長はドリフトするのが通常である。これらの波長ドリフトはレーザーに内蔵した大気圧補償機構を使用することで強く抑制すること可能となる(図5a)。冷却水を用いない構成のため高周波における波長ジッタの量は無視できるレベルに小さい。絶対的な波長基準が必要な場合は基準分光セルモジュールをシステムに接続して利用することができる。たとえばルビジウム原子のガスのD線によって提供される390.1nmおよび397.5nmの絶対参照系が実現されている(図5b)。また原理的に波長基準に用いる分光ガスセルを単純にデジ

タル波長ロック機能を備えた光波長計に置き換えることですべての波長への応用が可能となる。

上記から半導体レーザーはすでに確立された一般的な波長だけでなく紫外領域および可視領域のすべての波長において、ホログラフィおよびリソグラフィアプリケーションを実行するうえでの技術的要件を十分に満たしている。ほかの種類の伝統的なレーザーと比較した時、装置全体のハンドリング、操作性、および所有コストなど多くの点で「非技術的」な利点と組み合わせると半導体レーザーは明らかにホログラフィにとって非常に魅力的なレーザー光源と言える。

参考文献

- (1) Eismann, Ulrich, et al. "Short, shorter, shortest: Diode lasers in the deep ultraviolet." *Laser Focus World* 52.6, 39-44 (2016).
- (2) Ernstberger, Bernhard, et al. "Robust remote-pumping sodium laser for advanced LIDAR and guide star applications." *Proceedings Volume 9641, Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XVIII*; 96410F (2015)
- (3) M. Scholz et al., *Appl. Phys. Lett.*, 103, 051114 (2013).
- (4) U. Eismann et al., "Active and passive stabilization of a high-power violet frequency-doubled diode laser," *CLEO 2016, JTu5A.65* (2016).

著者紹介

ウルリッヒ・エイスマンは独トプティカフォトニクス社、NLO半導体レーザーのプロダクトマネージャー、ティム・バシュコルバグは同社マーケティングディレクター、ハラルド・ロスマイアーは同社OEM半導体レーザーのプロダクトマネージャーをつとめる。
e-mail: ulrich.eismann@toptica.com URL: www.toptica.com