MIXSEL: 簡素化する超高速

マリオ・マンゴールド、クリスチャン A. ゾーグ、サンドロ M. リンク、アライン S. マイヤー、
マチアス・ゴリング、ボーク W. ティルマ、アーシュラ・ケラー

光励起モードロック集積外部共振器面発光レーザ（MIXSEL）は、可飽和吸収体を集積した超高速高出力半導体ディスクレーザである。簡素なストレートキャビティ内のパッシブモードロックが、ローノイズ超高速ギガヘルツレーザの新たなベンチマークになる。

今日使われているほとんどの短パルスダイオード励起固体レーザは半導体可飽和吸収ミラー（SESAM）モードロックをベースにしており、アプリケーションは光通信や精密計測から顕微鏡、眼科、マイクロマシニングまで重要な産業分野に広がる[(1)]。最近の成果では、このパルス生成アプローチが新たな種類の半導体レーザに広がった。ここでは、利得と吸収体の両方をウエハスケールで集積して垂直放射構造にした。これによって、この技術には量産市場に展開する可能性がでてきている。この技術が最初に実証されたのは2007年、モードロック集積外部共振器面発光レーザ（MIXSEL）と言われていた[(2)]。

MIXSELは、半導体ディスクレーザ（SDL）、垂直共振器型面発光レーザ（VCSEL）ファミリーの一部である。光励起VCSELは、異なるIII-V半導体材料系で量子井戸（QW）と量子ドット（QD）のバンドギャップエンジニアリングを用い、650nmから2.2μmを超える波長範囲で平均出力ミリワットを生成する。

外部共振器と組み合わせたこの薄いSDL媒体により優れた出力ビーム品質が確保できるだけでなく、多様な線形および非線形エレメントを非常にコンパクトなキャビティデザインに集積することも可能になっている。例えば、キャビティ内第二高調波発生（SHG）により前例のない出力で可視光やUV波長を生成する[(3)]。キャビティ内SESAMは、平均出力ミリワットで安定したパルスを生成する[(4)]。さらに単一周波数、デュアル周波数動作、イントラキャビティテラヘルツ生成も達成されており、SDL技術の信頼性と多様性が示されている[(5)~(7)]。

キャビティ内周波数変換機能を持つ光励起VCSELは米コヒレント社が、光励起半導体レーザ（OPSL）製品ポートフォリオで商用化に成功している。ダイオード励起固体レーザと対照的に、OPSLでは動作波長域は遙かに広くとれ、それでもローノイズ動作が維持できる。

光励起MIXSEL技術は、ピコ秒やフェムト秒パルス生成に向けた新しい製品ファミリーにつながると考えられる。この新しい製品ファミリーは、マルチワットの平均出力（**図1**）、広い波長の柔軟性、ギガヘルツのパルス繰り返しレートでほぼ量子雑音限界パフォーマンスとなる[(8)、(9)]。利得と吸収体層を単一のウエハに集積することで、簡素な直線的キャビティが実現可能となる。キャビティ長は調整してパルス繰り返しレートを約1GHzから100GHz以上にすることができる。アプリケーションは、テレコム、データコム、周波数コムがある。また、折り返しキャビティでは、医療や生体光アプリケーション向けにもっと低いMHzのパルス繰り返しレートまでカバーできる[(10)]。

SESAMモードロックVCSEL

MIXSELは、V形状もしくはZ形状キャビティ構成にイントラキャビティSESAMを加えたパッシブモードロックVCSELから発展した。SESAM内のQWまたはQDいずかの可飽和吸収体により、パッシブモードロックが始ま

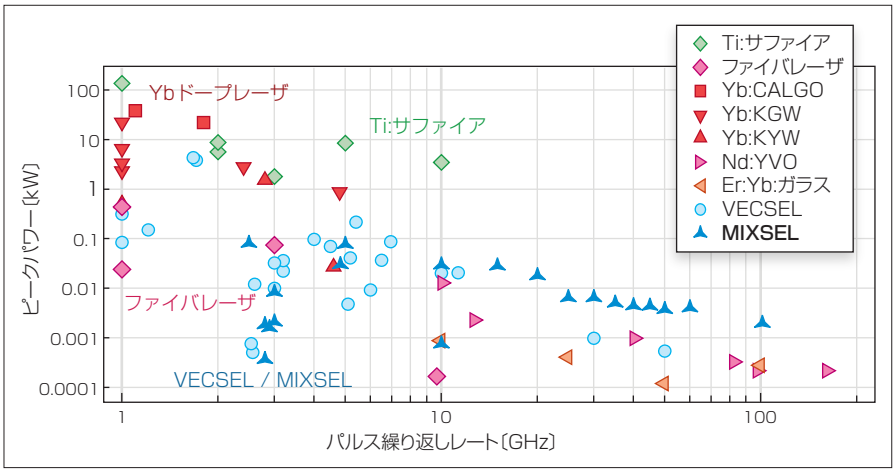


図1　様々なギガヘルツ基本モードロックレーザのピークパワーを比較している。MIXSEL技術は、15～100GHzパルス繰り返しレートで記録的に高いピークパワーを達成している。

り、安定化する。グラフェン可飽和吸収体は、現状では、損傷のために、パフォーマンスが制約される[11]。

イオンドープ固体レーザと違い、半導体レーザでパルス形成のためにネットゲインウインドウをオープンにしておくには、より低いパルスフルエンス(面積あたりのパルスエネルギー)では、動的利得飽和と損失飽和とでより一層の注意深いバランス達成が必要である。イオンドープ固体レーザではこれは問題にならない。と言うのは、利得は大きな動的利得飽和を示さないからであり、時間非依存の値まで単純に飽和して、決まったイントラキャビティ平均パワーとなるからである。次に、パルスは一定時間で吸収体を飽和し、短パルス生成をサポートする。つまり、ソリトンモードロックを安定化するネットゲインウインドウを開くだけである。したがって、SDLにおける安定パルスの生成には、低い吸収体飽和フルエンスと高速吸収回復力学が必要とされる。

平均パワーが1Wを超える初のフェムト秒VCSELが2011年に実証された。最近になって、SESAMモードロックVCSELのパフォーマンスが他のグループによって一段と改善された。結果として得られたデバイスは400fsパルスを生成し、繰り返しレート1.67GHzで平均出力3.3Wだった。または、1.7GHzで平均出力5.1W、682fsパルスを生成した[12]~[14]。

MIXSEL: 次の集積ステップ

MIXSELは、複雑さとコストを削減する上で次のステップを示している。SESAM可飽和吸収体をVCSELの利得構造に集積することで、レーザのセットアップは、出力カプラと半導体チップの2キャビティ構成に縮小する。わずか2つの構成要素を持つ直線的リニアキャビティによってレーザは極めて安定的になり、動作も簡素化される(**図2a**)。また、大きなキャビティ長をサポートする。パルスの往復時間がパルス繰り返しレートを決めると言うことである。

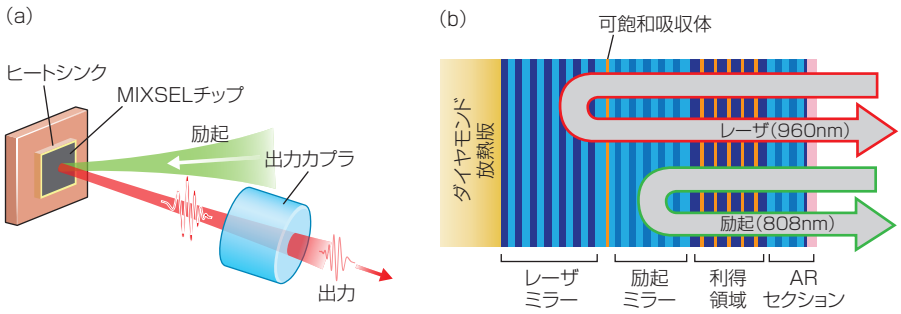


図2 MIXSELコンセプトでは、MIXSELチップと湾曲した出力カプラが直線的なリニアキャビティを構成する(a)。温度最適化されたMIXSELチップは約45°の角度から光励起される。2つのキャビティ構成要素の距離によって基本モードロックのパルス繰り返しレートが決まる。MIXSEL半導体層スタックは、発振と励起波長のためのDBRを構成する。間に可飽和吸収体単一層が埋め込まれている(b)。活性領域は励起光を吸収するようにGaAsに埋め込まれた10QWをベースにしている。改善されたARセクションによって確実に、励起光が低反射になり、短パルスが生成するようになっている。

利得チップは、市販のハイパワーダイオードアレイで励起する。アレイは低品質マルチモード連続波(CW)励起ビームを、ピコ秒もしくはフェムト秒パルスで基本的なガウシアン出力ビームに変換する。**図2b**は、中心波長960nm付近で動作するごく最近のMIXSEL半導体構造を示している。単一層可飽和吸収体は、発振波長(この場合約960nm)用分布ブラッグ反射器(DBR)と励起波長(約808nm)用DBRとの間に置かれている。

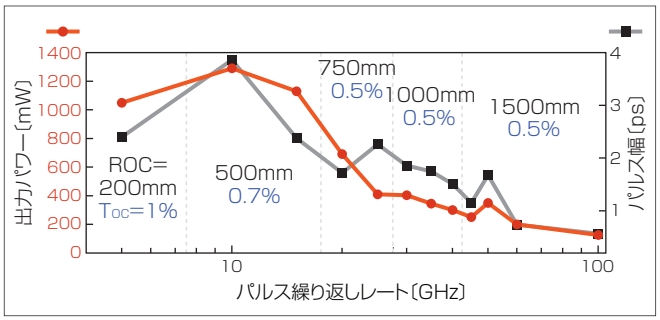
活性領域は、励起吸収障壁に埋め込まれた10QWをベースにしている。MIXSELウエハ上の最適化された反射防止(AR)セクションが、反射損失を最小化し、確実にフラットで低群遅延分散となって短パルス生成ができるようにしている。効率的な熱抽出とハイパワー動作のために、構造は逆順で成長し、次にダイヤモンド放熱板にフリップチップボンドされる。ウエハ基板は湿式化学処理(ウエットケミカル)で除去される。

半導体レーザの安定的パッシブモードロックでは、パルス形成が起こるネットゲインウインドウを開くために可飽和吸収体は利得QWよりも低いパルスフルエンスで飽和しなければならない。SESAMモードロックVCSELでは、これは一般に利得のレーザモード半径とSESAMの間の比率を調整することで達成される。しかしMIXSELでは、レーザモードエリアは、利得領域および吸収体領域で同じである。

共振MIXSEL設計(2007年に実証されたように)は、副共振器を持つネットゲインウインドウを生成し、アクティブゲイン層に関しては吸収層の位置で電場が強まる[2]。しかし、この設計には多くのトレードオフがある。反共振MIXSELデザインを利用するにはメリットが一段と強くなり、その場合、利得と吸収体で電場増強はほぼ同じとなる。このことから、利得層と比べて、飽和フルエンスを抑えるために特別な吸収体最適化が必要だった。これは当初、QD吸収体層で得られたものだった。

これによって6.4Wという過去最高平均出力を達成したが、長いパルス幅

(a)



(b)

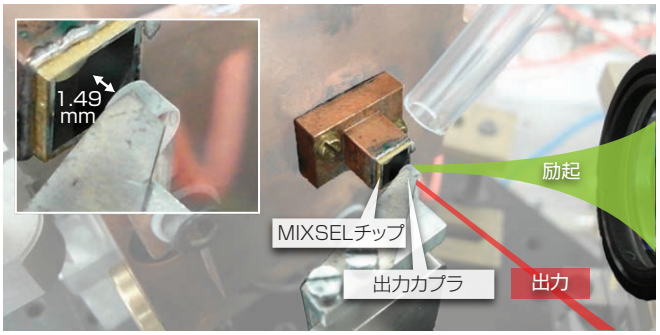


図3 MIXSEL繰り返しレートの拡大縮小で、平均出力(オレンジ色の丸)とパルス幅(グレーの四角)が、5～101.2GHzのパルス繰り返しレート拡大縮小として示されている(a)。異なるキャビティ長に対する安定したキャビティパラメータは、適合出力カプラ曲げ半径(黒)と透過性(青)とで確保される。ワットレベル動作は、最大15GHzで、フェムト秒動作は60GHz以上で得られた。フェムト秒100GHz繰り返しレートMIXSELの1.49mm長キャビティの写真を示している(b)。(ETHチューリッヒ提供)

と引き替えだった(2.5GHz繰り返しレートでパルス幅28ps)。理由は、集積したQD可飽和吸収体が、分子線エピタキシー(MBE)による長い成長過程におけるアニーリング中にスローになったためである。リニアキャビティ長を縮小することで10GHzパルス繰り返しレートは可能になったが、まだ17psパルスで平均出力は2.4Wである。

ごく最近、アニーリング後でも、低い飽和フルエンスと非常に速い回復時間の両方を示す、新しいQW吸収体が開発された。これにより、飛躍的なパルス幅縮小をサポートする最新のMIXSELが実現した。この新しいハイパワーMIXSELにより、キャビティ長を段階的に縮小し、それに応じて出力カプラを調整することで、パルス繰り返しレートは、約5GHzから100GHzを超えるところまで(**図3a**)拡大した。サブ4psパルスで15GHzワットレベル動作までを達成した。

加えて、60GHzと101.2GHzパルス繰り返しレートでの安定したフェムト秒動作が達成された。これは、基本モードロックSDLの中で最高のパルス繰り返しレートであり、これまでのMIXSELの最短パルス幅を表している(**図3b**)。このようにしてMIXSEL技術により、15GHz～100GHzの間の基本モードロックレーザで最高の平均出力と最高のピークパワーを実現した[8]。

さらに、ピコ秒MIXSELの詳細なノイズ特性評価では、タイミングジッタは1Hz～100MHzで積分された実効値(RMS)70fsよりも少なく、RMS振幅ノイズは0.15%以下(1Hz～40MHz)となり、これによってハイパワーモードロックSDLが従来のイオンドープギガヘルツ固体レーザに匹敵するノイズパフォーマンスが可能であることが確認された[9]。

光励起MIXSELの未来は明るいと考えられる。SDLファミリーの商用製品は、コヒレント社のOPSLおよび今日幅広いアプリケーションで利用されているVCSELというしっかりした実績を持っている。光励起は、出力をメガワット平均パワー域に伸ばすには理想的である。電気励起によって励起の複雑さは軽減されるが、平均出力が犠牲になる。これは光と電気の損失の間には本質的なトレードオフがあるためである[15]。

謝辞

著者たちは、先端的マイクロテクノロジー、ナノテクノロジーに対する、ETHチューリッヒの技術およびクリーンルーム施設FIRSTの支援に感謝する。この成果は、スイス連邦プログラムNano-Teraから資金提供を受けた。このプログラムは、スイス国立科学財団(SNSF)の科学的評価を受けている。

参考文献

(1) U. Keller, Appl. Phys. B, 100, 15-28(2010).
(2) D. J. H. C. Maas et al., Appl. Phys. B, 88, 493-497(2007).
(3) S. Calvez et al., Laser Photon. Rev., 3, 407-434(2009).
(4) U. Keller et al., Phys. Rep., 429, 67-120(2006).
(5) A. Laurain et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 26, 131-133(2014).
(6) F. A. Camargo et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 24, 1218-1220(2012).
(7) M. Scheller et al., Opt. Exp., 18, 27112-27117(2010).
(8) M. Mangold et al., Opt. Exp., 22, 6099-6107(2014).
(9) M. Mangold et al., IEEE Photon. J., 6, 1-9(2014).
(10) C. A. Zaugg et al., Opt. Exp., 20, 27915-27921(2012).
(11) C. A. Zaugg et al., Opt. Exp., 21, 31548-31559(2013).
(12) M. Hoffmann et al., Opt. Exp., 19, 8108-8116(2011).
(13) K. G. Wilcox et al., Opt. Exp., 21, 1599-1605(2013).
(14) M. Scheller et al., Electron. Lett., 48, 588-589(2012).
(15) Y. Barbarin et al., IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., 17, 1779-1786(2011).

著者紹介

マリオ・マンゴールド、クリスチャン A. ゾーグ、サンドロ M. リンク、アライン S. マイヤー、マチアス・ゴリング、ボーク W. ティルマ、アーシュラ・ケラーは、ETHチューリッヒの超高速レーザ物理学(ULP)グループに勤務。Auguste-Piccard-Hof 1, 8093 Zurich, Switzerland;
e-mail: keller@phys.ethz.ch URL: www.ulp.ethz.ch.

LFWJ