

## 半導体レーザーによる高機能超短光パルス光源

横山 弘之<sup>†a)</sup>

Highly Functional Ultrashort Light Pulse Sources Based on Semiconductor Lasers

Hiroyuki YOKOYAMA<sup>†a)</sup>

あらまし 近年の超短光パルス半導体レーザーの進展について著者らの研究に基づいて概説する。モード同期半導体レーザーは、その内部の可飽和吸収効果の精密な制御が可能になったことにより、現在では小型・高安定な超短パルス光源として高い完成度に達している。種々の材料系の半導体レーザーにおいて基本的に同様の設計論により、青紫～近赤外の波長領域において安定なモード同期が実現された。また、光パルスの増幅による高ピークパワー化により、非線形多光子効果を用いたイメージングや光記録の機能も確認された。他方、小型デバイスである半導体レーザーの特徴を活かした利得スイッチング動作においても新しい進展があり、高速強励起の条件下で、モード同期に迫る時間幅の光パルスが得られるようになった。これらの超短光パルス半導体レーザーは、今後、バイオメディカル分野を始めとする先端的应用分野において実用性に優れた高機能光源として発展していくことが期待される。

キーワード 半導体レーザー, 超短パルス, 非線形光学効果, バイオイメージング

### 1. ま え が き

ピコ秒領域の光パルスを発生する半導体レーザーは、主には、他のレーザーで発展してきたモード同期による超短パルス発生機能が、デバイス作製技術の成熟とともに半導体レーザーでも実証され、それとともに応用と高信頼化の研究が進められてきた経緯がある [1], [2]。それゆえ、光通信や光ディスクへの応用を主眼として強力な開発が推進されてきた半導体レーザーの技術発展の歴史の中ではやや特異なデバイスとして位置づけられる。しかし、この生い立ちゆえに、以下に述べるように、情報通信技術におけるキーデバイスという枠組みを越えて、他の半導体レーザーにはない多様な応用へのポテンシャルをもつことにつながっている。

本論文では、電流励起による半導体レーザー (LD: laser diode) からの超短光パルス発生技術の発展と、最近の高機能光源への展開について概説する。ここでは、数 ps 幅以下の光パルスの生成に着目して、主と

してモード同期半導体レーザー (MLLD: mode-locked LD) についてこれまでの筆者らの研究を中心に述べる。しかし、最近になって、半導体レーザーの特徴を活かした利得スイッチング動作 (GS: gain switching) においても新しい成果と知見が得られており、それについても併せて述べる。

なお、本論文では、超短光パルスと言いつても、フェムト秒領域の時間幅の光パルスは対象としていない。この理由は、産業応用での実用化を念頭において、多くの応用においては数 ps の時間幅を下限とすることで十分であることによる。フェムト秒領域になると光パルスを使いこなすためには分散補償などの技術が不可欠になり、むしろ応用上の制限要因になることも少なくない。また、現在では、非線形光学効果を利用して数 ps 幅の光パルスを 1 桁程度時間領域で圧縮することは比較的容易であり、必要であれば光パルス圧縮を用いるということが基本的な立場でもある。

### 2. モード同期半導体レーザーの概略

MLLD の動作は、外部共振器型のレーザーの構成を考えると固体レーザー等との類似性から理解しやすい。図 1 に示す構成では、LD チップの片方の端面に反射防止 (AR: anti-reflection) コーティングを施し、出

<sup>†</sup> 東北大学未来科学技術共同研究センター (NICHe), 仙台市  
New Industry Creation Hatchery Center (NICHe), Tohoku  
University, 6-6-10 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi,  
980-8579 Japan

a) E-mail: yoko@niche.tohoku.ac.jp

方光をコリメートして反射鏡で光を LD 内の光導波路に戻し AR コーティングをしていないもう片方の端面の反射とで共振器が構成される。最も基本的な動作としては、共振器内を光が往復する時間の周期で LD への注入電流を正弦波変調（利得変調）することで、共振器内を往復する低タイミングジッタかつ低チャージングの光パルスが形成される（能動モード同期）。しかし、モード同期により数ピコ秒以下の時間幅の光パルスを得る上では、LD デバイス内に組み込まれた可飽和吸収体（SA: saturable absorber）が大きな役割を果たす。固体レーザのモード同期動作でよく知られているように、SA は、光強度が低いと吸収が大きく、光強度が高いと吸収が飽和して透過率が高くなる非線形光学的性質をもつ。この作用により共振器内で超短光パルス化が進行する（受動モード同期）。近年の MLLD の進歩は、SA の作り込みが旧来はイオン注入等による結晶欠陥の導入によっていたのが、半導体量子井戸構造により SA の動作を電氣的に制御できるようになったことに負うところが大きい [1], [2]。多くの場合、LD 素子上面の電極を、片方を LD 素子全体長の 1 割以下の長さとなるように 2 分割し、短い方の電極に逆バイアスを印加することでその導波路領域が SA としての作用を示す（SA 領域）。また、長い方の電極には通常の LD と同様に順電流を注入することで、その導波路領域にて光増幅作用が得られる（利得領域）。この 2 セクション型の LD において、二つの電極間の分離抵抗を  $1 \text{ k}\Omega$  程度以上にすることで、二つの領域においてほぼ独立の電氣的制御が可能となる。このような SA 領域をもつ MLLD では、 $1 \text{ GHz}$  程度以下の周波数の動作では、利得電流に正弦波変調を加えることで電氣的に同期した超短光パルスが得られる。しかし、 $10 \text{ GHz}$  程度以上の高速繰り返しパルス動作の場合には、電氣的な正弦波変調を、利得電流には

なく、SA 領域に印加する逆バイアスに重畳して共振器の損失変調を行う方がより電氣的な同期が取りやすい。電氣的変調による能動モード同期的動作と SA による受動モード同期的動作とを併用する動作はハイブリッドモード同期と呼ばれる。なお、フェムト秒領域まで超短パルス化を図りたい場合には、LD 中の群速度分散の非線形性の問題等から、MLLD からの直接発生よりも、外部での光パルス圧縮を用いるほうがむしろ制御が容易である。

超短パルス光源としての MLLD の特長を幾つか記すと、LD ベースの他の方式（代表的には、GS 動作、及び外部変調器による強度変調）との比較では、時間幅の短い光パルスが容易に得られる、短パルスを作る過程で大きな光学的損失がないので高 SNR (signal to noise ratio) が得られる、等が挙げられる。また、最近盛んな開発がなされているモード同期ファイバレーザや小型モード同期固体レーザとの比較では、やはり電氣的同期が容易に実現されることが大きな利点である。

### 3. モード同期半導体レーザのデバイス構造

まず、MLLD の基本的な動作特性を理解するために、利得領域に加えて SA 領域を有する 2 電極型デバイス単体の構造とその受動モード同期動作について述べる。代表的な例として、波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯における 2 セクション型 MLLD デバイスを取り上げる。

図 2 に、ダブルチャンネルプラナー埋込みヘテロ (DC-PBH: double channel planar buried heterostructure) 構造をもつデバイスの概略を示す。このデバイスの活性層は、InGaAs/InGaAsP のひずみ多重量子井戸の分離閉じ込めヘテロ構造である。半導体レーザチップの両端面を反射鏡とする  $10 \text{ GHz}$  動作のデバイスでは約  $4 \text{ mm}$  のデバイス長となるが (LD 内の群速度屈折率が  $3.7$  程度であるため)、そのうち

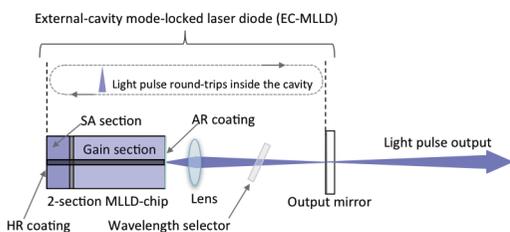


図 1 モード同期半導体レーザ（外部共振器型）の構成  
Fig. 1 Schematic of an EC-MLLD (external-cavity mode-locked laser diode).

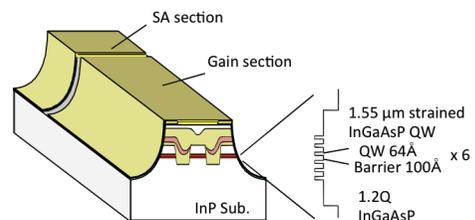


図 2 2 セクション型デバイスの基本的な構造  
Fig. 2 A typical example of 2-section LD device structure.



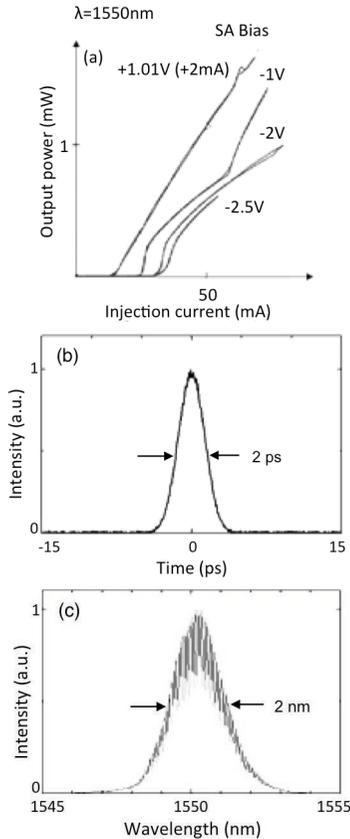


図4 図3に示す EC-MLLD の (a) 電流対光出力特性, (b) 光パルスの強度自己相関波形, (c) 光スペクトル

Fig. 4 Characteristics of optical pulses generated from an EC-MLLD module. (a) light output vs. gain current curves at different SA bias voltages, (b) intensity auto-correlation trace, and (c) optical spectrum.

器外の配置であれば LD 内の非線形効果を排して純粋に線形な作用のみで制御することになる。

また、図4の入出力特性において、ヒステリシスが存在しないことに言及しておきたい。ヒステリシスがあれば、一つの入力に対して二つの動作点があることになるが、その多くの場合、良好なモード同期はヒステリシスの領域で観測される傾向がある。しかし、このような動作モードでは、外部からの揺動（反射光など）で、動作点が変わってしまうので信頼性のある光源として使えない。このことから、ヒステリシスをなくするために、LD 材料の組成、SA 領域の比率、動作時の逆バイアス等に関しての条件を精密に制御する努力がなされてきた。

モード同期レーザは、その動作が SA 領域の非線形

吸収と利得領域の飽和増幅に基づいており、その意味では非線形光学デバイスの一つとして位置づけることもできる。一般に非線形光学デバイスの長期高安定動作を実現するのはたやすいことではないが、MLLD についても、長期安定動作という視点での評価はなされていなかった。しかし、通信や計測への応用を確実に推し進める上では、このような安定性の評価は不可欠である。図3の EC-MLLD では、受動モード同期動作の状態において、数ヶ月にわたる連続動作でも動作の劣化は見られず、またモード同期周波数の変動も  $\pm 1\text{ MHz}$  以内に留まった。マイクロ波を用いた正弦波変調の併用によるハイブリッドモード同期の周波数引き込み幅は  $\pm 10\text{ MHz}$  であったので、上記の変動値はそれより1桁小さく、長期間安定なハイブリッドモード同期動作が可能であることもわかった。また、平均光出力の変動は  $\pm 1\%$  以内であった。更には、作製後10年以上を経た後でも、所定の電気的入力により直ちに安定なモード同期動作が生じることも確認されている。このような高安定の動作は、現在の EC-MLLD の技術が、レーザ内部の非線形光学効果の安定性ととも、外部共振器の安定性も実用上十分な水準に達していることを示している。

更に、ここでは InGaAsP 系 LD について具体的に述べたが、AlGaAs 系 [5]、InGaAs 系 [6]、そして InGaN 系 [7], [8] についても 2 セクション型 LD と外部共振器構成により再現性のよいモード同期が得られている。すなわち、400 nm から  $1.55\ \mu\text{m}$  帯での主立った波長の材料系において、ほぼ共通の設計論で EC-MLLD が実現されていることは特筆すべき点である。

## 5. 利得スイッチング半導体レーザにおける最近の進展

これまで述べてきたように、LD から数 ps 時間幅の超短光パルスを得るには、SA 効果を内在する素子によるモード同期動作を用いるのが確実に再現性もよい方法である。しかし、LD では簡便でかつ任意繰り返し光パルスを得る手段として、歴史的には電気的パルス励起による GS 動作が多用されてきた [9]。GS 動作の LD (GSLD) から生成する光パルスの時間幅は一般的には 20–100 ps 程度であるが、実は、現在でも GS 動作の詳細な機構が正確に理解されているわけではなく、それゆえ短パルスの限界性能も明らかにされていない。実際、最近になって、10 GHz 以上

の高周波変調特性を有する  $1.55\ \mu\text{m}$  帯 LD において、強い GS 動作のもとで  $10\ \text{ps}$  以下の時間幅の光パルスが比較的容易に得られ、その増幅・波長変換により高ピークパワーパルス光源としての機能と応用が実現されるに至っている [10]~[12].

GSLD からの数 ps 時間幅の光パルス生成の条件は、まずは、パルスの強励起によりできるだけ高密度のキャリアを過渡的に生成することにある。このような励起のもとでは、ファブリー・ペロー型共振器の LD の場合には、発振光スペクトルがほぼ利得帯域いっぱいに広がる。発生した光パルスの動的挙動を波長分解して調べてみると、短波長成分ほどパルス生成のタイミングが早くまた時間幅も短い傾向が見られた [13]. これは、レーザ発振の高速初期過程が高エネルギー側で優先的に現れていることを示している。一方、分布帰還 (DFB: distributed feed-back) 構造等により単一縦モード発振するように制御された LD では事情が異なり、パルスの強励起下でも単一モード発振するが、高キャリア密度に対応して屈折率が低下し、過渡的に顕著な短波長シフトが見られる [14], [15]. このときに、適切な帯域の光フィルタ (BPF: band-pass filter) を用いて短波長端付近の成分を選択的に抽出すると、 $1.55\ \mu\text{m}$  帯 DFB-LD では、 $5\ \text{ps}$  弱の時間幅をもつほぼ FTL の光パルスが得られることがわかった [14]~[17]. したがって、ダイナミックな共振波長の変化とともに、高エネルギー側のキャリアによるレーザ発振が超短パルス生成に本質的な寄与をしていると考えられる。また、広がった光スペクトルの中間部分を適当な幅の光フィルタで抽出してみると、この領域では、時間とともに低周波数にシフトするダウンチャープングがほぼ線形に生じており、線形の分散補償光学素子により時間幅を圧縮できることがわかった。この手法により、 $4\ \text{ps}$  幅の FTL 光パルスが得られている [18]. 一方、短波長端では、先述のようにもともとチャープングがほとんどないために、同じ分散補償素子を用いると光パルスの時間幅広がりが生じる。

このような知見に基づいて、新規に作製した波長  $1\ \mu\text{m}$  帯の InGaAs 系 DFB-LD においても GS 動作の特性を詳細に調べ、 $7\ \text{ps}$  幅の FTL 光パルスの発生を確認することができた [19]. 図 5 に、それを示す光パルスの強度自己相関測定結果を  $1.55\ \mu\text{m}$  帯 DFB-LD からの光パルスの測定結果と対比して示す。  $1.55\ \mu\text{m}$  帯 LD の光パルスの時間幅との差異は、LD の電氣的応答の高速性の制限に起因していると考えられる。  $1\ \mu\text{m}$

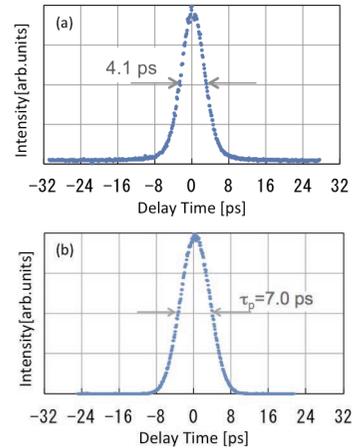


図 5 利得スイッチング動作の DFB-LD から発生した光パルスの波長フィルタリング及びチャープング補償後の強度自己相関波形。(a)  $1.55\ \mu\text{m}$  帯 DFB-LD, (b)  $1\ \mu\text{m}$  帯 DFB-LD

Fig. 5 Intensity auto-correlation traces for the spectrally-selected and chirping-compensated optical pulses generated from (a)  $1.55\ \mu\text{m}$  DFB-LD, and (b)  $1\ \mu\text{m}$  DFB-LD.

帯の超短光パルスは、次節で述べるように、蛍光タンパク質が発現している生物の細胞組織深部を多光子レーザ顕微鏡で観測する上で非常に有用であり、現在、更に GSLD の特性向上を図っている最中である。

数 ps 幅の光パルスが GSLD によって発生できることは、応用上のメリットが非常に大きい。MLLD では、吸収及び利得の飽和効果の精密なバランス制御が必要であり、更に、光パルスの繰り返しを可変にするために光ゲート機能をもつデバイスを付加することが必要になる。一方、GSLD では、パルスの強励起でレーザ発振の利得を過渡的に大きくすることが動作の本質であり、通常の意味での非線形光学効果の制御は不要である。また、光パルス生成は励起パルスごとの単発現象であるために、繰り返し周波数は任意可変であることも利点となる。これまで、GSLD による超短光パルス発生技術は主に光通信応用を目的として発展してきたので、大きな周波数チャープングを伴う強励起のもとでの GS 動作は必ずしも十分には調べられてこなかった。しかし、新たな応用開発の視点からも、また動作ダイナミクスの基礎の視点からも、改めて GSLD の高性能デバイス及び動作機構の研究に取り組む価値があると考えられる。

## 6. 超短パルス半導体レーザーの高機能光源としての活用

情報通信に関連する応用についてはこれまでも述べてきたので [1], [2], ここでは最近の新しい応用への展開について述べたい. その中心となるのは, 光パルスの増幅による高ピークパワー化とそれによる非線形光学効果の誘起である. 4. において, 種々の材料系における MLLD の実現に触れたが, これらはその先に非線形波長変換や多光子励起イメージングへの応用を意図して開発を進めたものである. 近年の分極反転型非線形光学結晶技術の発達により, 1 kW 程度のピークパワーを得れば数十%の効率で波長変換を行うことができるようになってきている. また, 2 光子レーザー顕微鏡に代表される多光子励起イメージング系でも, 1 kW 程度以上のピークパワーをもつ 1-10 MHz の繰り返しの光パルスにより明瞭な像を得られることが実験的に確認された. それゆえ, kW オーダー以上の高ピークパワー化を目指して低雑音かつ低非線形ひずみの光増幅技術の開発も進めた. 図 6 は, InGaAs 量子井戸活性層の  $1\ \mu\text{m}$  帯 MLLD をベースとする光源構成であり, 980 nm 及び 1030 nm の波長帯で数 kW のピークパワーを得ることができている. MLLD の安定動作のために基本のモード同期周波数を 0.5-1.0 GHz に設定しているが, 半導体レーザー増幅器 (SOA: semiconductor-laser optical amplifier) の光ゲート (及び前置増幅) 機能によりサブハーモニック周波数でパルス周波数を低くすることができる. その後, Yb 添加光ファイバ増幅器 (YDFA: Yb-doped fiber amplifier) により高ピークパワー化を行っている. 波長 980 nm の光源は, 緑色蛍光タンパク質 (GFP: green fluorescent protein) が発現した生体組織の深部を 2 光子励起蛍光イメージング (TPI: two photon excitation fluorescence imaging) により観察することを目的に開発したものである. それによって得られた TPI 画像の一例を図 7 に示すが, 非常に明瞭なイメージングが可能であることがわかる. なお, この光源開発に先立ち, 我々の開発光源でスーパーコンティニューム (SC: supercontinuum) 光を発生させ, その増幅により 2 光子イメージングに適正な波長について知見を得た [11]. そして, 波長 1030 nm の光源は, GFP ではなくより長波長で発光する黄色蛍光タンパク質 (YFP: yellow fluorescent protein) が発現した生体組織の TPI により適することもわかった. 最近,

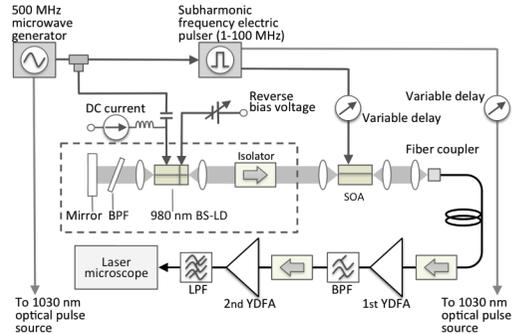


図 6 InGaAs 量子井戸活性層の  $1\ \mu\text{m}$  帯 EC-MLLD をベースとする高ピークパワー光源の構成. BPF: バンドパス光フィルタ; BS-LD: 2 セクション型半導体レーザー; SOA: 半導体レーザー増幅器; YDFA: Yb 添加光ファイバ増幅器; LPF: 長波長透過フィルタ

Fig. 6 Schematic configuration of the high-peak-power optical-pulse source based on an InGaAs-quantum-well EC-MLLD. BPF: tunable band-pass optical filter; BS-LD: 2-section laser diode; SOA: semiconductor optical amplifier; YDFA: Yb-doped fiber amplifier; LPF: long-wavelength-pass optical filter.

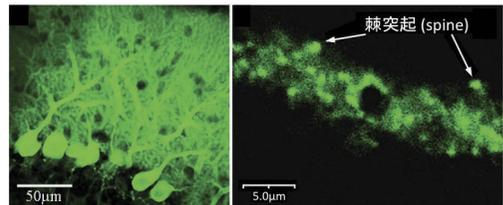


図 7 図 6 の光源 (中心波長 980nm) による緑色蛍光タンパク質 (GFP) が発現したマウス小脳のニューロンの 2 光子イメージング画像 (GFP 発現マウスは, 東北福祉大学坪川宏教授のご協力による)

Fig. 7 Two-photon excitation fluorescence image of a branch in mouse brain neurons expressing GFP. The two-photon image was taken with 980 nm optical pulses at a 10 MHz repetition rate. (The GFP expressing mouse is provided by H. Tsubokawa of Tohoku Fukushi University.)

平均光パワーを 2 W まで大きくした 1030 nm 光源により, YFP が発現したマウスの脳組織を表面から 1.4 mm まで深くイメージングすることができ, 海馬まで観測可能な TPI が初めて実証された [20].

上記の光源では高ピークパワー化のために光ファイバ増幅器を用いているので, それにより実現可能な波長帯が制限される. 他方, 光増幅機能を SOA のみで実現することができれば, LD で得られる波長帯全域を有効利用することができる. この視点で, AlGaAs 系及び

InGaN 系において、MLLD と SOA との組み合わせで高ピークパワー光源機能の追求を試みた [5], [7], [8]. LD 及び SOA では、キャリア寿命が 1 ns 以下程度であるため大きなエネルギーをデバイス内部に蓄えることができないので、1 kW のピークパワーを得るのは非常に難しい。しかし、LD では 1 GHz 以上の高速繰り返しパルスを得るのが容易なので、100 W 程度のピークパワーでも時間積算では同等の非線形光学効果が得られる。これまでに、AlGaAs 系の MLLD と 2 段の SOA の構成で、生体組織の TPI を実証することができている [5]。また、この技術を青紫色の InGaN 系 LD に拡張して、2 光子吸収に基づく光ディスクの体積光記録が可能であることも示された [21]。後者の場合では、1 段の SOA で 300 W 超のピークパワーを得るに至っているが、そのために、自然放出光雑音の低減、及び 3 次非線形光学効果による光パルスの光スペクトルと時間波形のひずみの抑制に実験と理論の両面から徹底的に取り組んだ。この全半導体レーザによる高ピークパワー超短パルス光源は、小型・高安定・低コスト、更に広帯域の波長選択性の視点で、一つの理想的な将来像であると考えられる。

## 7. む す び

以上、本論文においては、超短光パルス半導体レーザの進展と、情報通信の枠組み以外の新しい領域への応用について概説した。超短パルス光源として半導体レーザに期待されるのは、小型安定でかつ動作の信頼性に優れた実用的光源としての特徴であると考えられる。ここで見たように、長時間高安定の ML 動作が既実現されており、計測用途のデバイスとしては既に十分に産業レベルで実用可能な技術水準にある。この高安定動作は、動作に関わる自然放出光雑音や光学的な非線形効果を注意深く制御したことと、更に高安定な光共振器構造を実装する技術の進歩とによってもたらされている。見方によっては、レーザの光科学から新技術へと一歩踏み出した成果であると捉えることができる。また、GS 動作について、高速強励起下での高密度キャリア生成という視点で新しい展開があり、今後更に動作の理解を深めて制御技術の高度化を図ることにより、超短光パルス半導体レーザの基幹技術になり得ると期待される。そして、これらの超短光パルス半導体レーザは、バイオメディカル分野を始めとする多様な応用ニーズに対応し得る高機能光源として大きく発展していく可能性をもっている。

**謝辞** 本研究は、一部、JST 戦略的創造研究推進事業 (CREST) の研究課題「ベクトルビームの光科学とナノイメージング」、文部科学省科学研究費補助金 (新学術領域研究 No.20104004)、及び文部科学省大学発新産業創出拠点プロジェクト (START) 「超高機能光源の開発と先端バイオメディカル応用」の支援を得た。また、本論文で述べた研究を推進するにあたり連携・共同いただいた多くの方々に感謝する。

## 文 献

- [1] H. Yokoyama, "Highly reliable mode-locked semiconductor lasers," IEICE Trans. Electron., vol.E85-C, no.1, pp.27-36, Jan. 2002.
- [2] 横山弘之, "モード同期半導体レーザ," レーザハンドブック, レーザ学会編, pp.377-383, オーム社, 2005.
- [3] T. Shimizu, I. Ogura, and H. Yokoyama, "860 GHz rate asymmetric colliding pulse modelocked diode lasers," Electron. Lett., vol.33, no.22, pp.1868-1869, Oct. 1997.
- [4] I. Ogura, T. Sasaki, H. Yamada, and H. Yokoyama, "Precise SDH frequency operation of monolithic modelocked laser diodes with frequency tuning function," Electron. Lett., vol.35, no.15, pp.1275-1277, July 1999.
- [5] M. Kuramoto, N. Kitajima, H. Guo, Y. Furushima, M. Ikeda, and H. Yokoyama, "Two-photon fluorescence bioimaging with an all-semiconductor laser picosecond pulse source," Opt. Lett., vol.32, no.18, pp.2726-2728, Sept. 2007.
- [6] H. Yokoyama, A. Sato, H. Guo, K. Sato, M. Mure, and H. Tsubokawa, "Nonlinear-microscopy optical-pulse sources based on mode-locked semiconductor lasers," Opt. Express, vol.16, no.22, pp.17752-17758, Oct. 2008.
- [7] R. Koda, T. Oki, T. Miyajima, H. Watanabe, M. Kuramoto, M. Ikeda, and H. Yokoyama, "100 W peak-power 1 GHz repetition picoseconds optical pulse generation using blue-violet GaInN diode laser mode-locked oscillator and optical amplifier," Appl. Phys. Lett., vol.97, 021101, July 2010.
- [8] R. Koda, T. Oki, S. Kono, T. Miyajima, H. Watanabe, M. Kuramoto, M. Ikeda, and H. Yokoyama, "300 W peak power picosecond optical pulse generation by blue-violet GaInN mode-locked laser diode and semiconductor optical amplifier," Appl. Phys. Express, vol.5, 022702, Jan. 2012.
- [9] C.L. Lin, P.L. Liu, T.C. Damen, D.J. Eilenberger, and R.L. Hartman, "Simple picosecond pulse generation scheme for injection lasers," Electron. Lett., vol.16, no.15, pp.600-601, July 1980.
- [10] H. Yokoyama, H. Guo, T. Yoda, K. Takashima, K. Sato, H. Taniguchi, and H. Ito, "Two-photon bioimaging with picosecond optical pulses from a semiconductor laser," Opt. Express, vol.14, no.8,

pp.3467–3471, April 2006.

- [11] H. Yokoyama, H. Tsubokawa, H. Guo, J. Shikata, K. Sato, K. Takashima, K. Kashiwagi, N. Saito, H. Taniguchi, and H. Ito, “Two-photon bioimaging utilizing supercontinuum light generated by a high-peak-power picosecond semiconductor laser source,” *J. Bio. Optics*, vol.12, no.5, 054019, Sept. 2007.
- [12] A. Sato, S. Kono, K. Saito, K. Sato, and H. Yokoyama, “A high-peak-power UV picosecond-pulse light source based on a gain-switched 1.55  $\mu\text{m}$  laser diode and its application to time-resolved spectroscopy of blue-violet materials,” *Opt. Express*, vol.18, no.3, pp.2522–2527, Feb. 2010.
- [13] S.Q. Chen, M. Yoshita, T. Ito, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Yokoyama, “Gain-switched pulses from InGaAs ridge-quantum-well lasers limited by intrinsic dynamical gain suppression,” *Opt. Express*, vol.21, pp.7570–7576, March 2013.
- [14] S.Q. Chen, A. Sato, T. Ito, M. Yoshita, H. Akiyama, and H. Yokoyama, “Sub-5-ps optical pulse generation from a 1.55- $\mu\text{m}$  distributed-feedback laser diode with nanosecond electric pulse excitation and spectral filtering,” *Opt. Express*, vol.20, no.22, pp.24843–24849, Oct. 2012.
- [15] S.Q. Chen, M. Yoshita, A. Sato, T. Ito, H. Akiyama, and H. Yokoyama, “Dynamics of short-pulse generation via spectral filtering from intensely excited gain-switched 1.55- $\mu\text{m}$  distributed-feedback laser diodes,” *Opt. Express*, vol.21, no.9, pp.10597–10605, May 2013.
- [16] 横山弘之, パルスレーザ光発生装置, 特願 2004-199277, 特許 3669634, PCT 出願 JP2005/12031, 米国特許 Patent#US 7,538,936 B2.
- [17] 横山弘之, 半導体レーザ装置および非線形光学効果利用機器, 特願 2012-018769, 特許第 5194179 号.
- [18] 草間裕太, 石橋孝介, 波川壮智, 永蔭勇一, 後藤尊巨, 横山弘之, “利得スイッチング半導体レーザからの 4ps 時間幅光パルスの発生,” 第 60 回応物春季予稿集, 29p-C1-8, March 2013.
- [19] 草間裕太, 横山弘之, “1060 nm 帯利得スイッチング半導体レーザからの 7 ps 時間幅光パルスの発生,” 第 74 回応物秋季予稿集, Sept. 2013.
- [20] R. Kawakami, K. Sawada, A. Sato, T. Hibi, Y. Kozawa, S. Sato, H. Yokoyama, and T. Nemoto, “Visualizing hippocampal neurons with in vivo two-photon microscopy using a 1030 nm picosecond pulse laser,” *Sci. Rep.*, vol.3, 1014, Jan. 2013.
- [21] S. Tashiro, Y. Takemoto, H. Yamatsu, T. Miura, G. Fujita, T. Iwamura, D. Ueda, H. Uchiyama, K. Yun, M. Kuramoto, T. Miyajima, M. Ikeda, and H. Yokoyama, “Volumetric optical recording using a 400 nm all-semiconductor picosecond laser,” *Appl. Phys. Express*, vol.3, 102501, Sept. 2010.

(平成 25 年 7 月 8 日受付, 12 月 10 日公開)



横山 弘之

東北大学未来科学技術共同研究センター (NICHe) 教授. 1982 東北大学大学院博士課程修了 (工学博士). 同年, 日本電気 (株) (NEC) 入社, 中央研究所勤務. 以来, 半導体レーザデバイス物理, マイクロキャビティ光デバイス, 超高速光デバイス等の研究に従事. 1988–1989 MIT 客員研究員. 1994–2002 筑波大学物理学系連携大学院 (兼務). 2002 より東北大学. 極限機能半導体レーザとその非線形超解像イメージング応用の研究に従事. 米国光学会 (OSA), 応用物理学会会員.