

高ピークパワー超短パルス青紫色 GaInN 半導体レーザー

横山 弘之*・倉本 大*,**

High-Peak-Power Ultrashort-Pulse GaInN Blue-Violet Semiconductor Lasers

Hiroyuki YOKOYAMA* and Masaru KURAMOTO*,**

We have investigated the potential of ultrashort optical pulse generation from GaInN LDs under a university-industry cooperative research scheme. For the application in volume-type large-capacity optical data storage, nonlinear multi-photon absorption processes should be induced inside the storage material. Toward this, we have investigated several methods that can generate high-peak-power (more than several tens of watts) optical pulses at a very high repetition rate of 1 GHz or higher. In the present stage, our most certain approach combines mode-locked laser diodes (MLLD) and semiconductor-laser optical amplifiers (SOA). We have confirmed that well-developed MLLDs can produce stable single optical pulses of a few picoseconds temporal width and a few watts peak power at a 1-GHz rate. We also have carefully designed SOAs with flared waveguides to suppress amplified spontaneous emission noise inside. Employing these MLLD and SOA devices, optical pulses of more than 100-W peak-power have been generated with a simple single-amplifier scheme.

Key words: semiconductor laser, semiconductor optical amplifier, ultrashort pulse, mode locking, gain switching, self pulsation

GaN系半導体レーザーは、青紫色および近紫外波長域のレーザーダイオード(LD)の発振の実現^{1,2)}以来開発が急速に進み、周知のように、現在ではこのデバイスを心臓部とする高密度光記録技術がブルーレイという呼称ですすでに実用化されて普及が進んでいる。また、最近ではフルカラーディスプレイ応用を目的として長波長(緑色)化の開発がさかんに行われる一方で、逆に、紫外線領域への短波長化の研究も進展している。われわれの超短パルス光源研究は、GaN系LDの新たな波長資源の開拓というべきこれらの研究とは方向を異にしており、いわばレーザーの発振の形態を制御して高機能化を図るものである。本解説の最初に、この研究の背景を記してみたい。

GaN系の超短パルス半導体レーザーの研究に先立ち、大学側(東北大学NICHe)では、GaAs系をはじめとする他の材料系の半導体レーザーについて、高ピークパワーの

超短パルス発生機能の実現を図ってきた。その明確な応用ターゲットとして、二光子蛍光や第二高調波発生(second harmonic generation; SHG)などの非線形光学効果を利用した多光子バイオイメージング(multi-photon imaging; MPI)を掲げてきた³⁻⁵⁾。バイオメディカルの分野においては、MPIは非常に有用であることが認知されているが、イメージングシステムが高価でかつ操作が必ずしも容易ではないことから、その活用が大きく制限されていた。この問題の根幹は、多光子効果を誘起するのに必要な超短パルス光源に実験用途の固体レーザー装置が用いられていることにある。そこで、この光源ボトルネック問題の解消を意図して、光通信や光記録ですぐれた実用光源としての実績をもつ半導体レーザーの新たなポテンシャルの開拓を目指したのが、研究の起点である。それより以前に、超高速の材料・デバイスの動作評価において半導体レーザーが

*東北大学未来科学技術共同センター(NICHe) (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-10) E-mail: yoko@niche.tohoku.ac.jp

**ソニー(株)先端マテリアル研究所 (〒243-0014 厚木市旭町4-14-1)

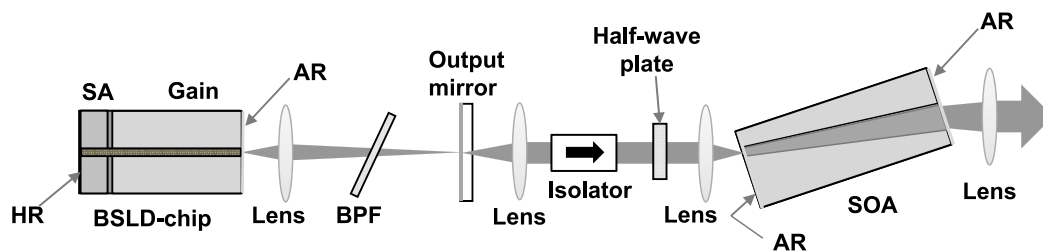


図1 高ピークパワー超短パルス GaInN 半導体レーザー光源の構成。

有用な超短パルス光源となり得ることがすでに示されていたので⁶⁾、MPIに十分な高ピークパワーを得ることを重点課題として研究を進展させ、超低非線形の光ファイバー増幅器の開発も行ってその実現を図った^{3-5,7-9)}。さらに、コンソーシアム的な産学共同研究により、全半導体レーザーによるMPIの実現に至り¹⁰⁾、この結果を得て、半導体レーザーが保有する豊富な波長資源を生かした高機能光源の実現可能性についての展望が開けた。

以上を背景として超短パルス青紫色 GaInN 半導体レーザーの産学共同研究を開始したのであるが、産業側(ソニー)では、応用原理がMPIと共通である多光子効果を利用した体積記録型の大容量光ディスクのための実用光源の開発が目標となった。これは、ブルーレイからさらに桁違いに光ディスクの記録容量を増大させる上で、体積記録が有力な方式であることによる。また、大学側(東北大学NICHe)では、基礎的側面よりもデバイス開発が大きく先行している GaN 系半導体レーザーという特異的な光デバイスについて、高ピークパワー超短光パルスというひとつの極限的機能を実現する過程で、デバイス物理に関する新しい知見を得たいという期待をもって研究に取り組んだ。

1. 100 W ピークパワー超短パルス光源の概略

半導体レーザーでは、小さなデバイスサイズとナノ秒程度以下の反転分布寿命(レーザー動作時のキャリア寿命)の制約から、大きなエネルギーを内部に蓄積できないので、1 kW 程度以上のピークパワーをもつ光パルスを得るのは非常に困難である。一方で、1 GHz 以上の高速繰り返し光パルスを得るのが比較的容易であるので、ピークパワーが小さい分を高速繰り返しにより相補しうる¹⁰⁾。具体的には、MPI実証時の性能に準じて、時間幅3 ps以下、ピークパワー100 W以上の光パルスをギガヘルツ繰り返しで発生させることを目標に据えた。この目標性能を得た全半導体レーザー光源の構成を図1に示す。光源は、外部共振器型のモード同期半導体レーザー(mode-locked laser diode; MLLD)発振器と一段の半導体レーザー光増幅器(semiconductor laser optical amplifier; SOA)からなる。構

成の簡便さからは単一のLDのみで所要性能を得るのが理想的だが、これまで超短光パルス発生の研究実績が全くない GaN 系 LD で一挙にすべてを思い通りに実現することはできない。それゆえ、発振器から超短光パルスを安定に得るための機能と、光パワーを増大するための機能とを大きく切り分けて開発を進めた。MPIの実証時には AlGaAs 系半導体レーザーにおいて MLLD と 2 段の SOA を用いたが、ここでは、1 段の SOA 構成にとどめるために、MLLD の光パワーをできるだけ大きくして、高出力 SOA が飽和増幅の状態で作動するようにした。平均光パワーとして、MLLD 出力が 10 mW、SOA 飽和出力が 500 mW を目標値とした。また、小型光源の形態による実用性を念頭において、光パルスの圧縮器は用いない方針とした。

最終的には、それまでの MPI 光源の設計思想を踏襲して、可飽和吸収(saturable absorption; SA)作用を電氣的に制御可能な2セクション型LD(bi-section LD; BSLD)素子による外部共振器型モード同期発振器を超短パルス発生源とする図1の光源構成をとるに至った。本稿ではおもにその動作特性について述べる。しかし、LDにおける代表的な光パルス発生方法である利得スイッチング(gain switching; GS)、および単体の BSLD によるセルフパルスセーション(self-pulsation; SP)についても、詳細な実験的研究を行う中で、他の材料系のLDにはみられない新奇な動作が観測された。それゆえ、次章では、MLLDの動作特性に加えて、GS動作とSP動作についても主要な特性を簡単に紹介する。

2. 光パルスの発生

本章では、最初に MLLD の動作について要点を述べる。図1に示すように、BSLD素子の利得領域側の端面に反射防止(anti-reflection; AR)コーティング(残留反射率<0.3%)を施して、レンズ(焦点距離4.5 mm)と平面反射鏡により外部共振器を形成している。バラック構成の実験系によるモード同期動作において、反射鏡の微少な傾斜ずれに対して共振器の安定性を向上させるために、ここでは反射鏡上にLD端面像を結像する構成をとっている。1

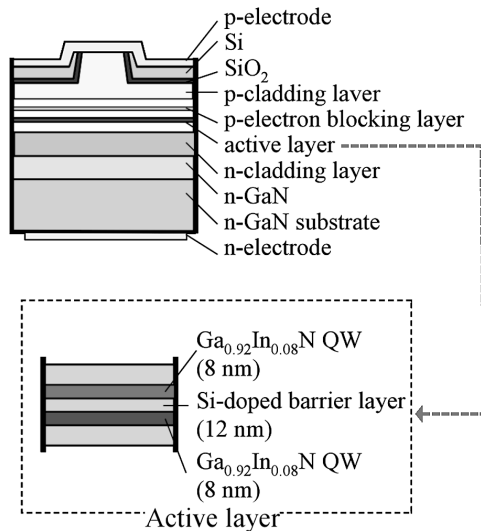


図2 GaInN-LDの層構造.

GHzのモード同期周波数に対応するように実効的共振器長を150 μmとし、できるだけ大きな光出力を得るために外部共振器の反射鏡の反射率を5%まで低くした。その一方で、共振器のQ値が小さくなりすぎないように、BSLDのSA領域側の端面に高反射(HR)コーティングを施して反射率を95%まで高めた。発振波長は、共振器内に配置された約1 nm帯域幅のバンドパス光学フィルター(band-pass filter; BPF)により選択することができる。用いたBSLD素子は、リッジ幅1.4 μm、全素子長600 μmであるが、550 μm長の利得領域と30 μm長のSA領域からなる。利得領域とSA領域とは20 μm長の電極分離領域により15 kΩの抵抗値で電気的に隔てられている。代表的なBSLD素子の層構造の概略を図2に示すが、n-GaN基板(C面)上にMOCVDでエピタキシャル成長した分離閉じ込めヘテロ構造であり、活性層は2つのGaInN量子井戸(8 nm厚)からなる。C面成長のGaInN系LDでは層方向の強いピエゾ電界が生じるが、ここでは量子井戸内での電界を低減する意図でバリア層にSiドーピングを行っている。また、導波路設計における光閉じ込め係数値は 5×10^{-2} 以下とした。

以上の発振器構成において、BSLD素子の利得領域に注入する順電流とSA領域に印可する逆バイアス電圧を適切に選ぶことにより、良好な受動モード同期動作を得ることができた。その基本的な振る舞いは、他材料系のMLLD^{5,6)}と定性的には同様である。ストリークカメラによる光パルス測定から時間幅は3 ps幅と見積もられ、平均光パワーが13 mWであることから、光パルスのピークパワーは4 Wに達することがわかった。当初、外部共振器型MLLDには、積層方向にSA領域を形成した素子を用いたが¹¹⁾、こ

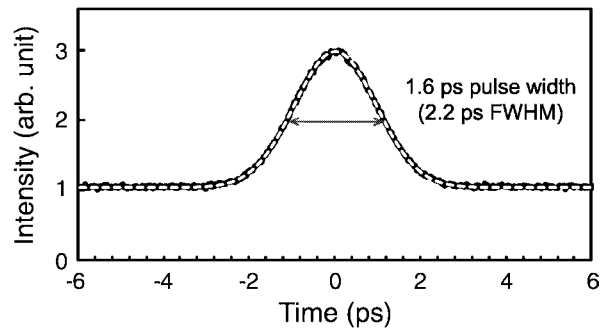


図3 発振波長405 nmのGaInN-MLLDからの1.6 ps時間幅の光パルス発生を示すSHG相関測定波形。β-BaB₂O₃結晶の表面SHGを利用して強度相関測定が可能となった。

の場合に比較して、BSLD素子を用いることで1桁程度時間幅の短い光パルスが得られた。また、SOAにより高ピークパワー化を図る上では、メインの光パルスを選択的に増幅してエネルギーを集中させるためにサブパルスの抑制は非常に重要な要件となるが、BSLDの層構造や外部共振器構成の改良を重ねることで、BSLDによる初期のモード同期でみられたサブパルス構造¹²⁾を消失させることができた。

ここで、400 nm帯の光パルスの測定技術についても、少し言及しておく。ストリークカメラの測定時間分解能は一般的には2~3 ps程度が限界であるため、時間幅が数ps以下の光パルスに対しては、多くの場合、非線形光学結晶によるSHGを利用した強度相関測定が用いられる。しかし、400 nm程度以下の波長の光パルスに対しては、SHGの位相整合条件を満たす汎用的な非線形光学結晶が存在しないために、十分な測定感度が得られないという問題がある。これに対応するために、二光子吸収・蛍光および固体表面でのSHGについて検討を進めた結果、β-BaB₂O₃(BBO)結晶の表面SHGを利用することで、LDからの光パルスの強度相関測定が可能になった¹³⁾。この測定により、GaInN-MLLDから発生する超短光パルスを詳細に調べたところ、素子および動作条件の注意深い選択により、1.6 ps程度まで光パルスを短くできることがわかった。このときの光パルスのSHG相関測定波形を図3に示す。光パルスの半値幅を見積もるに際しては、フィッティングがよく合うガウス型形状のパルスを仮定した。また、この測定では2分割したレーザー光を同軸でかつ同じ直線偏光で結晶表面に集光する構成をとるために、ピーク値に比して3分の1の強度のバックグラウンド成分が出ている。

ところで、GaInN-LDからのピコ秒光パルス発生は、モード同期より先に、通常の単電極LDを用いて電気パルス励起下でのGSにより実験的研究を開始した。電気パルスの電圧が10 V未満のときには、他材料系のLDと同様の

GS動作で、数十 ps の時間幅とピークパワーがサブワットレベルの光パルスが発生した。しかし、電圧をさらに上げると、他材料系の LD ではこれまで報告されていない相転移的な特異な振る舞いが観測された。顕著な短波長シフトとともに、時間幅は 800 μm 長デバイス内を光が 1 往復する時間の半分以下である 10 ps 程度に短くなり、ピークパワーは 10 W を超えるまで大きくなった¹⁴⁾。発生した光パルスは LD の基準でみれば“ジャイアントパルス”的であり、この振る舞いは、GS動作の中で高速の Q スイッチング現象が複層的に誘起された結果と考えられる。ストリークカメラを用いて時間分解分光測定を行った結果の例を図 4 に示す。(b) では、ピコ秒スケールの時間でダイナミックに波長シフトをする高ピークパワーの単一光パルスの後に、デバイス内を往復する周期で残留パルス成分が付随している。LD の電流を観測した限りでは明瞭な電氣的な非線形特性はみられないことから、特異な振る舞いの主要因は光学的非線形性の可能性がある(ひとつには横モードの光閉じ込めの動的変化が考えられる)。この特異的光パルスのピークパワーは、デバイス構造や電氣的励起の制御で 50 W 程度まで増大させることがわかった¹⁵⁾。しかし、駆動のためのエレクトロニクスが大掛かりになり、繰り返し周波数も 10 MHz 程度が限界であった。

一方、単体の BSLD による SP 動作は、受動モード同期とも密接にかかわる現象として重要である。多くの場合、外部共振器構成でモード同期を得るには、単体 BSLD で SP 動作が生じることが要件となる。また、実用性の視点からは、単一素子で高ピークパワーの光パルスが発生させる可能性を追求する余地のあるデバイスでもある。受動モード同期に先立ち、図 1 の BSLD の同様の素子構造で AR コーティングを施さない状態のデバイスで SP 動作が確認され、時間幅 30 ps、ピークパワー 2.4 W、繰り返し周波数 0.9 GHz の特性を得た¹⁶⁾。その後、デバイス構造の改良を進めて、最近では、光パルスの時間幅が半分程度に短くなり、ピークパワーは 20 W 以上という値にまで大きくなっている¹⁷⁾。

3. 光パルスの増幅

SOA は光通信系においては、通常、小信号光に対して 100 倍 (20 dB) を超える増幅利得をもつデバイスとして非飽和状態で用いられる。しかし、われわれの目的では、飽和増幅により可能な限り SOA から光パワーを取り出すことが重要となる。超短光パルスの増幅では、デバイス中で非常に高い光パワー密度となり非線形光学効果も強く発現することになるが、大きな光ピークパワー値を得ることを

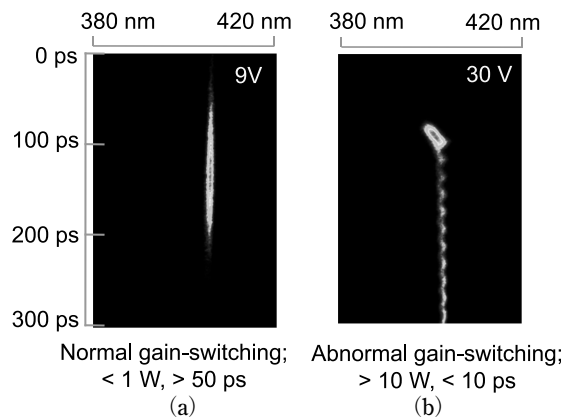


図 4 電氣的パルスによる利得スイッチングで GaInN-LD から発生した光パルスの波長分解ストリークカメラ像。(a) および (b) は、それぞれ、通常の利得スイッチングおよび特異的利得スイッチングの場合に対応する。励起電氣パルスの条件：半値幅 1.5 ns、繰り返し周波数 1 MHz。

最重視してそれを許容する。GaInN 系の SOA についてもこれまで開発の前例がないため、最初に発振器の LD 素子と同様の構造で 1 mm 長の SOA を用いて基本的な増幅特性を調べた。SOA の概略構造は、LD のストライブを 5° 傾けた上で、両端面に AR コーティングを施したものである。これにより、デバイス端面の実効的反射率が十分に低減され、高電流密度の励起下でもレーザー発振を抑制することができた。

SOA としての基本的な機能を確認した後に、パワーデバイスとして、リッジ構造の導波路の幅が出力側端面の方向にテーパ状に広がったフレア型 SOA を作製して、MLLD から発生した光パルスの高ピークパワー化を図った。フレア型にするのは、断熱的に横モードを単一に保ちつつ、必要パワーを得るに十分なようにデバイスの発光層の総体積を大きくするためである。また、増幅により光パワーが大きくなるにしたがって、増幅飽和とそれに伴う非線形光学効果が顕著になるのを抑制する上でも有利である。当初には、長さ 3 mm で出力端のリッジ導波路幅が 5 μm の SOA を用いて詳細な実験を進めた。励起電流密度が 2 kA/cm^2 程度以下の場合には、増幅の飽和に伴う自己位相変調 (self-phase modulation; SPM)¹⁸⁾ により光スペクトルの広がりみえたものの、効率よい光パルス増幅がみられた。しかし、さらに電流密度が高くなると、SOA 中で増幅された自然放出光 (amplified spontaneous emission; ASE) ノイズ成分が顕著になり、光パルスの増幅効率が低下することがわかった。この様子を表している光スペクトルを図 5 に示す。また、これと対応するストリークカメラによる光パルス列の観測結果を図 6 に示す。励起電流密度が 2 kA/cm^2 のときとその 2 倍の 4 kA/cm^2 のときと

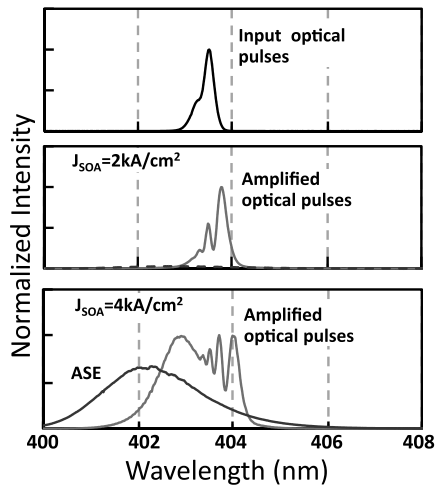


図5 3 mm 長のフレア型 SOA (出力端リッジ構造幅 $5 \mu\text{m}$) による MLLD 光パルス増幅時の光スペクトル。一番上のスペクトルは入力光パルスに対応、一番下のスペクトルで ASE と記してあるのは光パルスの入力がない場合の SOA 出力に対応。

を比較すると、後者では、光パルス間に ASE ノイズ成分が顕著に現れ、また、光パルスの増幅直後にはみられないが、200 ps 程度の時間遅れで立ち上がっていることがわかる。これは、ASE ノイズが顕著になる励起条件下で、誘導放出の作用で実効的なキャリア寿命（すなわち光パルスの飽和増幅で減少した利得の回復時間でもある）が 200 ps 程度まで短くなっていることを示している。そして、この短いキャリア寿命のために、1 ns 間隔の光パルスを効率よく増幅できないと理解することもできる。図5の増幅光出力の光スペクトルをみると、大半のパワーが光パルス中には含まれていない様子がわかる。

この問題を解決するために、2 mm 長に短くして、出力端でのリッジ導波路幅を $15 \mu\text{m}$ と大きくした改良型の SOA を作製した。この設計では、全電流値が同じという条件下で SOA から同じ増幅光パワーが得られるとした場合、電流密度が低くなるため、SOA の長さ方向への指数関数的な ASE の増幅を抑制することができる。この結果、光パルス増幅時の ASE ノイズ成分は最大でも 15% 以下にまで顕著に低減され、横モードを単一に保持した上で、3 ps の時間幅で 100 W 超のピークパワーを得るに至った¹⁹⁾。また、増幅された 1 GHz の光パルス列による、多光子効果による体積光記録への応用機能も実証された²⁰⁾。

4. まとめと展望

以上、400 nm 帯の GaInN 半導体レーザーにおけるピコ秒の超短光パルスの発生と 100 W 超ピークパワーへの増幅に関するわれわれのこれまでの研究について解説した。概

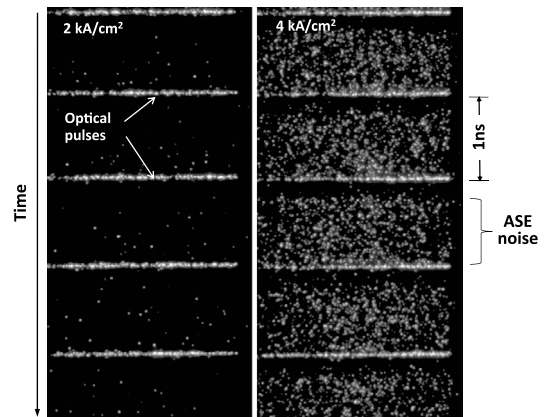


図6 SOA による増幅後の MLLD 光パルスのストリークカメラ像。

観してみると、GaN 系半導体レーザーでは新しい取り組みであったが、定性的には他材料系の半導体レーザーと同様の光パルス発生・増幅機能を得たといつてよい。しかし、定量的には異なる点が多いことにも、ここで少し触れておきたい。端的な例を挙げれば、超短光パルスの発生では、モード同期動作でも、GS 動作でも、さらに SP 動作でも、同サイズの AlGaAs 系や InGaAsP 系の LD に比較して光パワーがおよそ 1 桁大きい。そして、「1 桁大きい」という量的な違いが、物理現象としての質的な違いを生み出しているようにみえる。例えば、モード同期動作においては、発振器においても SPM によるスペクトル広がりが増著にみられ、フーリエ変換限界の光パルスにならない。光パワーが大きい、すなわち光パルスのエネルギーが大きいのは、GaInN 系ではキャリアの有効質量が大きく状態密度が高い、したがってレーザー発振に必要なキャリア密度が高いことに還元することができよう。そして、キャリア密度が高い状況は、レーザー光のパワー密度が高いことに直結し、非線形光学効果も顕著に表れやすいと考えられる。また、モード同期や SP 動作において必要となる SA 領域への逆バイアスの電圧値が 20 V 程度に大きいことも特徴的である。これは、光パルスエネルギーが大きいことを考えれば、単純には、高電界下で吸収係数と吸収飽和エネルギーを大きくする²¹⁾ 必要があるためと推測される。しかし、GaInN 半導体レーザーの非線形光学現象については、吸収・利得とも含めてこれまで研究がなされておらず、今回われわれはようやくその端緒をつかんだに過ぎない。

また、半導体レーザーにおける超短光パルスの発生とその増幅については、従来の材料系でも理論的解析²²⁾ による実験の定量的説明が成功していないが、これはエネルギー緩和のキャリアダイナミクスが複雑でその記述が十

分にできていないことによる。GaInN材料系では、さらに空間的な混晶組成ゆらぎに基づく不均一広がりがあり²³⁾、キャリアの空間移動を含めたエネルギー緩和過程を明らかにすることも必要である。また、発光再結合やオージェ再結合の係数の確度を高めることは、青色LEDにも共通して関係する発光デバイスの基本的物性の重要課題として残されている。

GaInN超短パルスレーザーは、いくつかの基本的な機能が確認された段階であり、その実用化に向けては、動作の信頼性・再現性を得る上でもまだ多くの精密な研究を必要としている。われわれの研究に1年半ほど遅れて、欧州ではfemtoblueという複数機関によるGaInN系超短パルス半導体レーザーの共同研究プロジェクトが立ち上がり、デバイス機能よりもむしろデバイス物理・材料物理の側面で研究が進展している²⁴⁾。今後、基礎と応用の両面で半導体レーザーがもつポテンシャルの新しい側面の開拓が集約的になされるように、多くの協調的研究が国内外で展開されることを期待したい。

本稿で紹介した研究成果は、池田昌夫、宮嶋孝夫、吉田正裕、河野俊介、幸田倫太郎、斉藤恭介、石橋孝介、佐藤綾耶、大木智之、渡邊秀輝の各氏との共同研究によるものであり、各氏に感謝いたします。また、半導体レーザーデバイス物理全般に関して日ごろよりご討論いただいている秋山英文氏に謝意を表します。そして、組織や制度の違いを超えて真に実りある産学共同研究を推進する上で多くのご助力をいただいた中島一郎、熊谷修、長谷川史彦、および小林城太郎の各氏に感謝いたします。

文 献

- 1) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahara, N. Isawa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku and Y. Sugimoto: "InGaIn-based multi-quantum-well-structure laser diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) L74-L76.
- 2) I. Akasaki, S. Sota, H. Sakai, T. Tanaka, M. Koike and H. Amano: "Shortest wavelength semiconductor laser diode," *Electron. Lett.*, **32** (1996) 1105-1106.
- 3) H. Yokoyama: "Semiconductor lasers enable advances in nonlinear biophotonics," *SPIE Newsroom* (2008) <http://spie.org/documents/Newsroom/Imported/1074/1074-2008-03-26.pdf>
- 4) 横山弘之: "高機能ピコ秒半導体レーザーによる多光子バイオイメージング", *オプトロニクス*, **29** (2009) 54-58.
- 5) H. Yokoyama, A. Sato, H.-C. Guo, K. Sato, M. Mure and H. Tsubokawa: "Nonlinear-microscopy optical-pulse sources based on mode-locked semiconductor lasers," *Opt. Express*, **16** (2008) 17752-17758.
- 6) H. Yokoyama: "Highly reliable mode-locked semiconductor lasers," *IEICE Trans. Electron.*, **E85-C** (2002) 27-36.
- 7) H. Yokoyama, H.-C. 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*, **14** (2006) 3467-3471.
- 8) K. Taira, T. Hashimoto and H. Yokoyama: "Two-photon fluorescence imaging with a pulse source based on a 980-nm gain-switched laser diode," *Opt. Express*, **15** (2007) 2454-2458.
- 9) H. Yokoyama, H. Tsubokawa, H.-C. 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. Biomed. Opt.*, **12** (2007) 054019.
- 10) M. Kuramoto, N. Kitajima, H.-C. Guo, Y. Furushima, M. Ikeda and H. Yokoyama: "Two-photon fluorescence bioimaging with an all-semiconductor laser picosecond pulse source," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 2726-2728.
- 11) M. Yoshita, M. Kuramoto, M. Ikeda and H. Yokoyama: "Mode-locking of a GaInN semiconductor laser with an internal saturable absorber," *Appl. Phys. Lett.*, **94** (2009) 061104.
- 12) K. Saito, H. Watanabe, T. Miyajima, M. Ikeda and H. Yokoyama: "Mode locking of an external-cavity bisection GaInN blue-violet laser diode producing 3-ps duration optical pulses," *Appl. Phys. Lett.*, **96** (2010) 031112.
- 13) S. Kono, T. Oki, M. Kuramoto, M. Ikeda and H. Yokoyama: "Intensity autocorrelation measurement of 400 nm picosecond optical pulses from a GaInN mode-locked semiconductor laser diode using surface second harmonic generation of β -BaB₂O₄ crystal," *Appl. Phys. Express*, **3** (2010) 122701.
- 14) S. Kono, T. Oki, T. Miyajima, M. Ikeda and H. Yokoyama: "12 W peak-power 10 ps duration optical pulse generation by gain switching of a single-transverse-mode GaInN blue laser diode," *Appl. Phys. Lett.*, **93** (2008) 131113.
- 15) M. Kuramoto, T. Oki, T. Sugahara, S. Kono, M. Ikeda and H. Yokoyama: "Enormously high-peak-power optical pulse generation from a single-transverse-mode GaInN blue-violet laser diode," *Appl. Phys. Lett.*, **96** (2010) 051102.
- 16) T. Miyajima, H. Watanabe, M. Ikeda and H. Yokoyama: "Picosecond optical pulse generation from self-pulsating bisectional GaInN-based blue-violet laser diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **94** (2009) 161103.
- 17) H. Watanabe, M. Kuramoto, S. Kono, M. Ikeda and H. Yokoyama: "Blue-violet bow-tie self-pulsating laser diode with a peak power of 20 W and a pulse energy of 310 pJ," *Appl. Phys. Express*, **3** (2010) 122103.
- 18) G. P. Agrawal and N. A. Olsson: "Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **25** (1989) 2297-2306.
- 19) R. Koda, T. Oki, T. Miyajima, H. Watanabe, M. Kuramoto, M. Ikeda and H. Yokoyama: "100 W peak-power 1 GHz repetition picoseconds duration optical pulse generation using blue-violet GaInN diode laser mode-locked oscillator and optical amplifier," *Appl. Phys. Lett.*, **97** (2010) 021101.
- 20) S. Tashiro, Y. Takemoto, H. Yamatsu, T. Miura, G. Fujita, T. Iwanuma, 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*, **3** (2010) 102501.
- 21) M. Miyajima, S. Kono, H. Watanabe, T. Oki, R. Koda, M. Kuramoto, M. Ikeda and H. Yokoyama: "Saturable absorbing dynamics of GaInN multi-quantum well structures," *Appl. Phys. Lett.*, **98** (2011) 171904.
- 22) P. Vasil'ev: *Ultrafast Diode Lasers: Fundamentals and Applications* (Artech House, Norwood, MA, 1995) pp. 53-144.
- 23) K. Kojima, U. T. Schwarz, M. Funato, Y. Kawakami, S. Nagahama and T. Mukai: "Optical gain spectra for near UV to aquamarine (Al, In) GaN laser diodes," *Opt. Express*, **15** (2007) 7730-7736.
- 24) femtoblue project, URL: <http://femtoblue.epfl.ch/> (2011月4日26日受稿)