



# レーザー学会産業賞を受賞して —高スペクトル純度で広帯域に連続波長同調可能な半導体レーザーの開発—

福岡 大輔, 室 清文

スペクトラ・クエスト・ラボ(株) (〒260-0856 千葉市中央区亥鼻 1-8-15)

## Acknowledgement of Laser Industry Award 2020 —Development of ASE-Free, Widely Mode-Hop-Free Tunable Diode Laser—

Daisuke FUKUOKA and Kiyofumi MURO

Spectra Quest Lab, Inc., 1-8-15 Inohana, Chuo, Chiba 260-0856

(Received May 25, 2020)

### 1. はじめに

このたびレーザー学会産業賞(奨励賞)を授与頂き、大変光栄に存じます。本稿では受賞した外部共振器型波長可変半導体レーザーと開発の経緯についてご紹介させていただきます。また、半導体レーザー技術に基づく新しい分光計測プラットフォームの創出に向けて、弊社が進めている波長可変半導体レーザーの高出力化や短パルス化への取り組みをご紹介させていただきます。

### 2. 開発の経緯

本波長可変レーザーの開発の発端は十数年前に遡る。当時、開発者は千葉大学でカーボンナノチューブや量子ドットの単分子計測を行っており、個別分子の共鳴励起には高性能な波長可変レーザー光源が必要であった。使用していたチタンサファイアレーザーは、使い勝手が悪く、また連続波長同調ができないため、論文を頼りに連続波長同調が可能な Littman 型外部共振器レーザー<sup>1)</sup>を自作することにした。通常の半導体レーザーチップでは連続波長同調は出来ないため、端面に良好な無反射コートを施したゲインチップの開発をオプトエナジー社に委託した。

オプトエナジー社の 1  $\mu\text{m}$  帯高出力半導体レーザー技術のお陰で 100 mW を超える波長可変レーザー光を得ることはできたが、0.04% の極低反射コートをしたゲインチップを用いてもファブリペロ共鳴が顕在化し、安定なモードホップフリー同調は困難であった。そこで、端面でのモード反射率を 0.001% 程度まで抑制できる曲がり導波路構造を有するゲインチップを採用し、安定なモードホップフリー同調を実現した。更に、誘導放射の抑制により利得領域を倍増し、波長可変域を中心波長の

10% を超えて (>100 nm @1000 nm) 拡大することができた<sup>2)</sup>、しかしながら、ゲインチップからの自然発光(ASE)が波長可変出力に重畳しており、微弱な単分子からの発光をマスクしてしまうため、目的としていた単分子分光計測に使うことは出来ないことが分かった。

Fig. 1 左上に Littman 型の光学配置を示す。Littman 配置ではグレーティング面とミラー面、更には、ゲインチップの後端面を一つの線上で交差させ、その線を回転軸として可動ミラーを回転させる。グレーティングの回折条件で決まる発振波長と共振器長が比例して(縦モード数を一定に保ちながら)変化する幾何学条件を満足しており、広帯域な連続波長同調ができる唯一の外部共振器配置である。しかしながら、出力ビームにゲインチップからの ASE が重畳してしまうという欠点を持っている。ASE は発振波長を利得中心から遠ざけるにつれ顕在化するため、波長可変レーザーの実用域をより狭くしてしまう (Fig. 1 左下参照)。

この問題を解決するため、Fig. 1 右上に示すような転置 Littman 配置を考案した<sup>3,4)</sup>。

転置 Littman 配置では出力ミラーを固定し、Littman の幾何学条件を満足する様にレーザーチップとレンズ、グレーティングを配置したユニットを前述の回転軸の周りに回転させることにより発振波長を変化させている。広帯域にわたってモードホップフリー同調が可能であると同時に、一次回折光の一部を出力として取り出すため出力から ASE を完全に分離できる。これにより、発振領域の両端においても 80 dB (計測限界) の高いスペクトル純度を維持できる、広帯域・高出力波長可変レーザーを実現した。

Littman 配置の外部共振器レーザーにおいて、ビームスプリッター等を共振器内に挿入し、グレーティングからレーザーチップへの戻り光の一部を出力として取り出

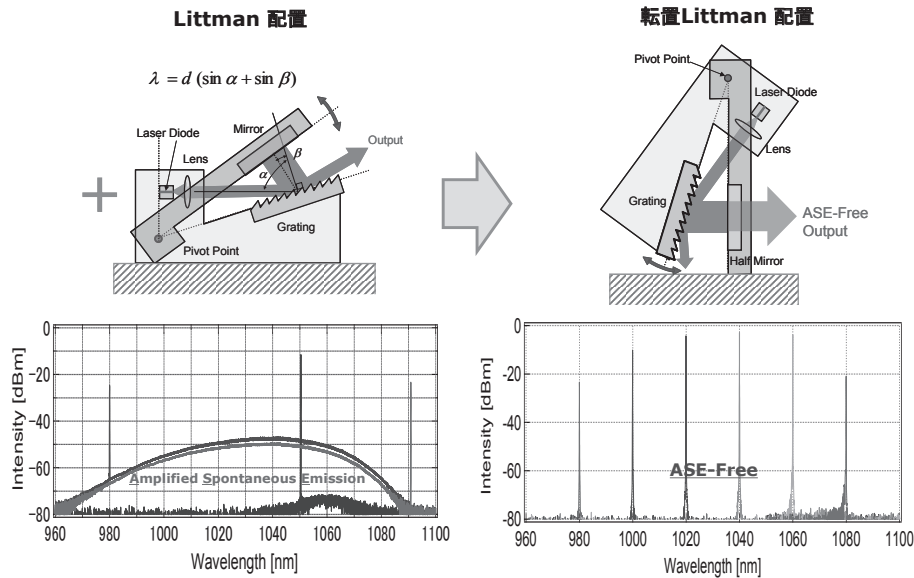


Fig. 1 Comparison of conventional Littman-type external cavity laser and transposed one.

す手法も開発されているが、不要な光学ロスにより出力や同調域の減少を招いてしまう。また、共振器内への追加の光学部品の挿入は共振器の長大化につながり、波長オーダーでの共振器制御が必要なモードホップフリー動作に悪影響を及ぼす。必要最小限の光学部品で共振器を構成する転置 Littman 型外部共振器は ASE-Free 化に向けてのベストなソリューションであると考えている。

JST 先端計測の支援のもと 100 mW の出力と 100 nm 超の波長可変域を持つ 1  $\mu\text{m}$  帯の ASE-Free 波長可変レーザーを実現し、本来の目的である量子ドットやカーボンナノチューブの単分子分光計測を開始できた訳だが、程なく定年退職の時が来た。このままでは“もったいない”と、2013 年 4 月に退職と同時に開発した波長可変半導体レーザーの事業化を進めるため、スペクトラ・クエスト・ラボ株式会社を千葉大亥鼻イノベーションプラザに設立した。

### 3. 波長可変半導体レーザーの製品化

自分で使うための試作と製品化には大きなギャップがある。転置 Littman 型配置は ASE-Free の高スペクトル純度とモードホップフリーな波長同調を可能にする反面、レーザーチップやコリメーションレンズ、グレーティングを一体化したユニットを回転軸の廻りに回転させるため、より強固なサブミクロン精度でガタのない回転機構を必要とする。更に、レーザー出力を安定的にファイバ結合するためにはブレのない回転が不可欠であった。こうした問題は(株)雄島試作研究所が解決してくれた。

また、波長制御には雄島試作研究所開発の精密アクチュエータを搭載することにより 0.1 pm 単位でのデジタル波長制御と可能にし、バックラッシュも数 pm 以下にまで抑え込んだ。更に様々な工夫により、波長誤差を  $\pm 20$  pm 以内に抑制している。

Littman 型外部共振器は回折格子による発振選択波長

と共振器長が完全に比例して変化する唯一の幾何学配置であるが、実際には共振器を構成するレーザーチップやコリメーションレンズには屈折率分散があるため、厳密に Littman の幾何学配置を構成したとしても有効共振器長の変化によりモードホップが発生してしまう。通常、モードホップフリー同調域はこの屈折率分散により 10 nm 程度に制限されるが、本開発では屈折率分散を補償する機構を外部共振器配置に織り込むことによりモードホップフリー同調領域を受動的に数十ナノメートルまで拡大することに成功した<sup>5)</sup>。最近では更に PZT によるアクティブなモード安定化機構の導入により、全波長可変域でのモードホップフリー同調を実現している。こうした技術を Fig. 2 に外観を示すパッケージにまとめ  $\lambda$ -Master という商品名で製品化した。

本レーザーはラボユースを想定しており、LabVIEW ベースの制御ソフトにより PC 制御で動作し、カスタマイズが容易である。また、2ch-16bit の外部アナログ信号入力を有しており、レーザー単体で波長掃引に同期したデータ取得が可能で、分光計測機能も充実している。

Fig. 3 に 1  $\mu\text{m}$  帯波長可変レーザーの空間出力と PM ファイバ出力の代表的な波長依存性を示す。100 nm を超える波長可変域にわたって数十 mW の出力を有し、また、PM ファイバへの結合は最大で 70% 近い結合効率が得られる。一方、ビームコリメーションに使用してい



Fig. 2 Appearance of tunable diode laser,  $\lambda$ -Master1040.

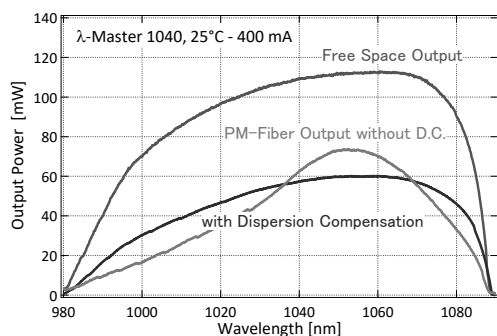


Fig. 3 Free space output and fiber output of  $\lambda$ -Master1040.

る非球面レンズの色収差により波長変化に際して結合効率が低下するため、色収差補償光学系を挿入し、広帯域にわたって高い結合効率を維持できるようにしている。

これまで、弊社の波長可変レーザーはオプトエナジー社のゲインチップを用いる  $1\ \mu\text{m}$  帯の  $\lambda$ -Master 1040 と  $900\ \text{nm}$  帯の  $\lambda$ -Master 950 だけでしたが、最近では、通信波長帯や  $1.1\ \mu\text{m}$  帯等についても製品化している。

#### 4. 高出力化と他のスペクトル領域への展開

現在、こうした製品は主として波長可変のシード光として、あるいは、光電導アンテナ等を用いる光ミキシング用の光源としてテラヘルツ波の発生に用いられている<sup>6)</sup>。

しかし、一般に、波長変換により良好な波長可変レーザーが実現されていないスペクトル領域に展開するためには一層の高出力化が不可欠である。私たちは(株)オプトエナジーの助けを借り、僅かにテーパー状の広がりを持つ傾斜導波路の半導体光増幅器(SOA) $\lambda$ -Ampを開発した。このSOAは傾斜端面での残留反射を極小化できるため、一般的なテーパー型SOAで問題となる誘導放射による寄生発振を起こすことなくチップ長の長尺化による高利得化や広帯域化が可能となる。また、全域が屈折率導波構造のため出力のファイバ結合が高効率なことは元より、注入波長、更には注入電流を変化させても空間モードが変化せずファイバ結合の低下が起こらない。これらの特徴により、 $1\ \text{MHz}$  を超える周波数で応答する強度変調器や、波長掃引などに対し出力を一定に保つAPC制御器などの機能を付与することが可能である。こうした機能を具備した半導体光増幅器、 $\lambda$ -Ampの外観をFig. 4に、また、 $1\ \mu\text{m}$  帯の波長可変光( $\lambda$ -Master 1040)を $\lambda$ -Amp 1040で増幅した場合の出力の波長依存性をFig. 5に示す。 $80\ \text{nm}$ の波長域にわたって $1\ \text{W}$  近い増幅出力を得ることが出来る。また、全波長域にわたって $70\%$  を超えるファイバ結合効率を得ている。尚、こうした広帯域にわたる光増幅は、シード光源にASE-Freeの広帯域波長可変レーザーを用いて初めて可能となる。

$1\ \text{W}$  程度パワーがあれば、PPMgSLTなどの非線形光学素子を用いて $10\ \text{mW}$  程度の高調波発生が可能となる。



Fig. 4 Appearance of semiconductor optical amplifier,  $\lambda$ -Amp1040.

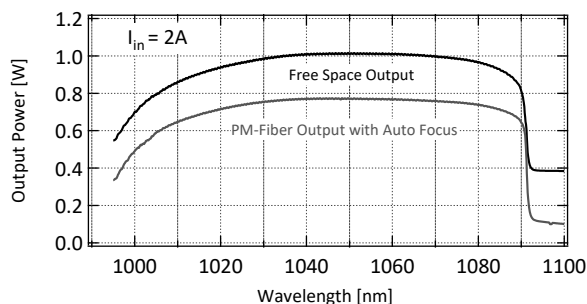


Fig. 5 Free space output and fiber output of  $\lambda$ -Amp1040.

Fig. 6はPPMgSLT基板に周期の異なる24デバイスを形成したSHG素子を実装したSHGユニットである。波長可変レーザーからの光は半導体光増幅器を経て、ファイバでSHGユニットに導かれ、可視光に変換される。波長可変レーザーからの波長に連動して自動で素子の選択と位相整合温度の制御を行うことで、可視域において使い易い波長可変光源を実現している。

弊社の波長可変レーザー( $\lambda$ -Master)と光増幅器( $\lambda$ -Amp)、更には、このSHGユニットにより $460\ \text{nm}$  ~  $550\ \text{nm}$ の可視の波長可変レーザーとして機能する。特筆すべきことは、温度と波長の同期制御により、可視領域において約 $4\ \text{nm}$ のモードホップフリーの連続波長同調が可能であるということである。Fig. 7にこのレーザーを用いて測定したヨウ素ガスの吸収スペクトルを示す。この様に近赤外波長可変光源の高出力化は可視や中赤外・テラヘルツ領域など良好な分光光源がないスペクトル領域に小型・簡便な連続波長同調光源を提供する。



Fig. 6 Second harmonic generation unit with  $460\ \sim\ 550\ \text{nm}$  tuning range.

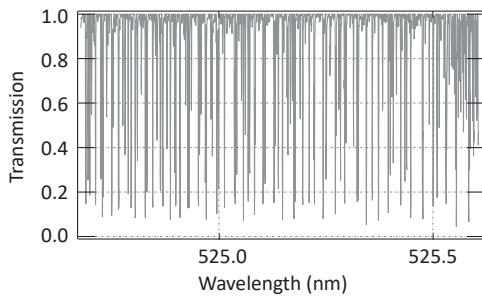


Fig. 7 Absorption spectra of Iodine gas observed around 525 nm.

### 5. ナノ秒・ピコ秒波長可変半導体レーザーの開発

コヒーレントラマンイメージングをはじめとする多光子分光計測においては短パルス・高出力の波長可変レーザーが必要とされる。現在、こうした用途にはモードロックレーザーを励起光源にするパラメトリック発振器が用いられているが、多段の光励起を繰り返すこうしたシステムは複雑で、良好な設置環境を必要とする。このため、研究室を離れて医療診断や産業用途への応用は困難である。

弊社は半導体レーザーをベースとするより直接的な手法による短パルス・高出力レーザーの開発を進めている。上記の光増幅器と高速パルスドライバーを一体化した光パルス増幅器モジュールの外観を Fig. 8 に示す。

このモジュールにより 1 ns ~ 10 ns の任意のパルス幅での光増幅を 125 MHz までの任意のタイミングで行うことができ、外部同期も可能である。光増幅器でのチャープは無視でき、10 mW 程度の CW 波長可変光をピークパワー 1 W のフーリエリミットのパルス光に変換することができる。パルス消光比は 80 dB と高く、ファイバアンプによる光パルスの一層の高出力化にも好適である。また、LN 光強度変調器をカスケードに使い、SOA パルスのピーク近傍から最短 30 ps のパルスを切り出すことも可能である。Fig. 9 に繰り返し 125 MHz でのパルス SOA 出力のオシロスコープ取得 (BW = 1 GHz) 波形、及び 50 ps LN 強度変調器出力のオートコリレーション波形を示す。

LN 変調器の限界を超えるピコ秒パルスの発生に関し

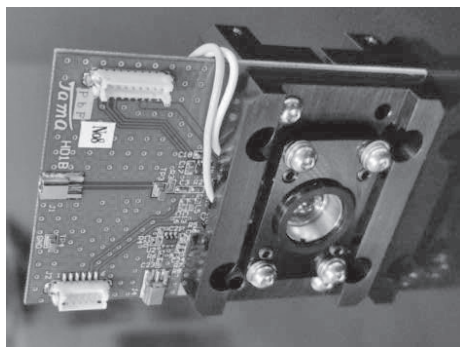


Fig. 8 Unified module of semiconductor optical amplifier and pulse current driver.

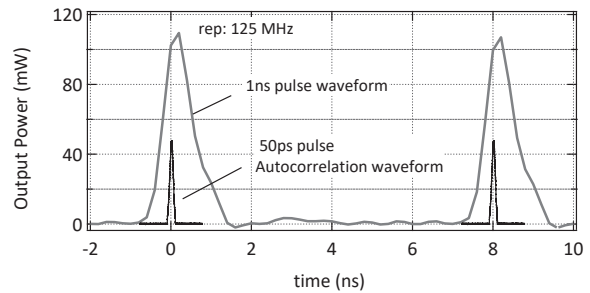


Fig. 9 Temporal profiles of 1-ns and 50-ps pulses extracted with a LN amplitude modulator after an optical amplifier.

ては光波合成技術によるピコ秒パルス発生システムの開発を進めている。Fig. 10 に示すように、波長可変レーザーからの CW 光を LN 変調器により高周波 (10 GHz) 位相変調を加え、チャープ波 (光コム) を発生させる。ついで、LN 強度変調器でアップチャープ部分の 50 ps パルスを切り出し、光増幅器で増幅後、パルスコンプレッサーによりパルス圧縮するという手法である。Fig. 11 に本システムで発生した 10 GHz のパルス列のオートコリレーション信号を示す。ピークパワー 10 W でパルス幅 5 ps のフーリエリミットパルスの発生が確認できる。

この方法の歴史は古く 1986 年に阪大の小林らによって初めて実証されたが<sup>7)</sup>、その後、モードロックパルスレーザーの出現に押されて、長い間、大きな発展はなかった。しかしながら、半導体レーザーを始めとする光エレクトロニクスが発達した今、ピコ秒パルス発生法として新たな発展の可能性を与えている<sup>8)</sup>。特に、モードロックレーザーでは困難なパルス周期制御や異なるレーザー間でのパルス同期が容易であり、複数の同期パルスを必要とするコヒーレントラマン計測等の多光子分光計測に好適なレーザー光源として期待される。

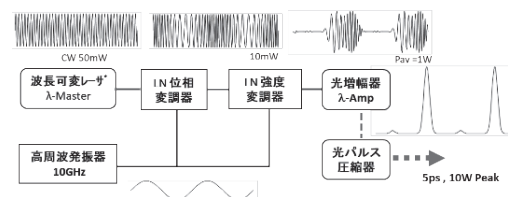


Fig. 10 Schematic diagram of ps-pulse generation system by light-wave synthesizer.

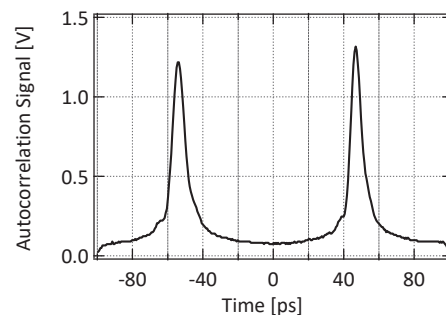


Fig. 11 Auto-correlation chart of generated 5 ps-10 GHz pulse train.

## 5. おわりに

先端計測技術は“科学の母”といわれる。しかし残念ながら我が国においては先端計測用レーザーの殆どを外国製品に頼っている状況である。このような状況では科学技術立国としての将来が危ぶまれる。本開発はこの様な思いに基づくJSTの先端計測機器開発事業としてスタートした。

これまで、小型・高効率な半導体レーザー技術は通信、光記録、レーザー加工において大きなイノベーションを引き起こしてきた。光計測においても医療や診断の分野において近い将来大きなイノベーションをもたらすことが期待される。弊社は“波長可変半導体レーザーは光計測の未来を拓く”との信念のもと新技術の開発に挑戦し続ける。

## 謝 辞

本開発に協力して頂いたオプトエナジー(株)、(株)雄島試作研究所、(株)オキサイド、(株)珠電子(株)、(株)ディエステクノロジーに感謝いたします。皆様の協力なしには、スタートアップ間もない弊社のような会社がこのよ

うな開発を進めることは不可能でした。また、これらの開発を資金面で助成して頂いた、(公財)ひまわりベンチャー育成基金、(公財)三菱UFJ技術育成財団、(一財)内藤泰春科学技術振興財団、(公財)市村清新技術財団のご援助に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) M. G. Littman and H. J. Metcalf: *Applied Optics* **17** (1978) 2224.
- 2) K. Muro, Y. Yasutaka, K. Kitahara, T. Endo, Y. Yamagata, Y. Yamada, and T. Fujimoto: *Proc. Intern. Conf. on Laser and Electro-Optics* (2010), DOI: 10.1364/CLEO.2010.CWN4
- 3) K. Muro, T. Endo, A. Terayama, Y. Wakabayashi, K. Kitahara, Y. Shimada, and D. Fukuoka: *Proc. Intern. Conf. on Laser and Electro-Optics* (2012) DOI: 1364/CLEO SI.2012.Ctu3N.3
- 4) 特許第 5747355 号：登録日：2015 年 5 月 22 日，特許権者：千葉大学，発明者：室清文，遠藤智久，島田泰孝，福岡大輔。
- 5) 特許第 6562472 号：登録日：2019 年 8 月 2 日，特許権者：千葉大学，発明者：室清文，若林佑士，遠藤智久，北原憲。
- 6) D. Fukuoka, K. Muro and K. Noda: *Proc. Intern. Conf. on Infrared, Millimeter, and THz* (2018), p. 422, DOI IRMMW-THz. 2018.8510154
- 7) T. Kobayashi, H. Yao, K. Amano, Y. Fukushima, A. Morimoto, and T. Sueta: *IEEE J. Quantum Electron.* **24** (1988) 382.
- 8) 西川 正：光学 **41**(2012)479.