

# レーザー学会産業賞を受賞して

## ー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ー

## 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頂きます.

#### 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1µm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施したゲイ 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 型の光学配置示する.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 µm 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 ±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

と共振器長か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タまで 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 λ-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 µm 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  $\mu$ m 帯の $\lambda$ -Master 1040 と 900 nm 帯の $\lambda$ -Master 950 だけでしたが、最近では、通 信波長帯や 1.1  $\mu$ 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㈱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)λ-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 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, λ-Amp の外 観をFig.4に、また、1 μm 帯の波長可変光(λ-Master 1040) をλ-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 nm の波長域にわたって1W 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 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 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(λ-Master)と光増幅器 (λ-Amp),更には、このSHGユニットにより460 nm~ 550 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 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用光源がないスペ 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 ~ 550 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 ピングは無視でき,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用い,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 てはじめて実証されたが<sup>77)</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>80</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 synthesyzer.



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,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.