特 集

半導体レーザーによる短光パルス生成

伊 藤 弘 昌 *

(1987年10月14日 受理)

Generation of Short Optical Pulses From Semiconductor Lasers

Hiromasa ITO *

(Received October 14, 1987)

It is quite important to generate optical pulses from semiconductor diode lasers with short pulsewidth and high peak power. Due to the compactness and capability of carrier injection of the diode laser, short optical pulses are well generated using a compact and simple system. These pulses are expected to be utilized not only in the optical communication, but also a wide variety of optoelectronic applications. This paper describes the generation of short optical pulses from semiconductor diode lasers, as well as the parameter dependence of the diode laser on the characteristics of short pulse generation.

Key Words: Semiconductor laser, Diode laser, Short optical pulse generation, High-speed optoelectronic

1. はじめに

パルス幅が短く、ピーク出力が大きい光パルスを半導体レーザーにおいて制御可能な条件のもとで発生させることは、光エレクトロニクスの広範な応用にとって極めて重要な課題である¹⁻³⁾。半導体レーザーを用いて得られる短光パルスは、レーザー自体が小型で注入電流による高速な利得変調が可能なることから、小型・簡便な短光パルス発生装置として光通信をはじめとする多くの応用も期待される。また半導体レーザーの超高速応答の限界を知る上でも重要である。

2. 短光パルスの発生方法

半導体レーザーによる短光パルスの発生とその制御については、他のレーザーの場合と異なるいくつかの特長を有している。これは1) 半

導体レーザーの素子長が通常100 ~ 300 μm 程度と他のレーザーと比較して桁違いに小さく、従って光共振器内を光が周回する時間は僅か数 ps 程度であり、光共振器内における光子の寿命時間 τ_p は 1 ~ 2 ps 程度と短いこと。2) 注入キャリアの寿命時間 (バンド間緩和時間) τ_s は数 ns と短いため GHz 以上の直接電流変調が可能となり、各種の制御が容易なこと。3) この τ_p と τ_s の比が 3 桁程度異なることから、高周波変調特性に特徴的な出力の共振現象や、急峻な利得変動に対しては緩和発振による短光パルスを生じ易いこと。さらに4) 発振がバンド間遷移による誘導放出を利用していることから、利得帯域幅は数 THz と広い。従ってモード同期法によりこの帯域を全て有効に使うことができれば、0.1 ps 程度までの短光パルスの発生も可能となる、等の特徴を有している。

* 東北大学電気通信研究所 (〒980 仙台市片平 2-1-1)

* Research Institute of Electrical Communication Tohoku University

Table I Generation methods of short optical pulses from semiconductor diode lasers and their characteristics.

発 生 方 法	特 徴	特 徴
利得スイッチング	短電流パルス 高周波変調	動作方式が簡便 繰り返し周波数が可変 実用性が高い
損失スイッチング (Qスイッチング)	能 動 受 動	ピーク出力が大きい 素子製作が容易でない* 動作制御が容易でない**
モ ー ド 同 期	能 動 受 動	コヒーレントなパルス 外部共振器が必要 理論限界に近いパルス幅**

*主に能動作 **主に受動動作

半導体レーザーによる短光パルスの発生方法には、利得スイッチング法、損失スイッチング(Qスイッチング)法、およびモード同期法がある⁴⁾。Table I はこれらの特徴をまとめたもので、それぞれについて以下に述べる。

2.1 利得スイッチング法

利得スイッチング法は半導体レーザーの特長を生かした簡便で優れた短パルス発生法であり、実用性も高い。この方法には短電流パルス励起⁵⁻⁷⁾と強い高周波変調⁸⁻¹⁰⁾の2種類の方法があり、励起電流を制御することにより繰り返し周期やパルス幅を容易に変化させることができる特色を持つ。

利得スイッチングによる短光パルス発生は、原理的には高速な励起電流変化による緩和発振を利用して短パルスを得るものである。急峻な利得スイッチングが行えるように、ns以下の時間幅の電流パルス、または200 MHz以上の大振幅の正弦波変調された励起電流が用いられる。このような方式で発生する短光パルスは通常30ps程度の時間幅となることが多い。アバランシェパルサーを用いた100 ps程度の短電流パルスにより、10 ps以下の光パルス発生¹¹⁾の報告もある¹¹⁾。

Fig. 1 は強い高周波変調による光短パルス発生系の基本的な構成を示す。ファブリペロー

形共振器を持つ半導体レーザーは、よく知られているように強い変調動作時には多重縦モード発振を生じる。Fig. 2(a)に代表的な多重縦モード発振をしている1.3 μm 帯 InGaAsP半導体レーザーにおける強い高周波変調によって発生した約30psのパルス幅の短光パルスの2次高調波(SH)自己相関波形およびその発振スペクトルを示す¹²⁾。周期的に重畳したノイズスパイク列は、光パルス幅に比べて共振器内の光波の往復時間が短いという条件を持つ、半導体レーザーのような超小形のレーザーの多重縦モード発振の際に特徴的に観測されるコヒーレントノイズスパイクで、発生した短光パルス内には

Fig.1 Basic configuration of short optical pulse generation system utilizing gain switching of semiconductor diode laser by strong RF modulation.

複数のモードのビート成分による周期的な微細構造が存在していることを意味している。

強い変調時にも単一縦モード発振の得られる構造, 例えば DFB (distributed feedback) や DBR (distributed Bragg reflector) 構造の半導体レーザーを用いた短光パルス発生の場合には, ノイズスパイク列のないコヒーレントな短光パルスが得られる。DFB InGaAsP 半導体レーザーを用いた測定例を Fig. 2 (b) に示す⁹⁾。Fig. 2 (a) と比べるとその差異が顕著であり, スペクトル幅とパルス幅の詳細な測定から, ほぼフーリエ変換関係を持つトランスフォーム限界の光パルスの得られることが確認されている。

この高周波変調方式による短パルス発生において, 変調の1周期内に1個の光パルスを最大出力で発生する最大単一パルス発生条件では, 光パルス幅は次式で近似的に与えられる^{4, 13)}。

$$\tau_{1/2} = \frac{AT}{\left\{ \ln \left(\frac{J_b + J_m - 1}{\beta} \right) \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

ここで β は自然放出光係数, J_b , J_m はしきい値電流密度で規格化したバイアスおよび変調電流密度であり, A は定数で $0.8 \leq A \leq 0.9$ の値を取る。ここで T は緩和振動の半周期を表し,

Fig. 2 SHG autocorrelation traces of short optical pulses generated from InGaAsP semiconductor diode lasers by strong RF modulation. Oscillating spectra are also shown. (a) Multi-longitudinal-mode operation, and (b) Single-longitudinal-mode operation.

$$T = \frac{\pi \sqrt{\tau_p \tau_s}}{\sqrt{J_b + J_m - 1}} \quad (2)$$

である。

β の位として代表的な 10^{-5} 程度の位をとると, 最大単一パルス発生条件では, (1)式の右辺の分母は2程度となり, 光パルスのパルス幅は緩和振動の1/4周期より少し短いことになる。この結果は Scholl らの無バイアス電流励起の場合の解析結果とも一致している¹⁴⁾。数値計算結果とこの近似式の結果は比較的良好な対応を示すことが確かめられている^{4, 13)}。

2.2 損失スイッチング (Qスイッチング) 法

適当な損失制御機構を半導体レーザーの光共振器内に設け, 高速にスイッチすることにより, 時間幅が短く, ピーク出力の大きなQスイッチングパルス光が得られる。光共振器のQ値の能動的な制御には高速な光スイッチが必要となるが, 半導体レーザーではその形状が小さいため, 光共振器内に光スイッチを設けることは容易ではない^{15, 16)}。媒質の一部を可飽和吸収体として用いた受動Qスイッチング法も有効である¹⁷⁾。

2.3 モード同期法

半導体レーザーでモード同期を行うには, 光共振器の大きさが超小形で発振波長における材料分散が大きいため, 外部共振器構造を設けることが一般に必要となる。この構成でレーザー素子端面の反射を完全に除去できない場合には, 外部鏡で構成されるモードと共に素子単体で生じるモードも存在してしまう。外部共振器内に挿入したエタロンによりレーザー素子自体によるモードを単一にし, 外部共振器の往復時間の逆数の周波数で半導体レーザーの利得変調を行なうことにより, 能動モード同期が得られる¹⁸⁻²⁰⁾。

半導体レーザー素子内の可飽和吸収効果による受動モード同期によって, 半導体レーザーとしては最短の ~ 0.5 ps程度の短光パルスが得られている²¹⁻²³⁾。この可飽和吸収媒質としては, 共振器内の局所的な非発光再結合領域, あるいは電子の深いトラップ準位などが作用するもの

と考えられる。Fig. 3 は多重量子井戸構造における非線形エキシトン吸収層を外部共振器内に設けた受動モード同期半導体レーザーの構成例²³⁾を示す。

3. 光パルス圧縮

半導体レーザーでは注入キャリアの変動に基づく屈折率変化のため、注入電流の増大によって発振波長が長波長側へシフトするチャージング特性を素子自体で有している。従って逆特性を持つ正常分散媒質との組合せにより、このチャージング特性を補正して光パルスの直接圧縮が可能となる。しかし半導体レーザーは一般に低出力であることから、効率の高い圧縮光学系が不可欠である。半導体レーザーとの組合せで用いられている分散媒質の例としては、光ファイバ²⁴⁾や干渉計²⁵⁾、回折格子²⁴⁾などがある。

Gires-Tournouis (GT) 干渉計²⁴⁾ および分散シフト光ファイバ ($1.5\ \mu\text{m}$ 帯にゼロ分散波長をシフトさせた単一モードファイバ)²⁴⁾ での圧縮では、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯の InGaAsP DBR および DFB レーザーから強い高周波変調によって発生させた数10ps の光パルスを10ps 以下に圧縮しており、圧縮率は5~10程度が得られている。

4. 短光パルス発生用半導体レーザーとその応用

半導体レーザーから20~30ps 程度の短光パルスを発生させることは、上述のようにレーザー素子と簡単なエレクトロニクスや光学系の組合せにより、容易に行うことができるという特色がある。特に素子単体で利用することができる

利得スイッチング法は、半導体レーザーが本来備えている小型で簡便な特性を生かした短光パルスの発生法として優れた特長を持つものである。さらに単一モード発振の半導体レーザーとの組合せでは、ほぼ理想的なフーリエ変換関係を持つトランスフォーム限界の短光パルスを発生することが可能である。

より短い光パルスを得るためには、光子およびキャリアの寿命の短い半導体レーザー素子が望まれる。このため光共振器長が短く、また活性層のキャリア密度が高いレーザーが基本的に望ましいことになる。さらに変調周波数が高いほどパルス幅は短くなるが、(1)および(2)のレート方程式で無視している電気回路の容量など、実際の高速度動作では有限な値を持つようになる。また発振しきい値電流密度の大きな素子の方が、大きなピーク出力の短光パルス発生には有利となる。

パルス圧縮を考える場合には、得られる光パルス幅の限界はチャージするスペクトルの広がり幅で決定される。このための半導体レーザーとしては、注入キャリアによるプラズマ効果に基づく発振波長変化のより大きいものが適していることになる。分布形帰還を行うグレーティング部に電流が直接注入される DFB レーザーは、活性領域のみに電流注入される DBR レーザーに比べて、原理的にチャージングが大きくなることから、より大きなパルス圧縮比を得ることができる。

半導体レーザーからの最短光パルスを得ているモード同期法では外部鏡を必要とするが、この外部鏡とレーザー素子との集積化が、過飽和吸収体の集積化と共に今後重要な課題となろう。外部鏡構成の半導体レーザーは発振スペクトルの狭帯域化にも優れているため、近年のコヒーレント光通信のための基本デバイスに成りつつあり、外部鏡とレーザー素子との集積化の研究も活発に行われている。モード同期用とは異なるが技術的には同一の課題であり、この様な素子はモノリシックなモード同期半導体レーザーとして、半導体レーザーの小型、簡便という特

Fig. 3 Schematic diagram of passive mode locking semiconductor diode laser using a multi-quantum well as a saturable absorber²³⁾.

Fig.4 Applications of short optical pulses from semiconductor diode laser.

長を失うことなく理論的限界に近い短光パルスを発生する可能性を有しているものと期待される。

Fig.4 には半導体レーザーから発生する短光パルスの応用分野の概要を示すものである。短光パルスの特長である高速性と高ピーク出力特性は切り離せない重要な要素である。利得スイッチングによるDFBレーザーからの短光パルスを分散シフトファイバによって圧縮して、得られた10 ps以下の光パルス列を用いて超高速度光通信^{26, 27)}や光サンプリング²⁸⁾のための基礎実験も行われ始めており、また測距に利得スイッチング光パルスを利用した報告²⁹⁾も成されている。現在このような半導体レーザーからの短光パルスの応用はようやく一部が始まったにすぎないが、今後各方面でその広汎な利用が展開していくものと予測される。

謝 辞

日頃ご指導を賜る稲場文男教授に深謝致します。また張耐氏、小野寺紀明博士をはじめ本研究に携わった関係者に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 末松：電子通信学会論文誌 54 (1971) 806
- 2) 小林，末田：応用物理 50 (1981) 951.
- 3) P.-T.Ho: *Picosecond Pulse Generation with Semiconductor Diode Lasers in Picosecond Optoelectronic Devices*, ed. by C.H.Lee (Academic Press, 1984).
- 4) 伊藤，張，稲場：電子情報通信学会技術研究資料，OQE87-23 (昭62:5).
- 5) 小林，吉川，森本，末田：昭53応用物理学会講演予稿集 (5a-P-4)，(1978)。
- 6) C. Lin, P. L. Liu, T. C. Damen, D. J. Eilenberger and R. L. Hartman: *Electron. Lett.*, **16**, (1980) 600.
- 7) P. L. Liu, C. Lin, I. P. Kaminow and J. J. Hsieh: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17**, (1981) 671.
- 8) H. Ito, H. Yokoyama, S. Murata and H. Inaba: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17**, (1981) 663.
- 9) N. Onodera, H. Ito and H. Inaba: *IEEE J. quantum Electron.*, **QE-21**, (1985) 568.
- 10) 照喜名，張，伊藤，稲場：電子情報通信学会技術研究資料，OQE87-22 (昭62:5).
- 11) D. Bimberg, K. Ketterer, H. E. Scholl, and H. P. Vollmer: *Electron. Lett.*, **20**, (1984), 343.
- 12) 小野寺：東北大学院工学研究科博士学位論文 (1985).
- 13) 張，伊藤，稲場：電子情報通信学会論文誌投稿中.
- 14) E. Scholl, D. Bimberg, H. Schumacher and P. T. Landsberg: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-20**, (1984) 394.
- 15) D. Z. Tsang and J. N. Walpole: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-19**, (1983) 145.
- 16) Y. Arakawa, A. Larsson, J. Pålaski and A. Yariv: *Appl. Phys. Lett.*, **48**, (1986) 561.
- 17) H. Ito, N. Onodera, K. Gen-ei and H. Inaba *Electron. Lett.*, **17**, (1981) 15.
- 18) H. Ito, H. Yokoyama and H. Inaba: *Electron Lett.*, **16**, (1980) 620.
- 19) D. J. Bradley, M. B. Holbrook and W. E. Sleat: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17**, (1981) 658.
- 20) P.-T.Ho, L.A.Glasser, E.P.Ippen and H.A.Haus: *Appl. Phys. Lett.* **33** (1978) 241.
- 21) J. P. van der Ziel, W. T. Tsang, R. A. Rogan R. M. Mikulyak and W. M. Augustymak: *Appl. Phys. Lett.*, **39**, (1981) 525.
- 22) H. Yokoyama, H. Ito and H. Inaba: *Appl. Phys.*

- Lett., **40**, (1982) 105.
- 23) Y. Silberberg and P. W. Smith: IEEE J. Quantum Electron., **QE-22**, (1986) 759.
- 24) A. Takada, T. Sugie and M. Saruwatari: Electron. Lett., **21**, (1985) 970.
- 25) 張, 張喜名, 伊藤, 稲場: 電子情報通信学会技術研究資料, OQE86-18 (1986).
- 26) 高田, 猿渡: 電子情報通信学会総合全国大会, 2359 (1987).
- 27) 盛岡, 猿渡: 電子情報通信学会総合全国大会, 2361 (1987).
- 28) 山林, Franzen: 電子情報通信学会総合全国大会, 2360 (1987).
- 29) A. Alping, P. Andersson and S. T. Eng: Electron. Lett., **21**, (1985) 126.