

全電氣的連続周波数可変外部共振器型半導体レーザー ——光周波数シンセサイザー実現へ向けて——

興 梶 元 伸

Continuous Tuning of an Electronically Tunable External-Cavity Semiconductor Laser

Motonobu KOUROGI

We have proposed and demonstrated single-mode and electronically phase-coherent continuous frequency tuning in an external-cavity semiconductor laser with two acousto-optic (AO) modulators inside the external-cavity. In order to realize a continuous tuning, we are employing an AO device in which electrical delay line is included.

Key words: continuous tuning laser, external-cavity semiconductor laser, acousto-optic modulator

光の周波数を制御する技術は、距離の測定、物理定数の測定等の要請から高精度化が進められてきた。また現在の急速な、高確度かつ高分解能を必要とする光技術、例えば波長多重光通信、また精密な物体内部/外部形状を測定するリフレクトメトリー技術¹⁾などの進展に伴って、高精度化だけでなく光の周波数を動的に高速に制御することが必要になってきた。

光の周波数を自由に制御する要素技術は、マイクロ波帯の技術からのアナロジーから、基準発振器（安定化レーザー、原子時計等）、局部発振器（周波数可変レーザー、光パラメトリック発振器等）、光ミキサ（波長変換、光コム等）、および位相同期技術に大別されると考えられる。

本稿ではこの中で局部発振器を実現するために、全電氣的に広範囲かつ連続に周波数可変ができる外部共振器型単一縦モードレーザー²⁾を機械的駆動部なしに実現する方法について述べる。

1. 全電氣的制御レーザーの構造、原理と条件

現在、周波数可変のレーザー光源を電氣的な制御によって実現できる方法としては DBR (distributed Bragg reflector) 構造部の電流の流れの構造を変える方法があり、数 nm の波長可変が可能である。一方高速かつ広範囲

という点では、外部共振器型でかつ共振器内部に音響光学フィルターを用いる方法が提案されている^{3,4)}。例えば文献 4) によると、約 10 THz の周波数変化を行うのに必要な時間は 3 μ s 程度である。しかしながらいまだ良好な単一モード発振は実現しておらず、さらに周波数可変特性は非連続的である。一方、機械的な方法による広範囲周波数連続可変外部共振器型レーザーはすでに市販されている。この方法では、外部共振器に使われる波長選択素子と共振器長の同時制御により連続的可変が可能であり、単一モードの純度が高い⁵⁾。しかしながら機械的駆動が問題となっている。

外部共振器中に音響光学素子を用いた周波数可変レーザーを用いて連続的な単一モードでの周波数可変を実現すれば、局部発振器としてより都合がよい。この章では全電氣的制御レーザーの構造、単一モード連続周波数可変の原理と条件について述べる。

1.1 構造

全電氣的制御レーザーの構造を図 1 に示す。外部共振器中に音響光学素子を用いた例は過去にあるが³⁾、この方法は下記の 2 点で異なっている。

- 1) 音響光学素子の分散を用いた音響光学波長フィルターではなく、外部回折格子と音響光学偏向器を用いた

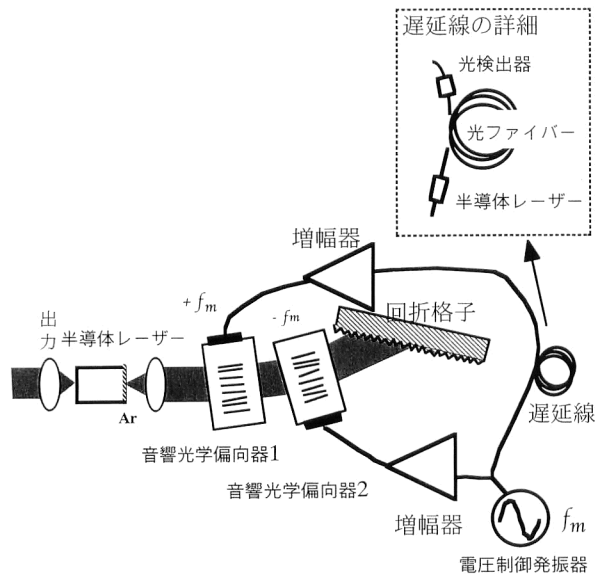


図1 全電氣的連続周波数可変外部共振器型半導体レーザーの構造。

こと

- 2) 2台の音響光学素子を駆動する信号線上の一方に遅延線を挿入したこと

半導体レーザーから発した光はまず2台の音響光学偏向器に順次入射され、それぞれの音響光学偏向器は光路の角度を変化させて回折格子に向けて光を出射する。回折格子はその角度で選択された特定の狭い範囲の波長成分のみを反射し、レーザーに帰還する。またそれぞれの音響光学変調器は回折方向が等しくなるよう設置され、かつ音響光学変調による周波数シフトの方向は2台の装置で互いに正負反対になるよう調整されている。そのため周波数シフトは相殺される。こうして外部共振器内では、周波数シフトなしに回折格子により高い分解能で波長選択された光が半導体レーザーに帰還されることになる。これにより単一モード発振が可能になる。そして音響光学変調器の変調周波数(f_m)を変えて回折格子に入射する光路の角度を変えることで、発振波長を高速かつ正確に選択することができる。

1.2 連続周波数可変の原理

連続周波数可変の方法は回折格子の機械的制御による連続周波数可変外部共振器型レーザー⁵⁾に類似しているのので、まずその原理を説明する。機械的制御による連続周波数可変外部共振器型レーザーでは外部共振器の波長を選択するための回折格子の角度を変化させると同時に共振器長を変化させている。このため、波長選択と同時に外部共振器モードの周波数を変化させることができる。そして外部共振器モードと回折格子が選択する光の波長が常に一致するように構成することによって、連続周波数可変が実現している。

一方、外部共振器中に音響光学素子を用いた場合にも同じことがいえる。すなわち回折格子の角度を変える代わりに駆動周波数(f_m)を変化させ、それと同期して音響光学素子を駆動する信号の相対的な位相差(ϕ)を変化させるのである。 ϕ を変化させることは外部共振器モードの変化を生じさせるので、 f_m を変化させることと同期して ϕ を変化させれば連続的波長可変が実現するのである。

このことを図を用いて説明する。図2(a), (b)に、 f_m のみを変化させた場合のレーザー周波数の変化と、 ϕ のみを変化させた場合のレーザー周波数の変化を示す。 f_m のみを変化させた場合、レーザー周波数は変化するものの、外部共振器モードの変化が伴わないため階段状モードホップを繰り返すことになることがわかる。そして、 ϕ のみを変化させた場合、単一縦モードが維持できたとしても位相が π 変化するごとにのこぎり歯状のレーザー周波数変化を示すことがわかる。位相の変化が時間的に線形な変化である場合、こののこぎり歯状の周波数の変調現象はいわゆる周波数シフト帰還型レーザー⁶⁾の動作と同じである。 f_m を変化させると同時に ϕ を、レーザー周波数の f_m による変化量と、 ϕ による外部共振器モードの周波数の変化量が一致するように変化させれば、図2(c)に示すように連続的波長可変が実現する。

1.3 連続的周波数可変の条件

f_m と ϕ を同期して変化させる方法には位相同期を用い

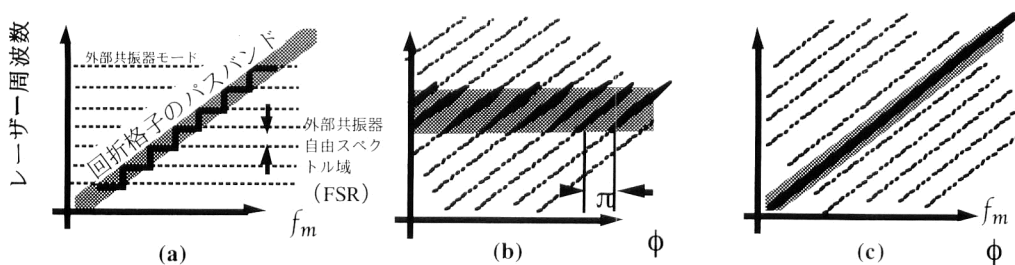


図2 周波数可変の説明。(a) f_m の変化あり、 ϕ の変化なし。(b) f_m の変化なし、 ϕ の変化あり。(c) f_m と ϕ の同期変化。

る方法や遅延線を用いる方法があるが、実験でも使用した図1のように電気的遅延素子を用いる簡単な方法について具体的な条件を説明する。

f_m の単位周波数変化に対して、 ϕ は $2\pi\tau$ 変化する。ここで τ は遅延時間である。一方レーザーから発した光が2台の音響光学素子を通り、往復して戻る間の位相の変化は2度音響光学素子を通るので 2ϕ である。したがって外部共振器モードの変化は ϕ が π 変化するごとに自由スペクトル域 (FSR) 変化することになる。すなわち f_m の単位周波数当たりの外部共振器モードの周波数変化は $2\text{FSR}\tau$ である。したがって最適な遅延時間は

$$\tau = \langle df_{\text{laser}}/df_m \rangle / (2\text{FSR})$$

と表される。ここで $\langle df_{\text{laser}}/df_m \rangle$ は、 f_m の単位変調周波数変化に対するレーザー周波数の変化量であり、同時に図2(a)に示すような回折格子が選択する光の周波数の変調周波数に対する平均的な変化量である。

2. 実験

実験に使用したレーザーは片面に AR コート (波長 $1.55\ \mu\text{m}$ において 0.1%) された InGaAs ファブリー・ペロー型半導体レーザーである。音響光学素子には 70% の変換効率をもつ音響光学偏光器 ($105\ \text{MHz} < f_m < 115\ \text{MHz}$) を用いた。回折格子には反射率 70% の回折格子本数 $1200/\text{mm}$ のものを用いた。光が共振器を往復する間の損失により最終的にレーザーに帰還する光量は 16% であったが、 $1.50\ \mu\text{m}$ でレーザー発振を確認した。閾値電流は $40\ \text{mA}$ であった。単一モード発振はファブリー・ペロー共振器と分光器を用いて確認された。レーザー線幅は他の従来型の外部共振器型周波数可変半導体レーザーとのビートの観測により $1\ \text{MHz}$ 以下であることが確認された。

図3(a)は遅延線なしで変化したときの波長の変化を表している。図2(a)と同様、非連続的な波長の変化がみとれる。これは半導体レーザーの内部モードに起因していると考えられる。図3(b)は図3(a)の拡大図である。図3(a)では一見連続的と思われていた範囲でも、実際は外部共振器モードによる階段状の非連続的な波長の変化がみとれる。階段状の波長の変化のひとつひとつのステップ上では f_m の変化に対して波長は変化しないことがわかる。階段の段差で示されるモードホップによる周波数の飛びは、外部共振器による自由スペクトル域に一致し $1\ \text{GHz}$ となっている。この特性は図2(a)の現象に相当する。一方、同図より $\langle df_{\text{laser}}/df_m \rangle$ の値は 3×10^4 と見積もられ、 τ の最適値はこれより $15\ \mu\text{s}$ とわかる。

図3(c)と(d)はそれぞれ $\tau = 7.5\ \mu\text{s}$ 、および $\tau = 15\ \mu\text{s}$

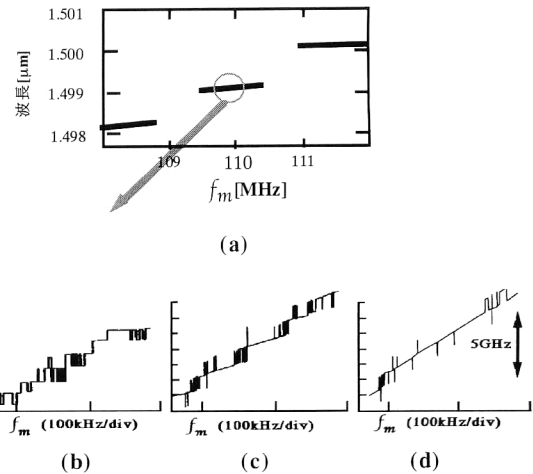


図3 周波数可変時の波長変化。(a) $\tau = 0$ 。(b) (a)の拡大図。(c) $\tau = 7.5\ \mu\text{s}$ 。(d) $\tau = 15\ \mu\text{s}$ 。

のときのレーザー波長の変化の様子を示している。ここで遅延を得るために光ファイバーによる遅延線を用いた。すなわち変調信号をいったん別の半導体レーザーを用いて光の強度変調信号に変換し、光ファイバーを通して再度光検出器により電気信号にしている。遅延時間 τ の調整には、遅延用の光ファイバーの長さを調整して行った。

図3(c)と(d)をみると、異なる遅延線では異なる特性を示すことがわかる。 $\tau = 7.5\ \mu\text{s}$ の場合には、外部共振器モードによる階段状の非連続的な波長の変化は依然としてみられるものの、 f_m と ϕ が同期変化していることにより、それぞれの階段のステップ上に勾配が発生し、連続的な周波数変化をしていることがわかる。 $\tau = 15\ \mu\text{s}$ の場合には、さらにその傾向が顕著になり、連続的な周波数変化の範囲が、外部共振器による自由スペクトル域である $1\ \text{GHz}$ を超え、数ギガヘルツに拡大していることがわかる。

3. 今後の課題

今回、連続周波数可変範囲はたかだかギガヘルツオーダーであった。これは、共振器中の光学的損失の低減により今後改善が期待でき、さらに広い範囲で周波数可変も可能であると考えられる。

広い範囲で周波数可変となった場合には、新たな問題が予想される。それはレーザー媒質の波長分散の影響である。例えば、本解説では $\langle df_{\text{laser}}/df_m \rangle$ の値は f_m の全域で一定であると暗黙のうちに仮定していたが、レーザー媒質の屈折率の波長分散により、実際は発振波長に応じて変化することが予測される。この場合、遅延線では不都合であり、より高度な方法が必要になる。その解決策は、周波数と位相の制御にマイクロ波の位相同期技術を応用して分散の影響を考慮した関数を $\langle df_{\text{laser}}/df_m \rangle$ に用いれば可能になる

と考えられる。遅延線によって生じる周波数可変時の応答遅延も位相同期技術を用いることによって解決されるであろう。

周波数変化の応答速度について、今回は評価を行ってはいない。しかし、応答速度の原理限界をきめているのは音響光学素子中で音波がレーザー光を通過する時間であり、 $1\mu\text{s}$ 以下も可能である。

以上のように全電気的方法で、高速かつ連続に広範囲で周波数可変の単一縦モードレーザー光源の実現可能性を示した。これにより光の周波数を自由に制御する要素技術の局部発振器に相当する部分の実現が期待される。基準発振器、光ミキサー、および位相同期などの他の要素技術については、分子吸収線を用いた安定化レーザー⁷⁾、光コム発生器⁸⁾、およびフィードフォワード型光位相同期⁹⁾の技術が開発されている。これらの要素技術と組み合わせて将来光の周波数の自在な制御を実現する。

文 献

- 1) T. Miyahara, K. Nakamura, M. Sato and H. Ito: "Long distance, high accuracy optical frequency domain reflectometry by a frequency-shifted feedback laser," *1998 Conference on Lasers and Electro-Optics Technical Digest, CThO21* (San Francisco, 1998).
- 2) M. Kourogi, K. Imai, B. Widiyatmoko, T. Shimizu and M.

Ohtsu: "Continuous tuning of an electrically tunable external-cavity semiconductor laser," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 1165-1167.

- 3) G. Coquin and K. W. Cheung: "Electrically tunable external-cavity semiconductor laser," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 599-600.
- 4) G. Coquin, K. W. Cheung and M. M. Choy: "Single- and multiple-wavelength operation of acousto-optically tuned semiconductor lasers at $1.3\mu\text{m}$," *IEEE J. Quantum Electron.*, **25** (1989) 1575-1579.
- 5) M. de Labachellerie, H. Sasada and G. Passedat: "Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers: Erratum," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 3817-3819.
- 6) K. Nakamura, F. V. Kowalski and H. Ito: "Chirped-frequency generation in a translated-grating-type frequency-shifted feedback laser," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 889-891.
- 7) A. Onae, K. Okumura, J. Yoda, K. Nakagawa, A. Yamaguchi, M. Kourogi, K. Imai and B. Widiyatmoko: "Toward an accurate frequency standard at $1.5\mu\text{m}$ based on the acetylene overtone band transition," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **48** (1999) 563-567.
- 8) M. Kourogi, K. Nakagawa and M. Ohtsu: "Wide-span optical frequency comb generator for accurate optical frequency difference measurement," *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 2693-2701.
- 9) M. Kourogi, B. Widiyatmoko, K. Imai, T. Shimizu and M. Ohtsu: "Accurate relative frequency cancellation between two independent lasers," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 16-18.

(2001年4月20日受理)