

# 戻り光半導体レーザーにおける光カオスとその制御

大坪順次

半導体レーザーの光が出射後、外部の光学素子により反射されレーザー共振器に戻ると、光出力の雑音レベルが著しく増加する。光ディスクシステムなどにおいては、この雑音を抑制するために、注入電流に高周波変調をかけることが経験的に行われてきた。戻り光雑音を抑制するためには、アイソレーター等を使い、レーザー光源への戻り光の量を少なくすることができます。しかし、アイソレーターは価格やサイズの点で一般的に使われるには、まだ問題がある。今後、光通信システムの加入者系への導入や、光ディスクシステムにおける記憶容量の増大化などを考えると、半導体レーザーの戻り光雑音の低減は依然として古くて新しい問題である。

最近になって、戻り光半導体レーザーにおける光出力の不規則“雑音”が光カオスとして認識されるようになり、この観点からの研究が進んできた。このような非線形光ダイナミクスとしては、本特集号でも解説のあるEO素子を使った光-電気ハイブリッドカオス系がよく知られており、光カオスの研究の歴史としても長く、その応用についての研究もなされている。一方、戻り光半導体レーザーにおける光カオスは、“光”カオスとしての優れたモデルでもあり、“雑音”的抑制という実用上においても重要であるため、最近多くの論文が発表されている。

カオスは不規則な信号ではあるが、本来ランダムな雑音とは区別されるものである。カオスは、決定論的な方程式で記述される物理系に内包される非線形性によって生み出されるものであり、その式のパラメーターとなる量を（微小に）変化させることにより、制御することも

可能なものである。本解説では、戻り光半導体レーザーの光カオスについて論じるとともに、カオス制御の方法に基づく戻り光雑音の抑制について述べる。

## 1. 戻り光半導体レーザーにおける光カオス

单一モード発振している半導体レーザーの戻り光効果は、その光量に応じて4つないし5つのカテゴリー、1) きわめて微小な戻り光量（通常のファブリー・ペロー・レーザーの場合の振幅反射率 $10^{-5}\%$ 程度以下）で、光出力にほとんど影響を及ぼさない場合、2) 弱い戻り光量（ $10^{-4}\sim 10^{-2}\%$ ）ではあるが、出力光がカオス的になり雑音が増加する場合、3) 戻り光が多く（ $10^{-2}\sim 10^{-1}\%$ ），雑音も多くなりレーザーのコヒーレンス崩壊や多モード化が起こる場合、4) 強い戻り光（ $10^{-1}\%$ 以上）のため逆にスペクトル狭窄などの現象が生じる場合に分類される<sup>1)</sup>。実際の半導体レーザーの活性層に戻る光量と外部反射率、吸収などから見積もった反射率とは異なるが、たとえば光ディスクシステムなどでは、概ね2)～3)のカテゴリーとなり、光カオスが発生しやすい戻り光量となっている。

図1は、戻り光量を変化させた場合の半導体レーザーの光出力の実験結果を示したものである。(a)は戻り光がない場合のレーザー出力であり、DCレベルにランジュバン雑音によるゆらぎがみられる。(b)は外部共振器長を21 cmとした場合で、弱い戻り光があるときであるが、光カオスでいう周期振動に相当する信号である。この周期は、外部共振器長の周波数とは異なる値になっている。(c)は外部共振器長は同じであるが、戻り光量を(b)よりも増大させた場合で、レーザー出力はカオス的な振舞いをしており、低周波の雑音が増大しているこ

静岡大学工学部システム工学科（〒432 浜松市城北 3-5-1）  
E-mail: ohtsubo@eng.shizuoka.ac.jp

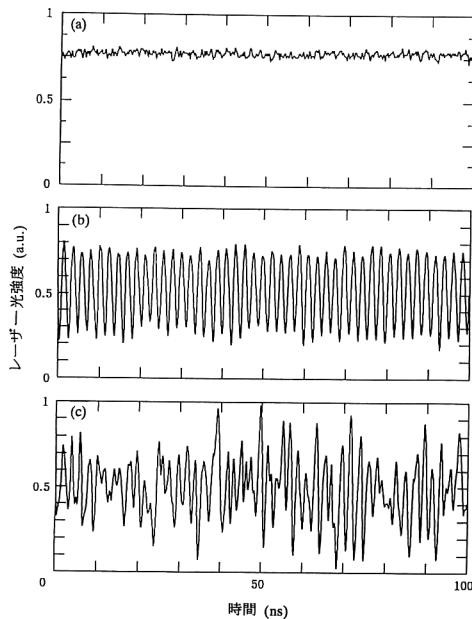


図1 半導体レーザーの光出力,  $L=21\text{ cm}$ . (a) 戻り光なし, (b) 弱い戻り光, (c) 強い戻り光.

とがわかる。

外部共振器反射率以外にも、外部共振器長の長さの変化、バイアス注入電流の変化に依存して、さまざまなレーザー出力光のダイナミクスがみられる。これらのダイナミクスは、系のパラメーターよりなる多次元空間において複雑な様相を呈しており、1つのパラメーターを指定しただけでは、そのダイナミクスについて語ることはできない<sup>2)</sup>。また、半導体レーザー出力光が光カオスを経てコヒーレンス崩壊に至る過程では、レーザーの緩和振動が大きく寄与しており。今後これらの研究についても解明が待たれている<sup>3)</sup>。また、本解説では取り上げないが、半導体レーザーへ位相共役光が戻る場合についても、実用的な観点からも興味がもたれており、研究が進んでいる<sup>4,5)</sup>。

## 2. レート方程式による取り扱い

図2は、戻り光半導体レーザーのモデルを示したものである。ここでは、劈開面をそのまま反射面（振幅反射率  $r_0$ 、共振器長  $l$ ）とした単一モードのファブリー・ペロー半導体レーザーを考え、外部の鏡（反射率  $r_1$ 、レーザー端面と鏡の間隔  $L$ ）によりレーザー光が反射され、レーザー共振器へ戻る場合を考える。レーザー発振の振幅  $E$ 、位相  $\phi$ 、キャリヤー密度  $N$  を使い、戻り光のある半導体レーザーを表すレート方程式は

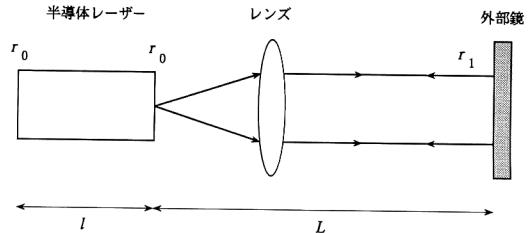


図2 戻り光半導体レーザーのモデル。

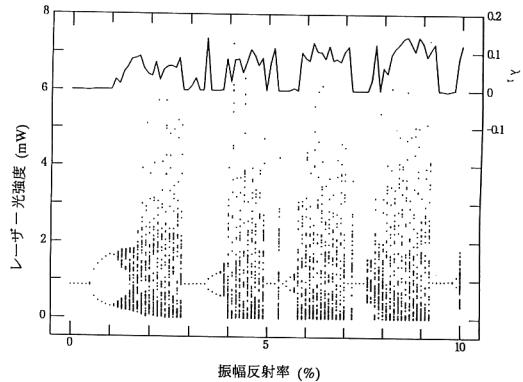


図3 外部反射率に対するレーザー光出力の分岐図。  
 $L=9\text{ cm}$ ,  $J=1.2J_{\text{th}}$ .

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2} \left\{ g(N(t) - N_{\text{th}}) - \frac{1}{\tau_p} \right\} E(t) + \frac{\chi}{\tau_{\text{in}}} E(t - \tau) \cdot \cos \theta(t) + \frac{R_{\text{sp}}}{2E(t)} + F_E(t) \quad (1)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2} \left\{ g(N(t) - N_{\text{th}}) - \frac{1}{\tau_p} \right\} + \frac{\chi}{\tau_{\text{in}}} \frac{E(t - \tau)}{E(t)} \cdot \sin \theta(t) + F_\phi(t) \quad (2)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = J - \frac{N(t)}{\tau_s} - g((N(t) - N_{\text{th}})|E(t)|^2 + F_N(t)) \quad (3)$$

と表すことができる<sup>6,7)</sup>。ここで、 $g$  は利得係数、 $N_{\text{th}}$  はキャリヤー密度の閾値、 $R_{\text{sp}}$  はレーザー発振に寄与する自然放出係数、 $J$  は注入電流密度、 $\tau_p$ 、 $\tau_s$  は光子寿命とキャリヤー寿命、 $\tau_{\text{in}} = 2\eta l/c$  ( $\eta$ 、 $c$  はレーザー媒質の屈折率と真空中の光速度)、 $\tau = 2L/c$  は外部鏡を光が往復する時間、 $F_E$ 、 $F_\phi$ 、 $F_N$  はランジュバン雑音項である。また、 $\chi$  は戻り光の量を表す係数であり、

$$\chi = (1 - r_0^2) \frac{r_1}{r_0} \quad (4)$$

と書ける。式(1)、(2)の  $\theta$  は、戻り光がないときのレーザーの発振角周波数  $\omega_0$  を使い

$$\theta(t) = \omega_0(t) + \phi(t) - \phi(t - \tau) \quad (5)$$

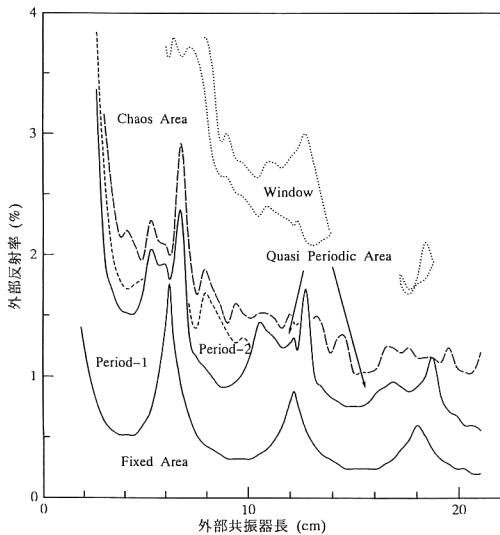


図4 カオス分岐の位相図.  $J=1.3J_{\text{th}}$ .

と表される。式(1), (2)の $\theta$ を含む右辺第2項が戻り光の効果を表す項であり、戻り光のある半導体レーザーのレート方程式は遅延微分方程式となる。この項があるために、レーザー出力光にはさまざまなダイナミクスが生み出されることになる。

図3にレート方程式を基に計算した外部反射率 $r_1$ に対するレーザー出力光の分岐図を示した<sup>2)</sup>。分岐図は図1(b), (c)のような時間波形について、極大、極小値をプロットすることにより求めたものである。図の上に示した連続する値は最大リヤブノフ指数を示したものであり、正で大きな値のとき、系のカオス性が増大する。この図で、反射率が小さいときには安定であった光出力が、反射率の増大とともに周期振動となり、図では明確には見えないが、周期倍増を繰り返しながら不規則なカオス波形となる。さらに反射率が増大すると再度安定な波形となり、同様な周期倍増を繰り返される。

図4は、ある条件下での外部共振器長と外部反射率についてのカオス分岐の相図を表したものである。この図において、安定(fixed area)と周期-1(period-1)の境界を見ると、安定な領域は外部共振器長に対して周期的に変動していることがわかる<sup>5)</sup>。安定領域のピークとなる外部共振器長間隔は、レーザーの緩和振動の周波数に比例して起こることが確かめられている。このことは、戻り光半導体レーザーにおける出力光の安定性、不安定性、カオスが緩和振動により著しく影響を受けていることを示している。

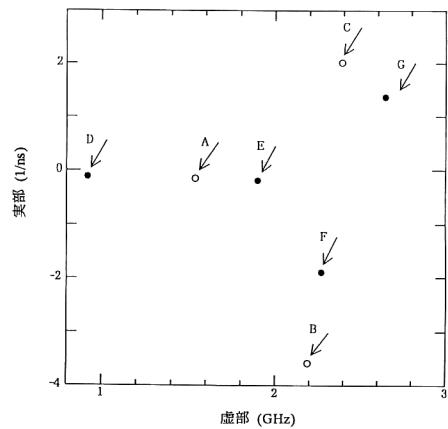


図5 戻り光半導体レーザーの線形モード分布. ○:  $L=9 \text{ cm}$ ,  $J=1.2J_{\text{th}}$ ,  $r_1=2\%$ , ●:  $L=15 \text{ cm}$ ,  $J=1.3J_{\text{th}}$ ,  $r_1=2.5\%$ .

### 3. カオス制御

カオスは、先にも述べたとおり、決定論的な方程式に基づく不規則性であり、ランダム雑音とは異なる。系がカオス的であるとき、その多次元パラメーター空間において、そのまわりの至る所で必ずしもカオス的になっているわけではなく、近くに周期的な軌道が存在する場合がある。特に、不安定周期軌道と呼ばれるカオスにおいては、パラメーターを少しだけシフトさせることにより、安定な軌道に収束させることができる。

カオス制御の代表的なものは、OGY法(Ott, Grebogi, Yorkeによって提案された方法)と呼ばれるものがある<sup>8)</sup>。系のダイナミクスの方程式が陽に示されているとき、この方法では数学的に安定点を求め、カオス状態を微小な摂動により安定点に引き込ませる方法である。しかし、この方法では厳密な系の定式化が必要であり、実際の制御という点においては、必ずしも適当な方法とは限らない。このOGYのエッセンスを使いながら、実際にも使えるカオス制御の方法としてOPF法(occasional proportional feedbackの略)が提案されている<sup>9-11)</sup>。この制御法では、系の出力から制御のための同期信号を作り出す方法であり、固体レーザーなど時間応答の遅い光カオス系においては、雑音の抑制などに威力を発揮している。一方、OPF法とは異なるが、ある時刻の出力と不安定周期軌道の周期分だけ遅れた遅延出力との差を制御信号とする、Pyragas法と呼ばれるOGYとOPFの中間的な方法が提案されている<sup>12)</sup>。OPF法やPyragas法では、高速で変化する信号の制御

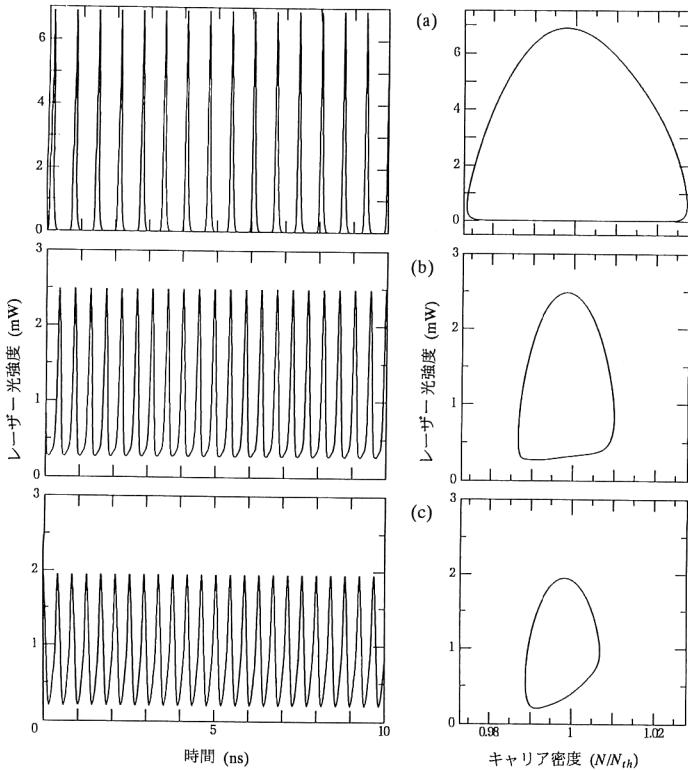


図6 カオス制御の例.  $L=9\text{ cm}$ ,  $J=1.2J_{th}$ ,  $r_1=2\%$ ,  $\xi=0.1$ . (a)  $\nu=1.54\text{ GHz}$ , (b)  $\nu=2.19\text{ GHz}$ , (c)  $\nu=2.38\text{ GHz}$ .

には難点がある。

3番目の方法は、カオス系の1つのパラメーターを微小振幅で正弦波変調することにより、系を安定化させる方法である<sup>2,13)</sup>。実は、光ディスクシステムにおいては、高周波注入電流変調（数百MHzの変調）によりレーザーの雑音を抑制する方法が、経験に基づきすでに実際に用いられている。しかし、ここで述べるカオス制御においては、変調する周波数は次に述べるカオス系の安定小信号解析より求まる安定モード周波数を用いる。また、基本的に変調振幅は、最初のカオス系のダイナミクスに変化をもたらさない微小な量である。パラメーターに正弦波変調をかける方法は、光カオスに限らずさまざまな分野のカオスに応用でき、高速カオス信号における変調にも適応できる。

#### 4. 戻り光半導体レーザーにおける光カオス制御

戻り光半導体レーザーにおける光カオス信号は、外部共振器長による遅延時間 ( $\tau=c/2L$ )、レーザーの緩和時間などが主な時間スケールとなり、光ディスクシステムなどの光学系を想定すると、数百MHzから数GHzで変動する信号となる。したがって、おおむねこの周波

数帯において系の適当な安定軌道を見つけ、その軌道に収束するように摂動を行う必要がある。ここでは、線形小信号解析による安定モード周波数を見つける手順<sup>2,13)</sup>についてのみ説明し、いくつかの制御の例について示す。

まず、(1)～(3)のレート方程式に対して、小信号安定解析を行う前に、レート方程式の定常解を求める。このようにして求まった定常解を使い、この定常解周りで小信号の摂動解を求める。これにより特性方程式が与えられるが、この特性方程式の解は一般に無数にあることになる。この特性方程式の解で、実数部はその解の安定性を示し、負の値であれば安定、正であれば不安定解である。また、虚数部は解の周期性を示すため、これと同じ周期で系を振動させると、安定な状態が得られる可能性があることになる。

図5は、戻り光のある半導体レーザーの線形モードの解を求めた例である<sup>2)</sup>。この例では、1～3GHzの間での解を求めており、実際には、1GHzより小さい解も存在し得る。この結果を見ると、これらの線形モード周波数は外部共振器長から計算される周波数とは、必ずしも一致していない。これらの解のうち、すべての解が安

定モードとなるわけではなく、実際に変調をかけたときにどのモードが最も安定であるかは、このモード解析からだけでは一概にいうことは難しい。しかし、これらの線形モードにおいては、光カオスを安定化できる可能性があることには変わりがない。

ところで、半導体レーザーの場合、レーザーのパラメータとして GHz 程度の変調をかける最も簡単な方法は、すでに述べた高周波注入電流変調である。式(3)において  $J=J_b(1+\xi \sin \nu t)$  とし、変調周波数  $\nu$  として図 5 で求めた線形モード周波数のひとつを使うことにより、容易にカオス制御が実現できる。図 6 は、光出力が図 1(c)のような弱いカオス状態にある戻り光半導体レーザーに対し、図 5 で求めた線形モード周波数を使い、周期状態へ遷移させた例である<sup>2)</sup>。変調信号の周波数に依存して、制御の様子が異なることがわかる。なお、この場合の変調振幅  $\xi=0.1$  というのは、必ずしも小さな振動とはいきれないが、変調を含めた新しい系として安定な系になっていると考えられる。そして、その安定性はやはり元の系のダイナミクスに起源があると考えるのが妥当である。

半導体レーザーにおける微小な注入電流変調は、光強度変調と等価である。したがって、高周波注入電流変調以外にも光強度変調できる方法がいくつかある。たとえば、戻り光の発生する外部鏡以外に、マイケルソン干渉計を構成するもうひとつの外部鏡を置き、半導体レーザー共振器内で光ビートを発生させる光制御の方法などがある<sup>14)</sup>。また、最近では、過飽和吸収帯を半導体レーザーの活性層に作り、戻り光との間で自励的にビートを発生させる機構をもつ DVD 用の半導体レーザーが作られているが<sup>15)</sup>、このようなデバイス設計においても、本解

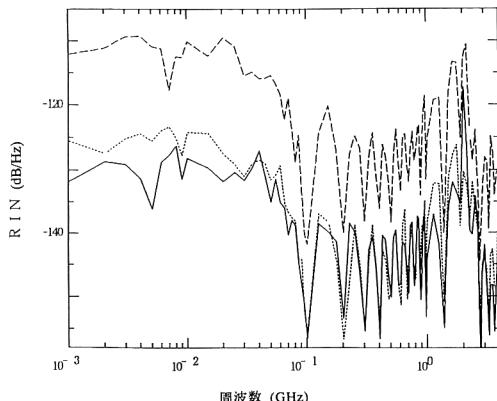


図 7 相対雑音。 $L=9$  cm,  $J=1.2J_{th}$ ,  $r_1=2\%$ ,  $\nu=2.38$  GHz,  $\xi=0.1$ .

説で述べたカオス制御に基づく戻り光雑音抑制の方法を参考にすることができる。

図 7 に、レート方程式を基に数値計算により求めた戻り光雑音抑制の結果を示す<sup>2)</sup>。図 5 の線形モード周波数のひとつを使い、周波数対相対雑音 (RIN) を求めたものである。図では、比較的低周波の雑音レベルの特性をみるために、100 MHz 帯域のローパスフィルターを仮定している。波線は戻り光がある場合の RIN であり、点線がカオス制御による戻り光雑音の抑制結果である。また、実線は比較のために戻り光のない半導体レーザーの RIN を示した。このように、カオス制御による雑音抑制により、ほぼ戻り光がない場合のレーザー発振に近い雑音特性が得られた。ところで、特定の線形モード周波数の狭い範囲でのみしかカオス制御ができないとすると、実際の系において使いものにならない。図 8 は、カオス制御の許容性を示すものである<sup>2)</sup>。この図からわかるように、線形モード周波数 2.38 GHz 付近 (図(a)) および振幅変調率 0.1 付近 (図(b)) の比較的広い範囲で 2 周期振動がみられ、カオスが安定化されている様子がわかる。

ここでは、戻り光半導体レーザーにおいて、光カオスに起因する不規則雑音を制御する方法について述べた

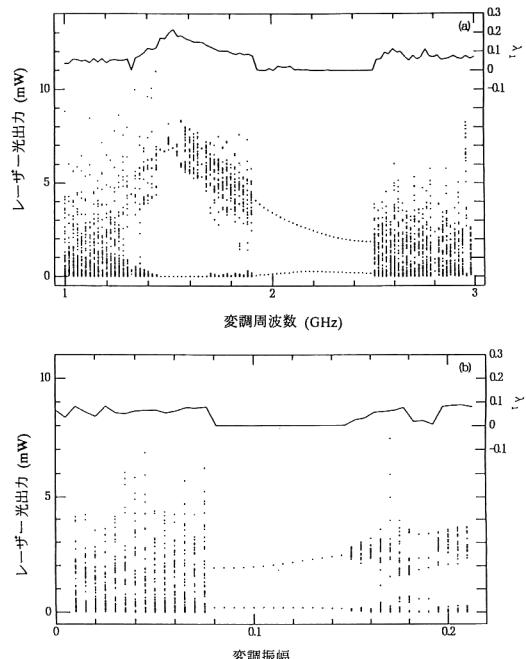


図 8 (a) 変調周波数に対する分岐図,  $\xi=0.1$ . (b) 変調振幅に対する分岐図,  $\nu=2.38$  GHz.  $L=9$  cm,  $J=1.2J_{th}$ ,  $r_1=2\%$ .

が、同様な制御を用いた半導体レーザーを光源とするLDV干渉計の安定化の方法や<sup>16)</sup>、LD励起固体レーザーでの光出力の安定化のための方法などが提案されている<sup>17)</sup>。

## 5. 光カオスの展望

半導体レーザーに戻り光があるときに光カオスが発生することを示し、またそれによって誘起される不規則雑音を制御する方法について述べた。光カオスというと、単にこれまでの見方を変えただけといった何かしらの偏見、あるいは場合によっては逆に過度の期待が寄せられることもある。いずれにしても、カオスはこれまでの物理体系を含む新しい分野であることには間違いないなく、偏見や過度の期待を排除した着実な進展を必要としている分野である。光の現象の多くは非線形性を含み、光カオスは至るところでみられる。その中でも、戻り光のある半導体レーザーは、光カオスのダイナミクスを調べ、制御を考えるのに優れたモデルであるといえる。他の非線形光システムの分野においても、光カオスの観点から現象を再認識することにより、新しい光の物理、技術のパラダイムが開かれることを期待したい。

本論文をまとめるにあたり、議論いただいた(株)ATR劉雲博士に感謝いたします。

## 文 献

- 1) R. W. Tkach and A. R. Chraphyvy: "Regimes of feedback effects in 1.5-mm distributed feedback lasers," *J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 1655.
- 2) N. Kikuchi, Y. Liu and J. Ohtsubo: "Chaos control and noise suppression in external cavity semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **33** (1997) 56.
- 3) S. Fukuchi, S.-Y. Ye and J. Ohtsubo: "Relaxation oscillation enhancement and coherence collapse in semiconduc-
- tor laser with optical feedback," submitted.
- 4) R. R. Gray, D. Huang and G. P. Agrawal: "Chaotic dynamics of semiconductor laser with phase conjugate feedback," *Phys. Rev. A*, **49** (1994) 2096.
- 5) A. Murakami, J. Ohtsubo and Y. Liu: "Stability analysis of semiconductor laser with optical feedback," *IEEE J. Quantum Electron.*, **33** (1997) in press.
- 6) R. Lang and K. Kobayashi: "External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties," *IEEE J. Quantum Electron.*, **16** (1980) 347.
- 7) G. P. Agrawal and N. K. Dutta: *Semiconductor Lasers* (Van Nostrand Reinhold, New York, 1993).
- 8) E. Ott, C. Grebogi and J. A. Yorke: "Controlling chaos," *Phys. Rev. Lett.*, **64** (1990) 1196.
- 9) E. R. Hunt: "Stabilizing high-period orbits in a chaotic system: The diode resonator," *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991) 1953.
- 10) R. Roy, T. W. Murphy, T. D. Maier, Z. Gills and E. R. Hunt: "Dynamical control of a chaotic laser: Experimental stabilization of a globally coupled system," *Phys. Rev. Lett.*, **68** (1992) 1259.
- 11) Y. Liu and J. Ohtsubo: "Experimental control of chaos in a laser-diode interferometer with delayed feedback," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 448.
- 12) K. Pyragas: "Continuos control of chaos by self-controlling feedback," *Phys. Lett. A*, **170** (1992) 421.
- 13) Y. Liu, N. Kikuchi and J. Ohtsubo: "Controlling dynamical behavior of a semiconductor laser in with external optical feedback," *Phys. Rev. E*, **51** (1995) R2697.
- 14) Y. Liu and J. Ohtsubo: "Dynamics and chaos stabilization of semiconductor lasers with optical feedback from an interferometer," *IEEE J. Quantum Electron.*, **33** (1997) 1163.
- 15) 小林健一: "DVD用赤色半導体レーザー", *光学*, **26** (1997) 16.
- 16) N. Watanabe and K. Karaki: "Inducing periodic oscillations from chaotic oscillations of a compound-cavity laser diode with sinusoidally modulated drive," *Opt. Lett.*, **20** (1995) 1032.
- 17) Y. Kitaoka, H. Sato, K. Mizuuchi, K. Yamamoto and M. Kato: "Intensity noise of laser diodes with optical feedback," *IEEE J. Quantum Electron.*, **32** (1996) 822.

(1997年6月27日受理)