

# 半導体レーザー干渉計における 光のフィードバックによる干渉縞ロック現象

劉 紀 元

半導体レーザーから出た光が外部反射物により反射して半導体レーザーに戻ると、レーザー発振に不安定性を増し、いろいろな複雑な振る舞いをもたらす。しかし、半導体レーザーと外部反射物からなる複合共振器は半導体レーザー物理やカオス現象を理解するのに簡単かつ理想的なモデルが提供されるので、この系についての研究は盛んに行われ、数多くの成果が挙げられている。Langらは戻り光によって注入電流の発振閾値が下がり、さらに注入電流を変えると、レーザーの発振強度に周期的なうねり (undulation) が生ずることを発見し、この系のダイナミクスを時間遅延方程式で解析した<sup>1)</sup>。Schunkらは戻り光によって、レーザーの線幅を 1000 倍まで狭くすることができ、光メモリー、光通信に必要な波長安定化レーザーの実現に寄与できると指摘した<sup>2)</sup>。Lenstraらは外部共振器の反射率が  $10^{-4}$  より大きい場合、共振器の最も安定したモードは最大ゲインモードになり<sup>3)</sup>、その場合、レーザーの出力は間隔 1 ns 程度のパルス発振になることを実験で証明した<sup>4)</sup>。外部反射物が光軸に沿って移動する場合、半導体レーザーの出力が半波長を周期として変化する。この特性を利用すると、外部反射物の初期位置からの移動量がレーザー出力の変化周期を数えることによって測定できる<sup>5,6)</sup>。さらにレーザー出力の時間微分をとれば、散乱体の運動速度も測定できる<sup>7)</sup>。

これまでの研究のほとんどがただ 1 つの外部共振器をもつ半導体レーザーに注目しており、2 つの外部共振器に関する研究は少ない。これは 2 つの理由によると考えられる。1 つは、2 つの外部共振器の場合はレーザー発振に影響を与える要因が多くなり、理論モデルの構築や実験が困難になる。もう 1 つの原因として、2 つの外部共振器の場

合は 1 つの外部共振器の場合より、レーザーの雑音が著しく増大する<sup>8,9)</sup>。最近、干渉計型の外部共振器を有する半導体レーザー発振の理論解析を行って、2 番目の外部共振器ミラーの存在がカオス制御に有効であることを指摘した<sup>10)</sup>。

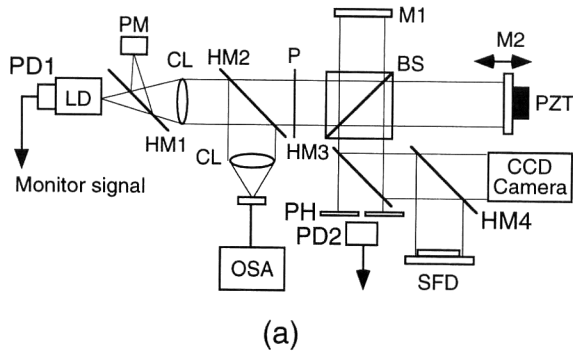
筆者らは半導体レーザーの電流変調を用いた能動型干渉計の研究を行ってきた<sup>11-13)</sup>。その目的は干渉計測の問題点である外乱に弱いことを解決するためである。そこでは、干渉縞の動きを空間フィルター検出器で検出し、それを半導体レーザーの注入電流にフィードバックすることによって、干渉縞をロックすることに成功した。その研究において、光のアイソレーターを取り外し、電気的フィードバックを止めても、干渉縞がロックされる現象を見いだした<sup>14)</sup>。この現象は半導体レーザーへの光のフィードバックによると考えられる。物理的にはこのロック現象は光路差の変化によるレーザー波長の変化がちょうど干渉縞の位相が  $2\pi$  の整数倍の近傍に変化するようモードホップするためであると考えられる<sup>15,16)</sup>。

本稿では、半導体レーザーを用いた干渉計における干渉縞のロック現象についての研究を解説し、その応用およびこれからの研究の方向を展望する。

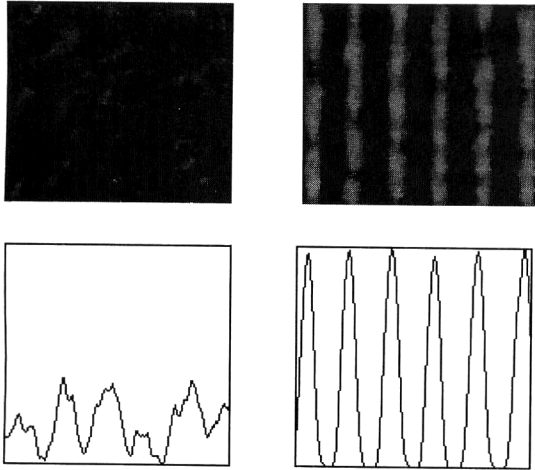
## 1. 干渉縞ロック現象とは

この干渉縞ロック現象が観察された二光束半導体レーザー干渉計とこの現象を実験的に調べるための実験装置を図 1(a) に示す。光源はシングルモード半導体レーザー (TOLD 9150) で、中心波長は 691 nm、閾値電流は 25°C のとき 50 mA で、最大出力 30 mW である。干渉計はマイケルソン干渉計を採用している。干渉計の一方のミラーに PZT をつけて、光路差に微小変化または振動を与える。もう一方のミラーは固定されている。これらのミラー

理化学研究所光工学研究室 (〒351-0198 和光市広沢 2-1)  
E-mail: liu@optsun.riken.go.jp



(a)



(b)

図1 現象を観察する光学系 (a) と観察された干渉縞パターン (b).

はそれぞれ、90%の反射率をもつ。しかも両ミラーをマイクロメーター付きの移動台上に固定し、光軸方向にマイクロメートルの精度で位置を変えられるようにしておく。レーザーの発振波長は波長計 OSA (ADVANTEST Q8344, 分解能 0.05 nm) で測り、レーザー出力パワーは検出器 PD1 で測定する。干渉縞の様子を CCD カメラで観察・記録すると同時に、その 1 点の強度の変動を PD2 で測定する。また一定のピッチに調節された干渉縞の位相を空間フィルター検出器 SFD で検出する。干渉計からレーザーに戻った光はハーフミラー HM1 で分けて、反射した光の量をパワーメーター PM で測定し、レーザーに戻る光量に換算して、戻り光量を見積もる。

図 1(b) の左側に示すのは光アイソレーターがレーザーの前に挿入されて、干渉計からの戻り光が遮られる場合の干渉縞とその一断面である。この場合の PZT ミラーの振動は正弦波的な振動で、振幅は  $1.5 \mu\text{m}$  で、周波数は 100 Hz である。また光路差は約 300 mm である。干渉縞は PZT ミラーの振動によって振動するためにぼけている。一方、図 1(b) の右側に示すのは光アイソレーターを取り去って上述の手順でロックされた干渉縞とその一断面であ

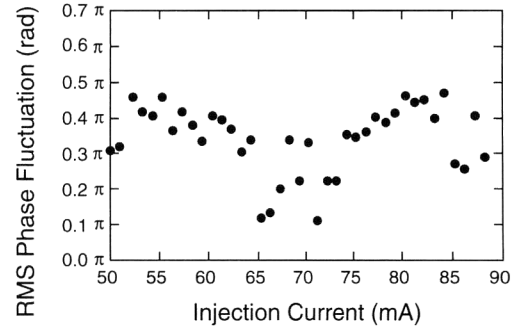
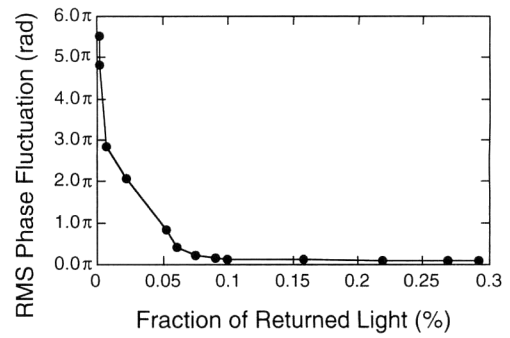


図2 干渉縞ロック現象の発生条件. (a) 戻り光量依存性と (b) 注入電流依存性.

る。明らかに干渉縞は光のフィードバックによってロックされていることがわかる。

反射光の強度がどのようにこの干渉縞ロック現象に影響を与えるかを調べるために、レーザーとコリメーターレンズの間に、半透明鏡を置いて、そこから反射した光をパワーメーターの検出面にフォーカスし、半透明鏡 HM1 の反射率と透過率から半導体レーザーに戻った光の量を推算し、戻った光の割合を測定する。この割合を変えるために、レーザー出射光が直線偏光していることを利用して、コリメーター CL とビーム・スプリッター BS の間に偏光板を入れ、偏光板の透過軸の角度を変えた。この場合の干渉縞の位相変動を空間フィルター検出器で検出した。この信号の標準偏差の戻り光量依存性を図 2(a) に示す。結果によると、戻り光の割合が増大するにつれ、位相のゆらぎ幅が小さくなる。特に戻り光量が  $10^{-3}$  を超えると、位相ゆらぎの標準偏差が  $0.2\pi$  に低下し、それ以上戻り光量が増えても、位相ゆらぎはそれほど変わらないことがわかった。

この干渉縞ロック現象の注入電流依存性を調べるために、注入電流を閾値電流の 50 mA から制限電流 88 mA まで、1 mA ステップで変化させたときの干渉縞の位相変動の標準偏差を空間フィルター検出器で検出して、位相ゆらぎの注入電流依存性を調べた。その結果を図 2(b) に

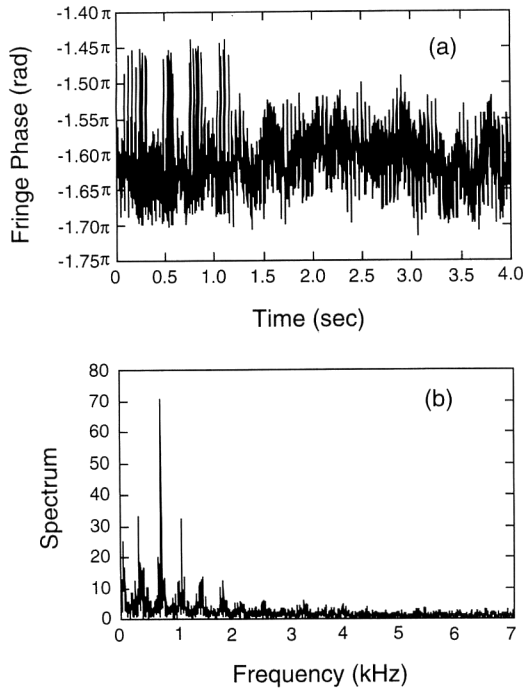


図3 干渉縞がロックされたときの位相の時間変化とそのスペクトル。

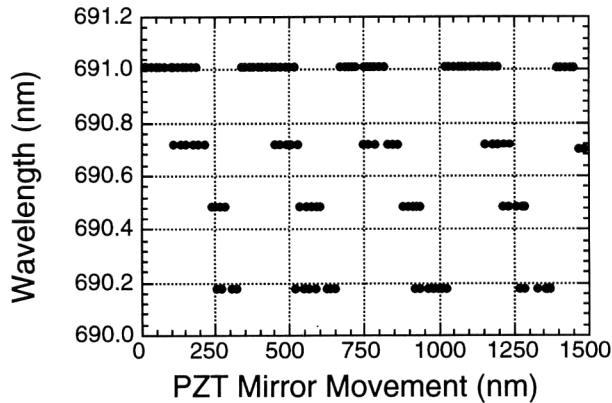


図4 干渉縞がロックされたとき、レーザー発振波長のPZTミラー移動量に対する依存性。

示す。これからみると、振幅  $1.5 \mu\text{m}$ 、周波数  $100 \text{ Hz}$  の PZT ミラーの振動に対し、注入電流の全域にわたり、干渉縞がロックされていることがわかる。ただし、閾値 ( $50 \text{ mA}$ ) 近傍や、制限電流 ( $88 \text{ mA}$ ) の近傍において、干渉縞位相ゆらぎが  $0.4 \pi$  程度と大きく、それらの中間部においては、 $0.1 \pi$  で小さい。一番安定する場合の注入電流が  $70 \text{ mA}$  となっている。この依存性を数回にわたって測定しても、同じような結果となった。

干渉縞の位相の変化を空間フィルター検出器で検出した結果を図3に示す。干渉縞がロックされた場合の位相変化とそのスペクトルが (a) と (b) である。(a) からみる

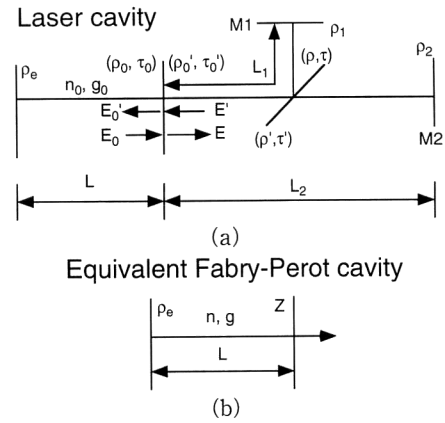


図5 半導体レーザー干渉計の理論モデル。

と、干渉縞の位相変動が最大  $0.25 \pi$  あり、 $1.5 \mu\text{m}$  の光路差変化に相当する位相変化の  $1/30$  に抑制されたことがわかる。そのスペクトルには、いくつかの周波数ピークがみられる。この場合の干渉縞の強度はカオス的な振る舞いを示す。

PZT ミラー移動量に対するレーザー波長の依存性を波長計 OSA で測定した。その結果を図4に示す。波長計の分解能は  $0.05 \text{ nm}$  である。波長は PZT ミラーの移動によって、半波長の移動ごとに繰り返す鋸歯状の周期的な動きを示している。各周期の中で、波長が  $0.23 \text{ nm}$  ずつ段階的にジャンプし、その間、波長はほぼ一定に保たれている。

## 2. 理論解析

半導体レーザーを光源とした Michelson 干渉計を考えてみよう。半導体レーザーと干渉計を含む系を図5(a) のような多層モデルで表せる。この系の定常状態の解を求めるためには、各ミラーにおける境界条件を考えればよい。これにより半導体レーザー干渉計は  $\rho_e$  と  $Z$  を端面ミラーの反射係数とし、 $g$  を増幅係数とする等価的ファブリー・ペロー共振器 (図5(b)) になる。このような等価的共振器の共振条件は下記の式で表せる。

$$\rho_e Z(k, L_1, L_2) g \exp(i2knL) = 1 \quad (1)$$

一方、この等価的共振器の損失は下のようになる。

$$\alpha = 1 - |\rho_e Z|^2 = 1 - \rho_e^2 |Z|^2 \quad (2)$$

レーザー発振は等価的ファブリー・ペロー共振器の損失が最小になるときの共振波長で決まる。このときは  $|Z(k, L_1, L_2)|$  は最大になる。 $|Z|^2$  は反射、透過係数の高次項を省略すると、下記のように書ける。

$$|Z|^2 = \rho_0^2 + \frac{a^2 + b^2 + 2ab \cos[2k(L_2 - L_1)]}{1 - 2c^2 - 2d^2 - 2cd \cos[2k(L_2 - L_1)]} \quad (3)$$

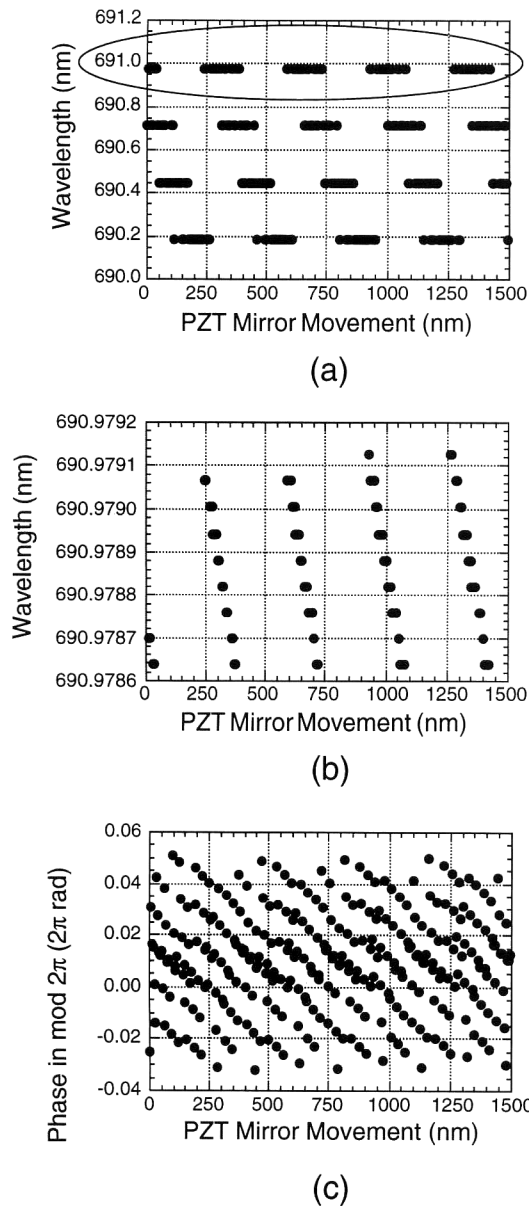


図6 数値解析の結果。(a) レーザー発振波長のPZTミラー移動量に対する依存性、(b) (a)の中の点線で囲まれた部分の拡大図、(c) 干渉縞位相のPZTミラー移動量に対する依存性。

ここで、 $a = \tau_0 \tau_0' \rho^2 \rho_1$ 、 $b = \tau_0 \tau_0' \tau \tau' \rho_2$ 、 $c = \rho_0' \rho^2 \rho_1$ 、 $d = \rho_0' \tau \tau' \rho_2$ 。したがって、 $|Z|^2$ が最大値になるためには、 $\cos [2k(L_2 - L_1)]$ が最大になる必要がある。すなわち、

$$2k(L_2 - L_1) = 2m\pi \quad (4)$$

に相当する。ここで、 $m$ は任意の整数である。一方、 $2k(L_2 - L_1)$ は干渉縞の位相を表すので、式(4)は位相が $2\pi$ の整数倍であることを意味する。しかし、式(4)は必ずしも式(1)を満足しない。式(1)が満足されて、かつ式(3)を最大とするためには、式(4)の代わりに、

$$2k(L_2 - L_1) = 2m\pi + \Delta\phi \quad (5)$$

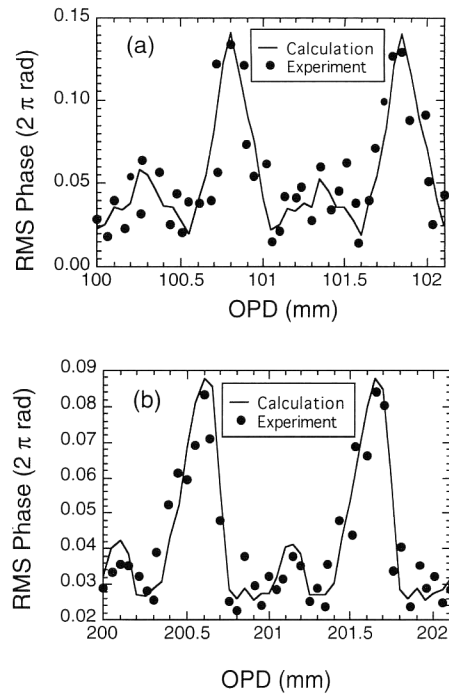


図7 干渉縞位相の標準偏差のOPDに対する依存性。(a) OPDは100 mmから、(b) OPDは200 mmから。

となる。ただし、 $\Delta\phi$ は数値計算の結果 $2\pi$ よりずっと小さいことが示される。

この干渉縞ロック現象は干渉計のミラーの位置変化によって、レーザーの発振波長が変化することによるものと考えられる。以上の共振条件を使って、レーザー波長の光路差依存性を求める。干渉計の光路差が200 mmに固定した位置から、PZTミラーのみを動かした場合のレーザー発振波長のミラー移動量依存性の計算結果を図6(a)に示す。ここで、 $\rho_0 = 0.5$ 、 $\rho_1 = \rho_2 = 0.1$ 、 $\lambda_0 = 2\pi/k_0 = 690.5$  nm、 $\Delta\lambda = 2\pi\Delta k/k_0^2 = 0.23$  nm、 $L_1 = 300$  mm、 $L_2 = 500$  mm。PZTミラーを初期位置から、1 nmステップで1500 nmまで変化させると、発振波長が周期的に変化することがわかる。周期は波長の半分である。1つの周期内で大きなモードホップが起こる。モードホップの間隔は0.23 nmで、ちょうどレーザー共振器のモード間隔に相当する。この結果と上記の図4に示す波長計OSAでの測定結果と比べると、両者がよく一致していることがわかる。

上記の結果において、各ステップ内部の変化を調べるために、図6(a)の点線で囲まれた部分を拡大しているのが図6(b)である。拡大図をみると、各ステップにはもっと細かい構造が現れる。その間隔は0.0007 nmである。これはちょうど外部共振器モードで、その間隔は $\Delta\lambda = \lambda^2 / 2(L_2 - L_1) = 0.0007$  nmに相当する。図6(a)の結果から光路差に対応する干渉縞位相のミラー移動量に対する依存性

を計算した結果を図6(c)に示す。2 $\pi$ の整数倍は干渉強度に影響しないのでそれを引き去った。位相のばらつきが0.2 $\pi$ 以内にあることがわかる。これは干渉縞がロックされることを意味している。すなわち、光路差の変化によるレーザー波長がちょうど干渉縞の位相変化を2 $\pi$ の整数倍に比べて、小さく抑えるようにジャンプするためである。また、理論解析と実験結果<sup>19)</sup>から、光路差の広い範囲でロックが起こるが、光路差ゼロの場合、ロックができないことがわかった。これは、光路差がゼロに近い場合、外部共振器モードの間隔がレーザー共振器モード間隔より大きくなって、実際の共振モードになれないからである。

図7に位相変動幅の干渉計の光路差に対する依存性を示す。光路差が長ければ長いほど、位相の変化が小さくなる。すなわち、光路差の増大につれ、干渉縞の安定性がよくなる。また、位相変動幅が光路差に対して、周期的に変化することがわかった。その周期はちょうどレーザー共振器の光学的長さである。この結果も実験結果とよく一致している。

### 3. 展 望

以上で述べたこの現象は耐環境干渉計測にも応用できる。干渉計測は高感度かつ非接触の計測法として、精密計測や精密加工分野に幅広く応用されている。しかし、高感度である反面、振動や空気のゆらぎにも弱いという欠点がある。この問題点を解決するために、いろいろな手法が提案されている。振動による干渉縞の強度変化を検出し、その信号を半導体レーザーの注入電流にフィードバックすることによって、波長を変え、位相をずらして干渉縞をロックすることができる。また、干渉強度の正弦波変調を利用する方法も提案されている。最近では、半導体レーザーの注入電流を変調して得られる干渉縞をロックインして、その位相を検出しながら、注入電流をフィードバック制御する方式も提案されている。以上の電氣的なフィードバックを用いた方法はそれぞれ利点があるが、装置が複雑であり、また抑制できる外乱の周波数も電気回路装置の応答で制限されるので、大きな振動には対応できない。しかし、上で述べた干渉縞ロック現象を利用すれば、これらの問題点が解決される。定盤外に置かれた鏡面を測定するために、キャリアの入った干渉縞を光のフィードバックでロックし、それを実時間縞解析装置に転送し、干渉縞の位相を求めることができる。測定した結果を定盤上での結果と比べると、ほぼ一致している。測定の繰り返し精度も定盤上と同じくらいである。これらの結果によって、干渉縞ロック現象を利用し、定盤外での光干渉計測の可能なことが

証明された<sup>17)</sup>。

また、干渉計の両ミラーを固定して、注入電流だけを変調する場合の干渉縞ロック現象の発生を確認し<sup>18)</sup>、それに関する理論解析も行った<sup>19)</sup>。また、実験で干渉計の光路長と半導体レーザーの注入電流を同時に変調しても、干渉縞がロックされることが観察された<sup>20)</sup>。現在、これについても検討を行っている。

他の応用の可能性としては、半導体レーザーの光のフィードバックによるチューニングがある。これはレーザークーリングやレーザートラッピングに応用できるかもしれない。

最後に、本研究を行うにあたり、直接ご指導いただきました理化学研究所光工学研究室山口一郎主任研究員、有益な助言をいただきました水野潤基礎科学特別研究員、およびご支援をいただきました同研究室の皆様へ深く感謝いたします。

### 文 献

- 1) R. Lang and K. Kobayashi: "External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties," *IEEE J. Quantum Electron.*, **16** (1980) 347-355.
- 2) M. Schunk and K. Petermann: "Minimum bit rate of DPSK transmission for semiconductor laser with a long external cavity and strong linewidth reduction," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **Lt-15** (1987) 1309-1317.
- 3) A. M. Levine, G. H. M. van Tartwijk, D. Lenstra and T. Erneux: "Diode laser with optical feedback: Stability of the maximum gain mode," *Phys. Rev.*, **A52** (1995) R3436-R3439.
- 4) I. Fischer, G. H. M. Tartwijk, A. M. Levine, W. Elsasser, E. Gobel and D. Lenstra: "Fast pulsing and chaotic itinerancy with a drift in the coherent collapse of semiconductor lasers," *Phys. Rev. Lett.*, **76** (1996) 220-223.
- 5) P. J. De Groot: "Range-dependent optical feedback effects on the multimode spectrum of laser diodes," *J. Mod. Opt.*, **37** (1990) 1199-1214.
- 6) J. Kato, N. Kikuchi, I. Yamaguchi and S. Ozono: "Optical feedback displacement sensor using a laser diode and its performance improvement," *Meas. Sci. Technol.*, **6** (1995) 45-54.
- 7) P. J. de Groot and G. M. Gallatin: "Backscatter-modulation velocimetry with an external-cavity laser diode," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 165-167.
- 8) Y. Liu and J. Ohtsubo: "Experimental control of chaos in a laser diode interferometer with delayed feedback," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 448-450.
- 9) I. Fischer, O. Hess, W. Elsaber and E. Gobel: "High-dimension chaotic dynamics of an external cavity semiconductor laser," *Phys. Rev. Lett.*, **73** (1994) 2188-2191.
- 10) Y. Liu and J. Ohtsubo: "Dynamics and chaos stabilization of semiconductor laser with optical feedback from an interferometer," *IEEE J. Quantum Electron.*, **33** (1997) 1163-1169.

- 11) I. Yamaguchi, J. Liu and J. Kato: "Active interferometers for shape and deformation measurement," *Opt. Eng.*, **10** (1996) 2930-2939.
- 12) J. Liu, I. Yamaguchi, T. Nakajima and J. Kato: "Active phase shifting interferometer using current modulation of a laser diode," *Opt. Rev.*, **3** (1996) 128-137.
- 13) J. Liu, I. Yamaguchi, J. Kato and T. Nakajima: "Real-time surface measurement by an active interferometer," *Opt. Rev.*, **4** (1997) 216-220.
- 14) J. Liu and I. Yamaguchi: "Observation of a fringe locking phenomenon in a self-feedback laser diode interferometer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) 2910-2919.
- 15) J. Liu and I. Yamaguchi: "Theory for fringe locking in a laser diode interferometer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) L933-L935.
- 16) J. Liu and I. Yamaguchi: "Fringe-locking in a laser diode interferometer by optical feedback," *Proc. SPIE*, **2479** (1998) 84-93.
- 17) J. Liu and I. Yamaguchi: "Surface profilometry using laser diode optical feedback interferometer outside optical benches," *Opt. Lett.*, submitted.
- 18) J. Liu and I. Yamaguchi: "Fringe locking in a laser diode interferometer by optical feedback during modulation of injection current," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 100-103.
- 19) J. Liu and I. Yamaguchi: "Analysis of fringe locking in a laser diode interferometer under injection current modulation," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 336-338.
- 20) J. Liu and I. Yamaguchi: "Fringe-locking in a laser diode interferometer in the presence of current modulation," *Proc. SPIE*, **3626** (1999) to be published.

(1999年3月27日受理)