

Littman型外部共振器半導体レーザーの能動的モードホップ抑止

Active Mode-Hop Suppression in Littman-type External Cavity Semiconductor Laser

UDC 621.375.826 : 826.621.3.029.7

衣川 茂
齋藤 崇記
待鳥 誠範
亀山 仁

Shigeru Kinugawa

Takanori Saitoh

Shigenori Mattori

Hitoshi Kameyama

研究所 光制御技術プロジェクトチーム

研究所 光制御技術プロジェクトチーム

研究所 光制御技術プロジェクトチーム

メジャメント ソリューションズ デジタルコム事業部 開発部

1 まえがき

近年、光通信の分野では、波長分割多重 (WDM) 通信システムの実現やチャンネル間隔の高密度化への動向に伴い、光波長の計測や制御が極めて重要な開発課題となっている。また、やや特殊ではあるが、分光分析やこれを応用した原子周波数標準などの分野でも光周波数制御技術は重要である。これらの分野において、レーザーダイオード (LD) を利用した外部共振器レーザー (External Cavity Laser ; ECL)¹⁾ が波長可変光源として広く用いられている。この理由は、ECL が単純な構成でありながら、LD 単体比べて波長可変範囲が広く、発振スペクトル幅が狭いといった利点を有するためである。しかしながら、ECL は時としてモードホップ (通常数 10 pm 程度の波長跳び) を生じることがある。このため、ECL では 10 pm 以下の波長確度や波長再現性を保証することが難しく、その有効性が大きく制限されている。また、高い波長確度を得るために波長計による測定を行いながら、ECL の発振波長を所定値に制御する場合などにも、モードホップは制御信号に対する波長変化の連続性を阻害し、安定な制御を維持できない。

モードホップを抑止する目的で ECL の機械的構造や綿密な初期調整といった観点から多くの改良が試みられているが、広帯域の波長掃引時や 1 年以上の長期間のモードホップフリーを保証することは容易ではない。そこで本稿では、機械的な制限を緩和し、外乱による共振器長の変化に対してもモードホップを抑止する制御手法を提案し、基礎的な実験結果について述べる。

2 従来のモードホップ抑止法

2.1 モードホップの原因

ECL は片端面が無反射 (AR) コートされた LD と回折格子

などの波長分散性素子を含む光共振器から成っている。図 1 (a) は Littman 型 ECL²⁻³⁾ の模式図である。この ECL では回折格子が LD の方向へ特定の波長だけを戻す反射型の波長フィルタとして作用し、LD の AR コートされていない端面との間で外部共振器を構成する。回折格子は LD からの光を波長に応じた角度で回折するため、ミラーの回転によって、LD

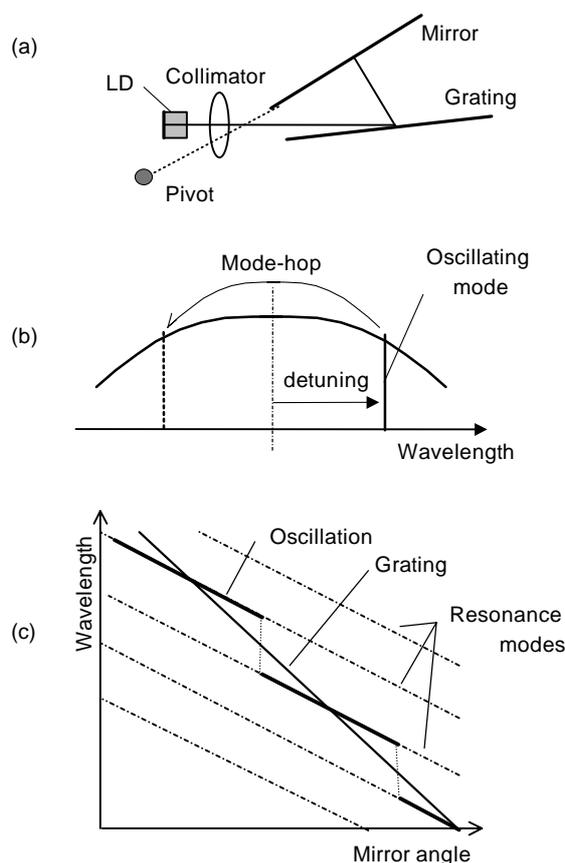


図1 Littman型ECL (a) とモードホップの原因 (b)(c)
Littman-type ECL (a) and illustration of cause of mode-hopping (b)(c)

へ戻る光の波長を選択し、結果的に発振波長を変化できる。ECLの構成にはこの他にも Littrow 型などがあるが、以下では提案する手法に最も適した構成である Littman 型に限定して記述する。他の構成でも波長に対する角分散をもつ光学素子を使用したものであれば、考え方は全く同様である。また以下では、ECL が縦単一モードで発振していることを前提とし、波長などの数値は $1.5\mu\text{m}$ 帯での値とする。

縦単一モード発振時の発振波長は、回折格子のもつ波長分散性を使って選択されたファブリ・ペローモード（外部共振器の共振器長によって決まる共振縦モード）の波長として決定される。一般に LD の利得帯域幅は数 10nm であり、回折格子が選択する波長帯域幅に比べて3桁程度広く、利得スペクトルの形状は平坦と見なすことができる。以下、回折格子によって選択される波長帯域の中心波長を「選択波長」、発振波長と選択波長の波長差または周波数差を「離調」と呼ぶことにする。図1(b)はモードホップの原因を説明するための概念図である。上部の曲線は回折格子の波長選択特性を意味しており、中央の鎖線が選択波長を示している。また、右側の実線は発振モード、左側の破線は発振モードの隣接モードを示している。図のように2つのモードが選択波長からほぼ等しい波長差にある場合、モードホップが生じやすいことがわかる。つまり、離調が縦モードの波長間隔の半分以上になると、発振モードよりも隣接モードに対するQ値が高くなるため、発振モードが跳び移りやすくなる。したがって、選択波長を決めるミラーの角度と、発振波長を決める共振器長の2自由度を制御して、離調をなくすことができれば、モードホップを抑止できることがわかる。

現実には波長掃引を目的として、ミラーの回転によって選択波長を変化させると、ファブリ・ペローモードの波長も変化するが、これらの変化率は一般に異なるため、しばしばモードホップが発生する。図1(c)に模式図を示す。図では鎖線で各ファブリ・ペローモードの波長を、実線で選択波長を示している。発振波長は選択波長に近接したファブリ・ペローモードの波長となるから、周期的にモードホップを繰り返す、不連続に変化する。

2.2 従来のモードホップ抑止技術

従来のモードホップ抑止は次の2つの方法に分類される。

- (1) ミラーの角度と共振器長とが適切に連動するような機構の設計と実現。
- (2) ミラーの角度と共振器長との同時精密設定。

(1)の方法では、任意のミラー回転角に対して離調をなくすミラー回転軸位置が知られている⁴⁻⁵⁾。つまり、図1(c)の鎖線と実線の傾きを一致させて、モードホップを抑止することができる。なお、Littrow 型ECLについても、同様な回折格子回転軸位置が知られている⁶⁾。この手法は上述の2自由度を機械的にリンクさせて1自由度とするものである。適切な機構が実現できれば、最も扱いやすい形態であるが、回転軸位置の許容誤差は小さく、具体的な機構の作製、初期調整や初期状態の維持は容易ではない。目安として、 $1.5\mu\text{m}$ 帯で 10nm の波長連続掃引を行うためには、回転軸位置を $\pm 50\mu\text{m}$ 以内に維持しなければならない。

一方、(2)の方法は、初期調整時に発振波長と回折格子等の角度と共振器長の関係をあらかじめ調べておき、これに基づいて回折格子の角度と共振器長の2自由度を同時にモードホップが生じないような値に設定するものである。この方法では、初期調整時に詳細なテーブルを作成しなければならない煩わしさがある。それにもかかわらず、長期的には何らかのドリフトによって、この初期テーブルの少なくとも一部は使用不能となる危険性が高い。

いずれにしても、初期調整の直後にモードホップフリーを実現することは可能であるが、これを長期間維持することは難しいと考えられる。(1)の方法について考えると、ミラー回転軸位置の要求精度が $10\mu\text{m}$ オーダであれば、その実現は可能である。しかしながら、経時的な光学系の変形やLD内部の屈折率変化などによる半波長程度 ($1\mu\text{m}$ 弱) の共振器長の変化は十分に生じるおそれがある。モードホップは共振器長が最適な長さから半波長程度ずれるだけで生じるため、ミラー回転軸位置を正確に調整しただけでは、ミラー回転時(波長掃引時)や1年以上の長期間のモードホップを確実に抑止することは容易ではない。

以上のように、従来のモードホップ抑止技術には帰還制御が用いられていない。つまり、ECLの挙動は初期条件だけに基づくものと捉えられており、初期調整の不完全さ、環境変化や種々のドリフトに対して敏感である。経時変化などによって光学系が初期状態から変化した場合には、モードホップ抑止の効果を維持できなくなる。

3 能動的モードホップ抑止の原理

3.1 離調検出の原理

従来のモードホップ抑止法がもつ機構実現の困難さや経時

変化に対する敏感さを緩和するためには、閉ループ制御を導入して、能動的にモードホップを生じにくい状態を維持することが有効である。

モードホップ抑止のための閉ループ制御を実現する上で、最も重要な要素は離調の検出である。図2に離調に起因する回折角度の模式図を示す。簡単のため、Littrow型で図示している。λ₀は発振波長であり、λ_gは選択波長である。図2(b)のように離調がない場合には、回折光はLDから回折格子へ向かう光の光軸上を戻る。一方、図2(a),(c)のようにλ₀がわずかに変化した場合を考えると、回折光は入射光軸とは異なる方向に戻る。回折角の変化の向きは選択波長と発振波長の大小関係によって異なるため、符号も含めた離調の情報を含んでいる。

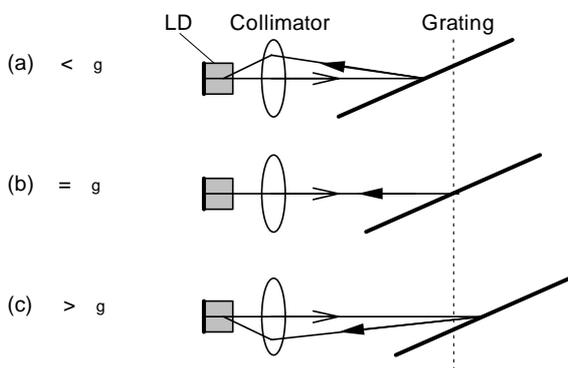


図2 離調による回折角の変化
Diffraction angle according to detuning

いま、図3(a)に示したように、ビームサンプラと十分遠方に置いたスクリーンを考えると、離調をビーム照射位置の変位(以下、ビーム変位)として検出できる。

ビーム変位量の具体的な検出方法としては、図3(b)に示すような2分割された受光領域と各々の受光量P₁, P₂を考え、規格化された受光量差(Normalized Power Difference; NPD)を

$$NPD = \frac{P_2 - P_1}{P_1 + P_2} \dots\dots\dots(1)$$

と定義して、ビーム変位が指標化され、NPDは2分割型受光器を用いることで容易に測定できる。

図3(c)はGaussianビームを仮定してNPDを計算した結果である。横軸は回折格子の分解帯域幅によって規格化した離調である。また、この横軸はスクリーン上でのビーム直径(光強度が中央の1/eになる直径として定義)によって規格化されたビーム変位でもある。実線は左右の受光領域の間に

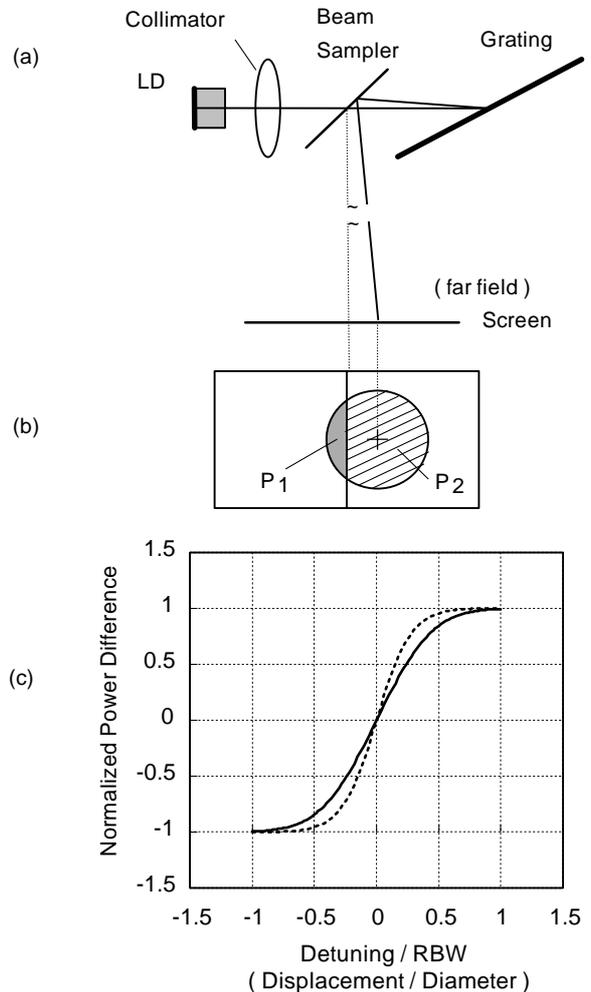


図3 ビーム変位(a)、2つの領域での受光量(b)、および離調に対する規格化受光量差NPD(c)(RBW; 分解帯域幅)
Illustration of beam displacement (a), detection powers in two areas (b), and normalized power difference (NPD) vs. normalized detuning (c) (RBW; resolution bandwidth of grating)

間隙がない理想的な場合である。破線はビーム半径に等しい幅をもつ素子分離用の不活性領域を想定した場合である。NPDはビーム変位に対して単調、かつ、原点付近でほぼ線形に変化することがわかる。

実際の Littman 型 ECL では、回折格子の分解帯域幅 50 ~ 100 pm, ファブリ・ペローモードの間隔 15 ~ 30 pm のものが一般的である。モード間隔 20 pm, 分解帯域幅 100 pm の ECL の場合、離調の絶対値が 10 pm 以上のときにモードホップが生じやすくなる。離調が ±10 pm, つまり、(離調)/(分解帯域幅)が ±0.1 の場合、図3(c)から NPD は ±0.1 程度であることがわかる。NPD の値域は -1 ~ 1 であるため、±0.1 はフルスケールの 10% に相当し、容易に検出可能である。

波長に対する回折角は非線形であるが、離調は高々数10 pm であるため、この範囲では回折角変化あるいはビーム変位は離調に比例するものと見なせる。以上のことから、Littman 型 ECL について、モードホップを生じない程度の微小な離調を NPD の測定によって十分に検出可能なことが結論づけられる。なお、Littrow 型 ECL では、一般に Littman 型 ECL に比べて回折格子による波長選択性が低いため、モードホップ抑止制御のために十分な離調検出が、より困難となる。

3.2 離調に基づく制御方式

離調が検出できれば、この検出結果に基づいて回折格子等の角度または共振器長を制御することができる。例えば、ミラーを並進させる機構を付加すればよい。Littman 型 ECL ではミラーの回転によって選択波長を変化させるが、この回転に加え、ミラーを並進することで発振波長を選択波長と独立に微調整できる。したがって、選択波長に発振波長を追従させることが可能となる。

このように共振器長を制御する場合、平均的に離調が半波長だけ ($\lambda/2$) 変化することにモードホップが生じるため、可動範囲 d のミラー並進機構を用いれば、 $2d/\lambda$ 回までのモードホップを避けることができる。モードホップフリーで掃引できる波長範囲という見方をすれば、無制御の状態ですべての波長を掃引するごとにモードホップを生じる ECL に対して、 $\lambda/2 \times 2d/\lambda$ 程度までの波長範囲をモードホップフリーとすることができる。

以上のようにして閉ループ制御を施せば、従来問題であった機構部分の作製や初期調整に課せられる厳しい条件は緩和され、種々のドリフトに対しても最大 $2d/\lambda$ 倍までモードホップ耐性を向上させることができる。例えば、可動範囲が $6 \mu\text{m}$ のミラー並進機構を用いる場合、 $1.5 \mu\text{m}$ 帯において波長掃引時に 8 回程度までのモードホップを抑止することができる。また、波長を固定して使用する用途では、周囲温度の変動や光学系の経時変形等による $6 \mu\text{m}$ までの共振器長変化を吸収して、モードホップを抑止することができる。

なお、検出系も経時的に変形し、モードホップの抑止効果が低減することが予想されるが、その影響は制御による抑止効果よりも軽微であると考えられる。その理由は、検出系が回転軸のような可動部を含まないこと、モードホップは離調がモード間隔の数分の 1 以下であれば生じないため、閉ループ制御のロックポイントとなる離調は厳密に 0 である必要はなく許容範囲を有すること、通常、検出系の数 μm の変形はロック

ポイントとなる離調の変化に大幅に寄与しないこと等である。

4 実験系の構成

図 4 に実験系の構成を示した。ECL は通常の Littman 型 ECL にビームサンプラと電歪素子である PZT アクチュエータ (以下、PZT) を付加したものである。この ECL は発振波長 $1490 \sim 1550 \text{ nm}$ において縦単一モード発振し、LD 側ファイバ出力で約 1 mW が得られる。波長 1520 nm 付近では共振器長 75 mm 、モード間隔 2 GHz (16 pm) である。回折格子は格子定数 $0.91 \mu\text{m}$ (1100 本/mm) で入射角 80° に配置した。入射ビーム径は約 1 mm である。この回折系の分解帯域幅は約 20 GHz (160 pm) と見積もられている。

マイクロメータによって波長を変化させることができ、波長 1520 nm 付近でのマイクロメータの変位に対する波長変化率は $-12 \text{ pm}/\mu\text{m}$ である。ミラー回転軸は波長連続掃引に対する最適位置からずらしてあり、平均的に 160 pm だけ波長を掃引するごとにモードホップが生じる。

ミラーは回転とは独立に PZT によって $6 \mu\text{m}$ の範囲で並進できる。前述のように $6 \mu\text{m}$ の可動範囲によって、波長 1520 nm 付近で 8 回弱のモードホップを避けることができる。PZT の感度は $6 \mu\text{m}/100 \text{ V}$ 以上 (仕様値) である。制御ループ内で使用するため、PZT の変位がもつヒステリシスに対する考慮はしていない。ビームサンプラの反射率は 20% であり、約 1 mW のモニタ光を共振器外部に取り出している。

検出光学系にはレンズと 4 分割型受光器を使用している。レンズは焦点距離 50 mm であり、焦点面付近にスポット径

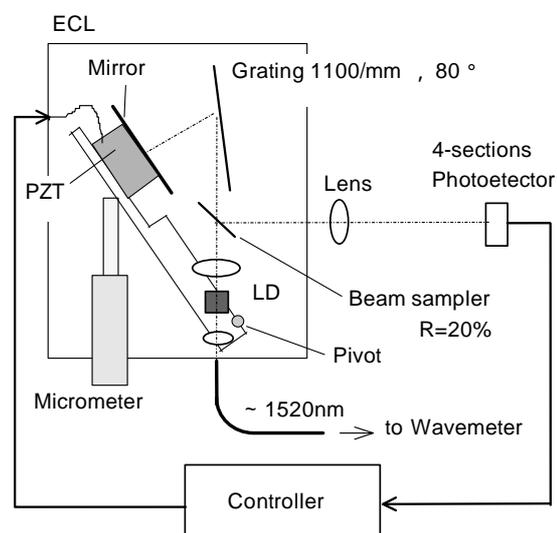


図 4 実験系の構成
Experimental setup

が約200 μm の縮小された遠視野像を結ぶ。このビームスポット位置に4分割型受光器を置き、表面反射光が共振器へ戻らないように光軸に対して5°斜めに配置している。4分割型受光器は受光面全体が直径2 mmで0.1 mm幅の十字形の溝で等分割されている。ここでは4分割型受光器を使用した。分割溝による光損失が少ない2分割型を使用することが望ましい。4分割型受光器からの受光信号は、左右各々について上下の信号を加算して、実質的に左右2分割の受光信号として利用する。制御器は左右の受光量から規格化された左右の受光量差NPDを算出し、このNPDが0に近づくような制御信号を発生してPZTに帰還する。制御帯域は10 Hzとした。以上の構成によって、発振波長が選択波長に追従するように共振器長を制御する。

なお、理想的には離調がない状態においてNPDが0となるような位置に左右の受光領域の分割線を配置すべきであるが、現実には、この「離調がない状態」を知ることはできない。そこで、まずNPDの原点を暫定的に定めて、波長を長波長側へ掃引して、モードホップが生じたときのNPDの値と、同じく短波長側での値の中央を新たなNPDの原点として定めている。つまり、最もモードホップが生じにくい状態でのNPDを0と定めている。モードホップは離調が大きくなったときに発生するものであるから、NPDの適切な原点には許容範囲があり、このような定め方で支障はない。また、図3(c)に示したようにNPDは離調に対して単調に変化し、離調が回折格子による分解帯域幅以下の範囲ではほぼ直線的に変化する。通常のLittman型ECLでは、モードホップは分解帯域幅の1/2以下の離調で生じるため、NPDによる離調の弁別曲線はほぼ直線とみなすことができる。したがって、この点からもNPD原点の理想位置からのずれが、モードホップ抑制制御に対して大きな影響を及ぼすことはない。

5 実験結果

モードホップ抑制制御の効果を図5に示す。ミラーを回転させるためのマイクロメータ(図4参照)を0.25 μm ステップで縮めていったときの波長を実線で示している。モードホップの存在をより明瞭にするため、1ステップごとの波長変化を黒丸で示している。ECL出力光の波長測定には波長再現性 $\pm 0.3 \text{ pm}$ の波長計を使用し、0.25 μm ずつマイクロメータ(繰り返し精度0.1 μm)を変位させて、5秒間隔で波長を測定したものである。

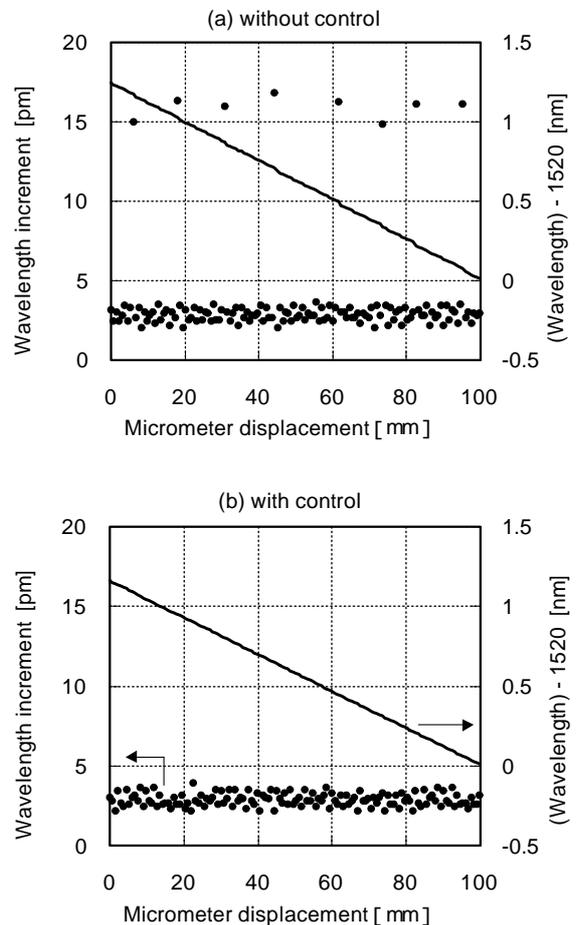


図5 ステップごとの波長増分と波長変化
Wavelength increment for each step of micrometer displacement (dots) and wavelength (line)

図5(a)は無制御時の結果である。波長のグラフに不連続箇所が現れている。この不連続の状況は、1ステップごとの波長変化を見ると一層明らかである。大部分はマイクロメータの1ステップの変位幅によって定まる約3 pm ずつの波長変化を示しているが、8箇所では16 pm 前後の値となっている。このECLのFSRは約16 pmであるから、これらの箇所は明らかにモードホップを示している。なお、図示した結果は10 nmの波長範囲で取得したデータの一部であり、図示していない部分でも同様のパターンを繰り返している。ここでは、制御時の結果と比較するために、図5(b)と同じ波長範囲の部分だけを図示している。

一方、図5(b)はモードホップ抑制制御時の結果である。同図(a)のような不連続箇所は見られない。このことはモードホップ抑制制御によって、1.2 nmの範囲でモードホップが生じていないことを示している。このECLは無制御時に平均して160 pmの波長変化ごとにモードホップを生じるか

ら、その7.5倍の波長範囲でモードホップを抑止できたことになる。このモードホップフリーの波長範囲はPZTの可動範囲によって制限されている。

次に、離調が正しく検出されていることを確認するため、離調と規格化された受光量差(NPD)の関係を考える。図1(c)に示したように発振波長は回折格子の選択波長付近でモードホップを繰り返しながら変化していく。図5(a)の結果は、このような状況を示している。逆に、図5(a)の波長のグラフ全体に対する回帰直線は、選択波長の推定値を表すものと見なすことができる。したがって、この回帰直線に対する測定波長の偏差は離調の推定値である。なお、この推定値は後述するヒステリシスのため、大きなバイアスを伴う。図5の波長データから算出した離調の推定値()とNPD()を図6に示した。図6(a)は無制御の場合である。両者の形状は良く一致しており、実測されたNPDが離調の有為な推定量となっていることがわかる。同図(b)は制御時の結果である。離調の推定値は $\pm 3\text{pm}$ の範囲にあり、常にモード

ホップが生じにくい状態に保持されていることがわかる。

なお、図6(a)でNPDの平均値が0でない原因は、共振モード間の交差飽和⁷⁾にあると考える。つまり、一旦、発振を開始したモードは他のモードの発振を抑制する効果が働くことで、発振波長がその増減に対してヒステリシスを有するためである。実際、図6(a)は波長を増加させながら測定した例であるが、波長を減少させた場合のNPDの平均値は-0.1程度であった。このようなLDのもつヒステリシスは、それ自体にモードホップを抑止する効果があるため、モードホップ抑止制御をより容易にするように働くものである。

6 むすび

Littman型の外部共振器半導体レーザについて、帰還制御によるモードホップ抑止法を提案、実証した。結果を要約すると以下ようになる。

(1) モードホップの原因は発振波長と回折格子による選択波長との差(離調)にあり、回折角の変化として検出可能である。

(2) 離調検出法として提案した分割型受光方式による帰還制御でモードホップを十分に抑止できる。

(3) 実際にミラー並進用のPZTを用いたLittman型ECLに対して、無制御時の7倍以上のモードホップフリー波長帯域幅を確認できた。

参考文献

- 1) For example, M.W. Fleming and A. Mooradian : IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-17, No. 1, 44-59, 1981
- 2) M.G. Littman and H.J. Metcalf, : "Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander," Appl. Optics, vol. 17, No. 14, 2224-2227, 1978
- 3) K.C. Harvey and C.J. Myatt, : "External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating," Optics Lett., vol. 16, No. 12, 910-913, 1991
- 4) H. Lefevre (Photonetics S.A.), US Patent No. 5594744, 1995
- 5) M. de Labachellerie, et al. : "Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers," Appl. Optics, vol. 32, No. 3, 269-274, 1993
- 6) F. Favre, et al. : "External-cavity semiconductor laser with 15nm continuous tuning range," Electron. Lett., vol. 22, 795-796, 1986
- 7) M. Yamada : "Transverse and longitudinal mode control in semiconductor lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-19, No. 9, 1365-1380, 1983

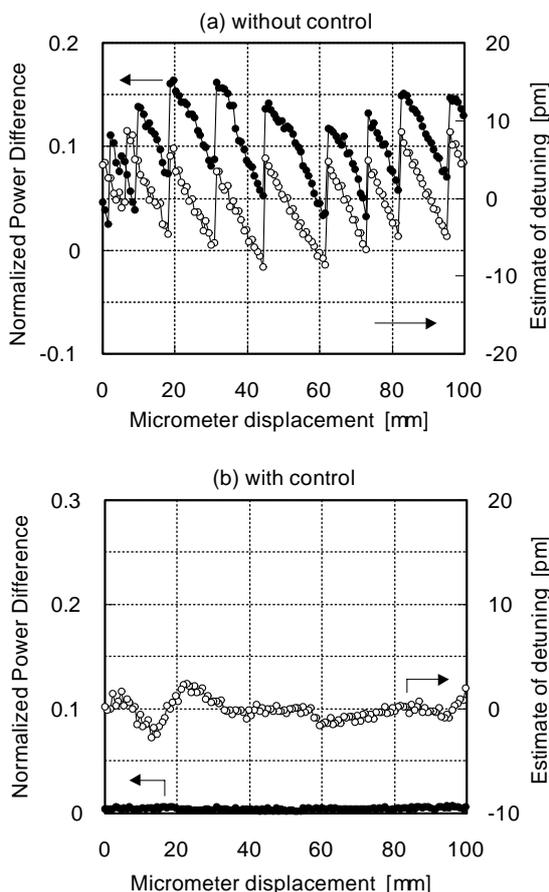


図6 規格化受光量差の測定値()と離調の推定値()
Measured normalized power difference () and
estimate of detuning ()