

浮上スライダ方式による複合共振半導体レーザーの波長解析

増田陽一郎*・浮田 宏生**

*立命館大学大学院理工学研究科 〒525-8577 草津市野路東 1-1-1

**立命館大学理工学部 〒525-8577 草津市野路東 1-1-1

An Experimental Analysis of an Extremely Short-External-Cavity Laser Diode Wavelength Using a Flying Slider

Yoichiro MASUDA* and Hiroo UKITA**

*Graduate School of Ritsumeikan University, 1-1-1, Noji-higashi, Kusatsu 525-8577

**Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 1-1-1, Noji-higashi, Kusatsu 525-8577

A wavelength measuring method, which uses a laser diode (LD) attached on a flying slider and a mirror (semi-transparent optical disk) for an extremely short-external-cavity, is proposed. Not only the wavelength but also the side-mode suppression ratio, the spectrum line width and the mode interval are experimentally investigated, with the external-cavity length, the reflectivity of the LD facet, and the drive current as parameters. As a result, a strong light feedback (short external-cavity length, low LD facet reflectivity facing a mirror and high mirror reflectivity) is necessary for obtaining a wide range wavelength tuning. We achieved a range of 23 nm by changing the external-cavity length for a 1.3 μm wavelength multi-quantum-well (MQW) laser diode with antireflection coating on the facet facing the external mirror.

1. はじめに

外部共振半導体レーザーが、反射率検出¹⁾, 変位検出²⁾, 波長可変デバイス³⁻⁵⁾として注目されている。

従来の外部共振型波長可変 LD (laser diode) は、外部ミラーからの反射光をレンズで集め半導体レーザーに帰還させていた。また外部ミラーを LD に直接近接させる場合には圧電効果や静電力が利用されていた⁶⁾。しかし、この方法では外部ミラーがレーザー端面と完全に平行にならないので、極限まで外部ミラーを近づけられない。このため外部ミラーからの戻り光量が少なく波長可変範囲が小さいという欠点があった。

一方、最近マイクロマシニングによる近接ミラーの集積例が報告されるようになった^{2,3)}。しかし、半導体レーザーと外部ミラーが一体化している場合、レーザー端面反射率や外部ミラー反射率を変えるのが難しいので、波長可変のメカニズムを解明するための実験には不都合であった。

本論文では、まず外部ミラーを数 μm まで近接させた外部共振 LD の波長測定法を提案する。次に本測定法により

実験解明した外部共振型 LD の発振特性について波長変化を中心に述べる。具体的には戻り光の位相 (外部共振器長), 戻り光の強度および LD 駆動電流による波長変化やサイドモード抑圧比, スペクトル幅, モード間隔の変化について述べる。

2. 浮上型 LD による波長変化測定法

2.1 測定装置の概略

Fig. 1 は実験装置の概略図である。装置は、スライダの後端面に配置した光検出器付き半導体レーザー (LD-PD)⁷⁾, 光ディスク (外部ミラー), 光スベアナなどから構成されている。ディスクが回転するときに生じる空気流によりスライダは数 μm で浮上する (浮上量 Lex_0)。このとき外部共振器長 Lex は、浮上量 Lex_0 とスライダ端面とレーザー端面の取り付け段差 Lex_1 の和になる。スライダはディスクの回転による空気抵抗によって浮上しているため、LD 端面とディスク (外部ミラー) 端面は常に平行に保たれている。

LD は MQW (multi-quantum-well) 構造で、発振波長 1.3 μm , 共振器長 300 μm である。また、集積された PD

E-mail: ukita@se.ritsumei.ac.jp

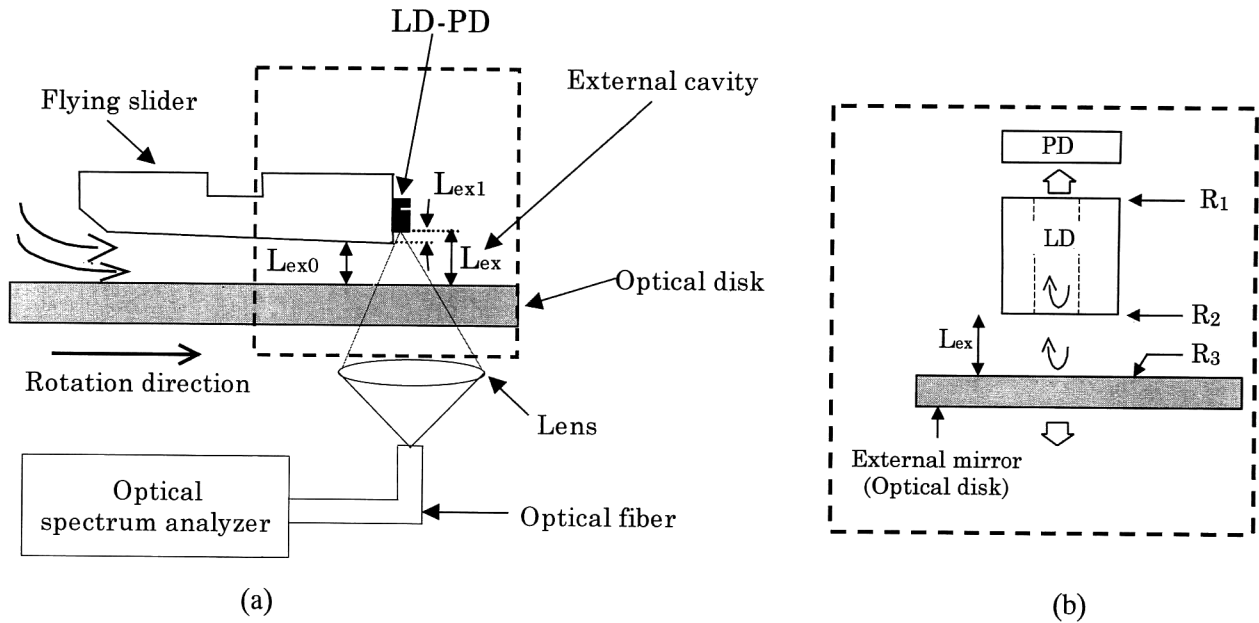


Fig. 1. (a) Proposed setup for measurement of the wavelength tuning based on extremely short-external-cavity length. A laser diode (LD) attached to an air-bearing slider flies by air resistance due to disk rotation. (b) Detailed representation of the short external cavity LD.

(photo diode) の受光感度は 0.1 mA/mV である。LD の PD 側端面の反射率を $R_1 (=0.32)$ 、ミラー (ディスク) 側端面の反射率を R_2 、ディスクの反射率を R_3 とする。レーザーのミラー側端面には反射防止膜が付与され⁸⁾、その反射率 $R_2=0.01$ である⁹⁾。ディスクからの反射光は LD に帰還し、複合共振作用を起こす。ディスク透過光はレンズで集光され、光ファイバーで光スペアナに送られ発振波長 (スペクトル) が観測される。

本実験系は、LD と外部ミラーのカップリングをスライダと光ディスクの回転によって実現しているため、

- ① 外部共振器長を数 μm まで近接でき、かつ数 nm の精度で変化させることができる。
- ② 外部ミラーや LD 端面の反射率を容易に変化させることができる。

このため、各種条件下での LD の発振特性を総合的に実験解析できるという特徴をもつ^{10,11)}。

2.2 外部共振器長 (浮上量) の変化

LD 端面からの反射光とディスクからの反射光とが干渉するため LD 出力光は外部共振器長 (浮上量) により $\lambda/2$ を周期として変化する。Fig. 2(a) はディスク回転数と複合共振出力の実測値である。浮上量 L_{ex0} とディスクの回転速度 V には式 (1) の関係があるので、同図 (b) を用いて以下のように比例定数 α を求めることができる。

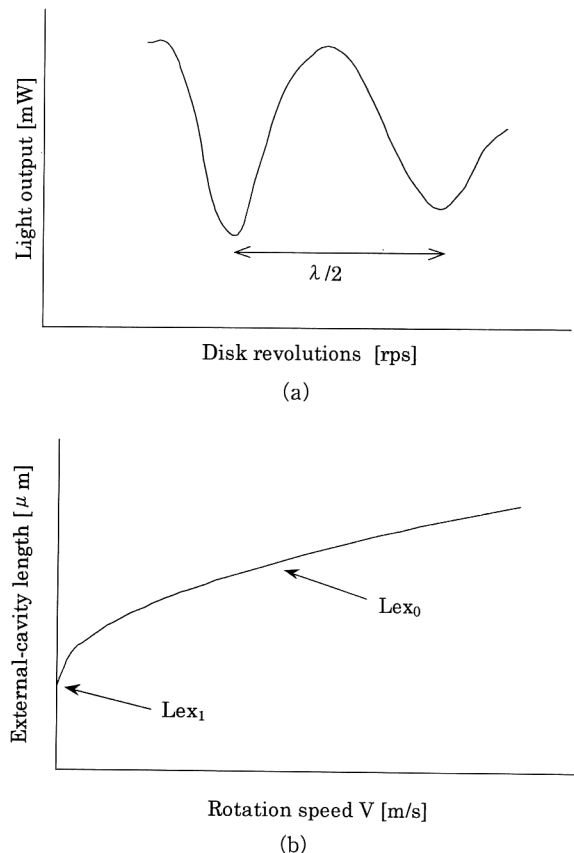


Fig. 2. A method of flying height measurement for the short external-cavity laser LD. (a) Light output as a function of optical disk revolution, (b) external-cavity length as a function of V .

$$Lex_0 = \alpha \sqrt{V} \quad (1)$$

Fig. 2(a)の複合共振出力波形の谷2点と回転速度がゼロのとき、つまり浮上量がゼロの点(合計3点)を、横軸に \sqrt{V} 、縦軸に浮上量 Lex_0 でプロットする。このとき、測定点2点の間隔を $\lambda/2$ とし、原点と直線で結び、その勾配から α を求める。同図(b)にこのようにして得られた回転速度と外部共振器長の関係を示す。なお、 Lex_1 はスライダーとLD端面の取り付け段差である。

3. LD特性の外部共振器長(戻り光位相)依存性

3.1 発振特性

Fig. 3は、本測定に用いた外部共振型LDの発振特性で

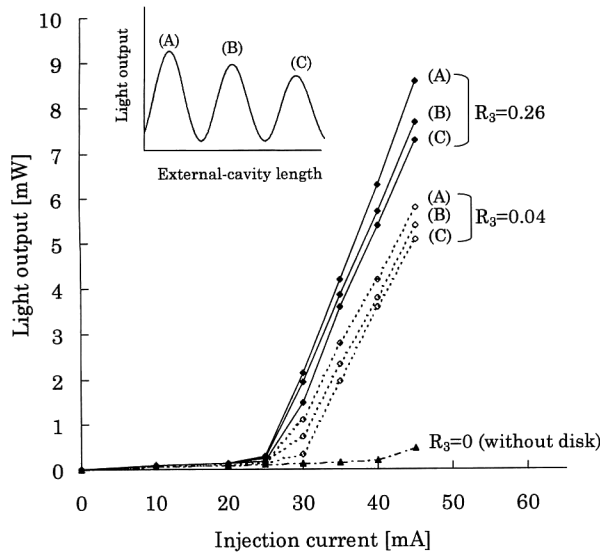


Fig. 3. IL characteristics with an external mirror (optical disk) at the light-output maxima (A), (B), (C) as parameters, where $R_1 = 0.32$ and $R_2 = 0.01$.

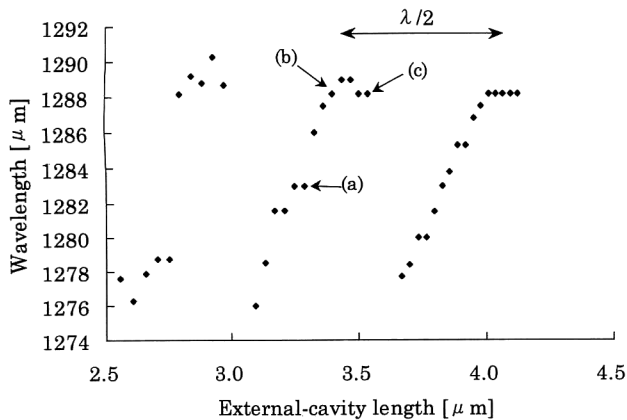


Fig. 4. Dependence of wavelength on external-cavity length as a parameter, where drive current $I/I_{th} = 1.4$, reflectivity $R_1 = 0.32$, $R_2 = 0.01$, and $R_3 = 0.26$.

ある。外部ミラー(光ディスク)の反射率が $R_3 = 0.26$, 0.04 , 0 の場合の複合共振出力波形(図中にモデル的に表示)において、それぞれの3つの極大に対応する外部共振器長(A), (B), (C)での光出力電流特性(IL特性)を表している。

発振閾値は R_3 が大きいほど、 Lex が小さいほど低下していることがわかる。ここで、LDの閾値をB点での値で定義する。 $R_3 = 0.26$ の場合は $I_{th} = 25$ mA, $R_3 = 0.04$ の場合は $I_{th} = 28$ mAとなる。なお、外部ミラーがない $R_3 = 0$ のときは、LD単体のIL特性となる。

3.2 波長の外部共振器長依存性

Fig. 4は外部ミラーの反射率が $R_3 = 0.26$ の場合の発振

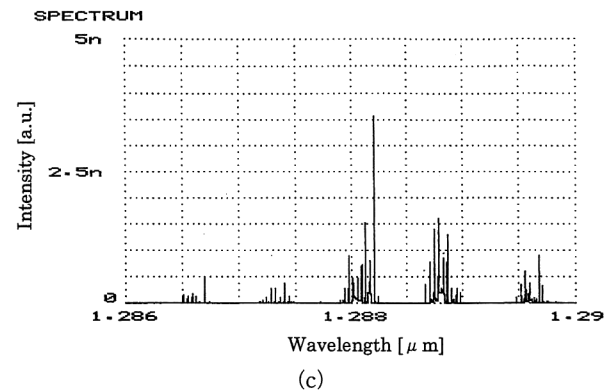
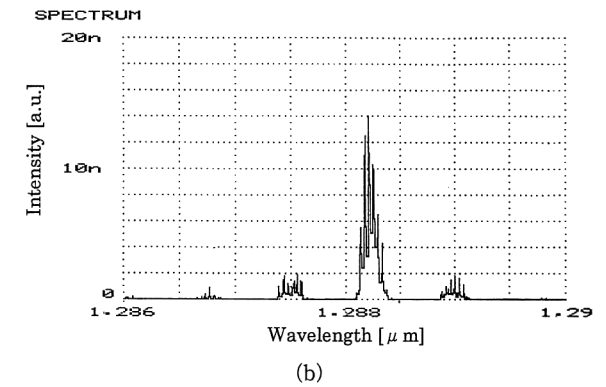
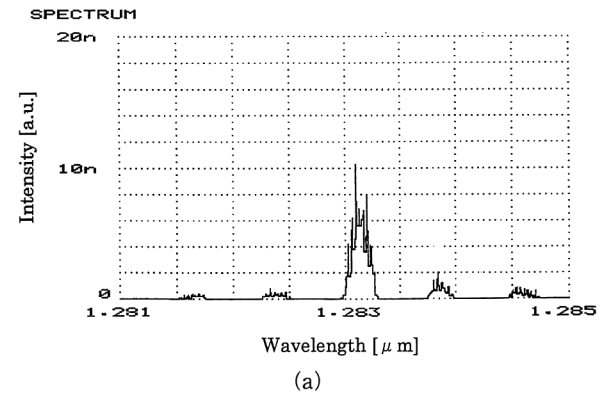


Fig. 5. Spectra at (a), (b), and (c) in Fig. 4.

波長の外部共振器長依存性である。駆動電流は $I/I_{th}=1.4$ である。波長は、外部共振器長に対して $\lambda/2$ の周期で変化する。外部共振器長が長くなると戻り光が減少するため波長変化幅も減少している。

図中の(a), (b), (c)における発振スペクトルを Fig. 5 に示す。スペクトル幅が $0.1\sim 0.2$ nm と広がっているのは、LD のミラー(ディスク)側端面に反射防止膜を付与したので多モード発振しているためと思われる。

3.3 波長変化幅の駆動電流依存性

駆動電流 I/I_{th} と波長の変化幅の関係を Fig. 6 に示す。変化幅は外部共振器長による波長変化の極大値と極小値の差である。パラメータは戻り光強度で、外部共振器ミラーの反射率が $R_3=0.26$ と 0.04 のときの複合共振出力の極大値(合位相)に対応する(A), (B), (C) の各点での波長変化幅を表している。

同図から波長変化幅は、駆動電流により増加するが $I/I_{th}=1.4$ 付近で飽和傾向にあることがわかる。したがって、波長可変レーザーとして動作させる場合の駆動電流は、 $I/I_{th}>1.4$ とする必要がある。

4. LD 特性の戻り光強度依存性

複合共振レーザーの動作は、外部共振器長 L_{ex} 、外部ミラーの反射率 R_3 の効果を式(2) で表す実効反射率 R_2^{eff} を導入することにより、単独のレーザーとして解析できる¹²⁾。

$$R_2^{eff} = R_2 [1 + (1 - R_2)^3 R_3 \eta / R_2] \quad (2)$$

ここで η は結合係数(外部ミラーで反射され、LD 出射口へ帰還する光の割合)であり、外部共振器長に対して、Fig. 7 に示すように指数関数的に減少する¹³⁾。ここでは LD 出射端面での楕円光ビームの径をそれぞれ $2.54 \mu\text{m}$, 1.38

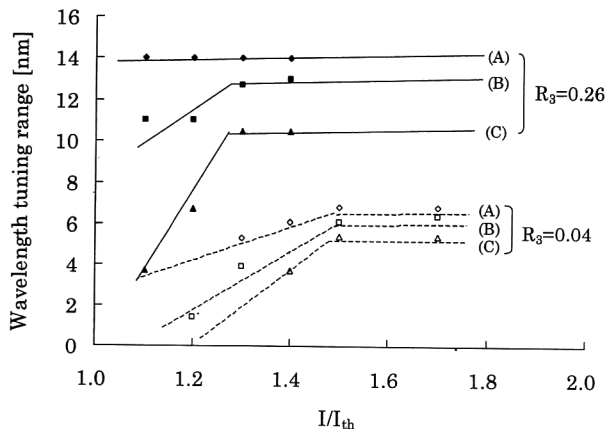


Fig. 6. Dependence of wavelength tuning range for $R_3=0.26$ and 0.04 at light-output maxima (A), (B), and (C) on drive current I/I_{th} as a parameter.

μm (ファーフールドでの放射角 10° , 25° に対応)として計算している。

以下、式(2)によって複合共振出力の極大(戻り光合位相)時の外部共振器長における R_2^{eff} を算出し、それに対する LD の特性変化について考察する。なお、 $R_3=0.26$ と 0.04 の場合をプロットしたため、今回の解析範囲は $0.02 < R_2^{eff} < 0.1$ となった。Fig. 8 は本測定のスเปクトルの代表例で、下記のサイドモード抑圧比やスペクトル幅、モード間隔を定義している。

4.1 波長変化幅特性

Fig. 9(a) は、 $\lambda/2$ 周期で変化する波長の変化幅(チューニングレンジ)と実効反射率の関係である。波長変化幅は実効反射率 R_2^{eff} に対してほぼ線形に増加していることがわかる。したがって波長変化幅を増大させるためには R_2^{eff} を大きくする、つまり①外部共振器長を短くして η を大きくする、②LDの外部共振器長側端面の反射率 R_2 を低くする、③外部ミラーの反射率 R_3 を大きくすることが有効であることが判明した。

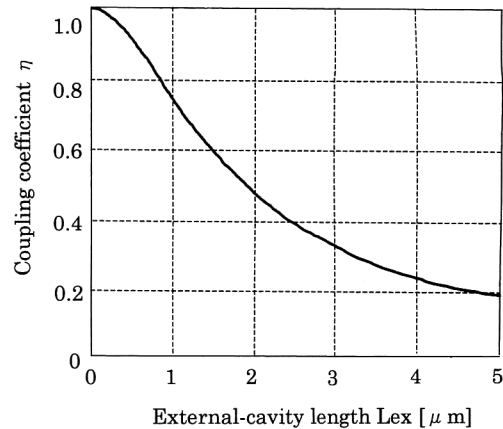


Fig. 7. Dependence of coupling coefficient η on external-cavity length L_{ex} .

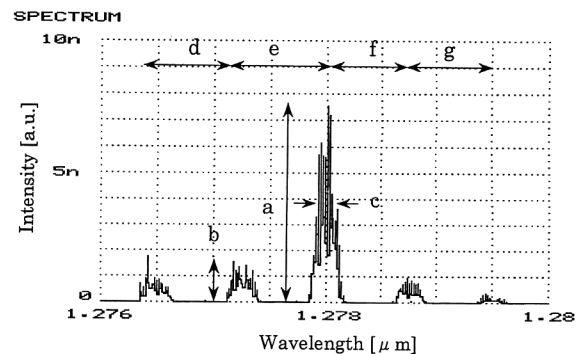


Fig. 8. A definition of side-mode suppression ratio ($10 \log [a/b]$), spectrum line width (full width half-maximum c) and mode interval (average of $d, e, f,$ and g).

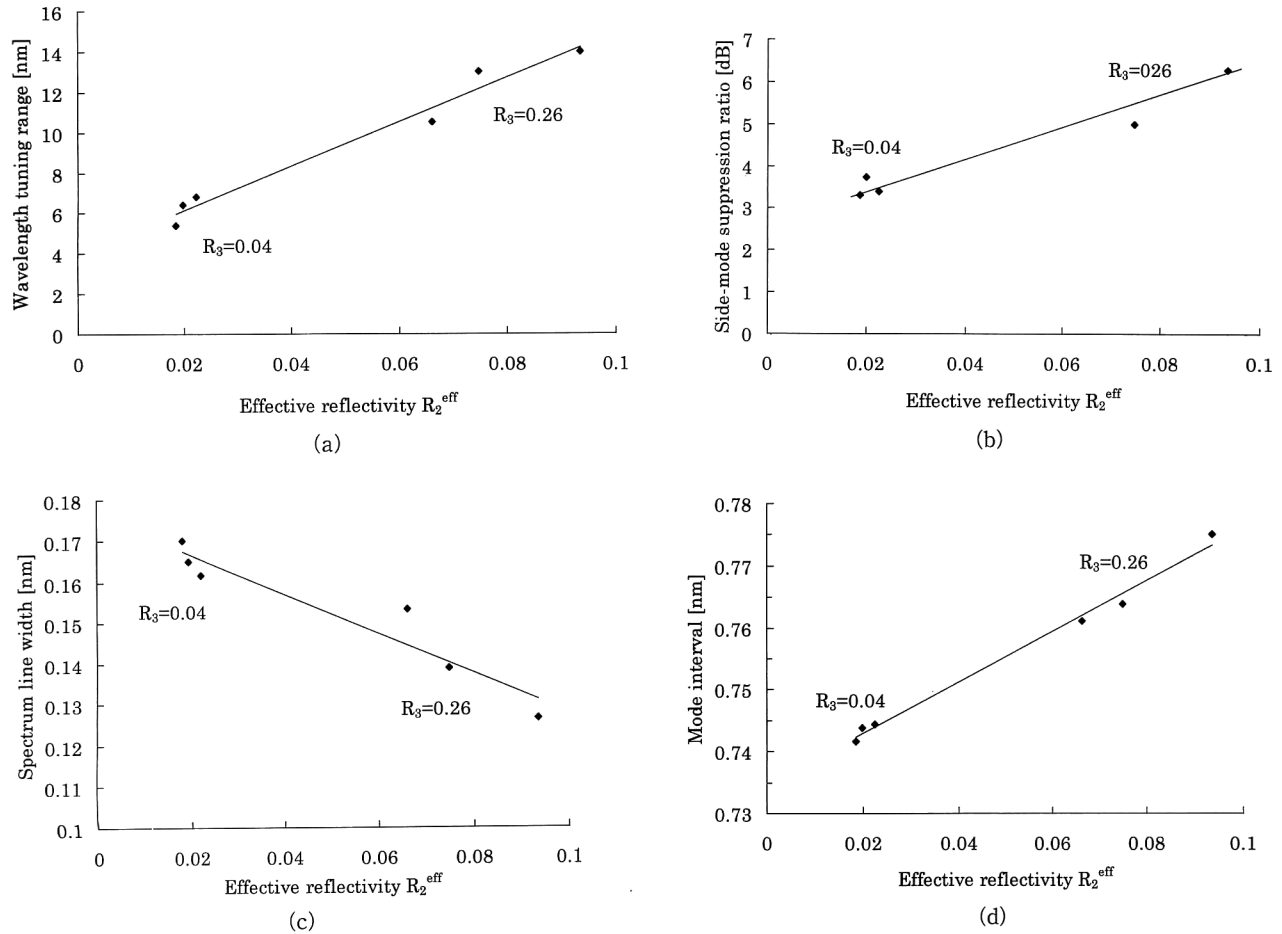


Fig. 9. Dependence of LD characteristics at light-output maxima on the effective reflectivity R_2^{eff} . (a) Wavelength tuning range, (b) side-mode suppression ratio, (c) spectrum line width, (d) mode interval.

4.2 サイドモード抑圧比特性

サイドモード抑圧比をスペクトルの最も強く発振しているモード a と 2 番目に強く発振しているモード b の強度比から式 (3) に示すように定義する (Fig. 8).

$$\text{Side-mode suppression ratio [dB]} = 10 \log_{10}(a/b) \quad (3)$$

Fig. 9(b) は、サイドモード抑圧比の実効反射率依存性である。サイドモード抑圧比は実効反射率に対して線形に増加している。

4.3 スペクトル幅特性

Fig. 9(c) は、スペクトル幅の実効反射率依存性である。スペクトル幅をスペクトルの最も強く発振しているモードの半値全幅と定義する (Fig. 8 中の c)。スペクトル幅は、実効反射率に対して線形に減少している。

4.4 モード間隔特性

モード間隔をスペクトルの各モード間隔の平均と定義する (Fig. 8 中の $d \sim g$ の平均)。Fig. 9(d) は、モード間隔の実効反射率依存性である。モード間隔が戻り光強度によ

って線形に増加していることから、LD の屈折率が変化していると予想できる。

5. む す び

本論文では、外部共振器長がきわめて短い (数 μm) 場合の半導体レーザー (LD) の波長測定法を提案し、外部共振器長、外部ミラーや LD 端面の反射率、LD 駆動電流などの共振条件を変化させた場合の LD の発振メカニズムを総合的に実験解析した。

その結果、発振波長は外部共振器長に対し $\lambda/2$ を周期として変化し、波長変化幅が大きく、動作が安定な波長可変半導体レーザーとしては、

- ① 強光帰還 (低い LD 端面反射率, 短い外部共振器長, 高い外部ミラー反射率)
- ② $I/I_{\text{th}} \geq 1.4$ の LD 駆動電流 (I_{th} : 戻り光が合位相の場合の発振閾値)

などを満足する必要があることが判明した。

文 献

- 1) H. Ukita, Y. Uenishi and Y. Katagiri: "Applications of an externally short strong-feedback configuration of an external-cavity laser diode system fabricated with GaAs-based integration technology," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 5557-5563.
- 2) 浮田宏生, 田中秀尚, 上西祐司, 板生 清: "GaAs マイクロマシニングによるレーザー集積化振動子の諸特性", *精密工学会誌*, **59** (1993) 1560-1565.
- 3) M. C. Larson and J. S. Harris, Jr.: "Wide and continuous wavelength tuning in a vertical-cavity surface-emitting laser using a micromachined deformable-membrane mirror," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, **7** (1995) 382-384.
- 4) Y. Uenishi, M. Tsugai and M. Mehregany: "Hybrid-integrated laser-diode micro-external mirror fabricated by (110) silicon micromachining," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 965-966.
- 5) 田邊裕一郎, 浮田宏生: "3層バイモルフ微小梁の熱変位拡大のための一設計", *電気学会マイクロマシニング研究会資料*, **MM-98-5** (1998) 23-28.
- 6) P. A. Rupercht and J. R. Brandenberger: "Enhancing diode laser tuning with a short external cavity," *Opt. Commun.*, **93** (1992) 82-86.
- 7) 植木峰雄, 山本瑗夫, 大石 護, 上西祐二, 中野純一, 都築信頼: "モニタフォトダイオード付きレーザーの特性(I)", *電子情報通信学会総合全国大会講演論文集*, C-192 (1989) pp. 4-132.
- 8) Y. Katagiri and H. Ukita: "Ion beam sputtered $(\text{SiO}_2)_x(\text{Si}_3\text{N}_4)_{1-x}$ antireflection coatings on laser diode facet produced using $\text{O}_2\text{-N}_2$ discharges," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 5074-5079.
- 9) H. Ukita, K. Mise and Y. Katagiri: "Simple measurement of the reflectivity of antireflection-coated laser diode facets," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27** (1998) 1128-1130.
- 10) 増田陽一郎, 浮田宏生: "近接外部共振半導体レーザーの波長変化の測定", *電気関係学会関西支部連合大会講演論文集*, G10-2 (1996) p. G269.
- 11) 増田陽一郎, 浮田宏生: "近接型LDの波長と戻り光の位相及び強度の関係", *電子情報通信学会総合大会講演論文集*, C-4-26 (1997) p. 398.
- 12) W. Jianglin, Z. Hanyi, W. Qun and Z. Bingkun: "Single-mode characteristics of short coupled-cavity semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23** (1987) 1005-1009.
- 13) 浮田宏生: "光スイッチング作用を利用した超小形光ヘッド", *光学*, **19** (1990) 226-231.