

外部共振器型波長可変ダイオードレーザー・システムの構築

竹島 真仁*, 辰巳 晋一郎*, 富岡 明宏**§

Construction of an External-Cavity Tunable Diode Laser System

Masato TAKESHIMA*, Shin'ichiro TATSUMI*, Akihiro TOMIOKA*,§

Abstract

In order to discriminate optical responses of individual local structure in low dimensional quantum semiconductor structure or molecular nanostructures, selective optical excitation is necessary together with Near Field optical microscopy. Narrow linewidth tunable laser is useful for tuning to each quantum structure under investigation. Here we present a custom-made tunable diode laser system equipped with Littman-type external-cavity. Emission wavelength was proved to be varied by rotation of the steering mirror that filters out diffraction from a grating. Temperature stabilization was necessary to keep the external-cavity resonance while varying the wavelength.

1. はじめに

半導体量子構造の局所分光や局在準位の同定を近接場測定によって行う場合、近接場光学顕微鏡の空間分解能（ほぼ光プローブの先端形状¹⁾で決まる）だけでは不十分であり、個々の局所構造や局在準位を選択的に光励起することが有効である²⁾。励起光源の波長を変えて個々の局所構造にチューンし、これを共鳴的に光励起することで、近接場顕微鏡の空間分解能を越えて詳細な知見が得られると期待される。この目的のためには、1) 発光の不均一幅の中に埋没している個々の均一幅発光を分離できる程度に発振線幅が細いこと、2) 発光の不均一幅の中で発振波長を変えられること、3) 時間的に（発振線幅と同程度の精度で）発振波長が安定していること、が励起光源に要求される。

このような要求を満たす単一縦モードのレーザー光源として、本研究で構築する外部共振器型ダイオードレーザー・システムは比較的安価で、ユーザーがカスタマイズできるという長所をもつ。可変できる波長範囲は数 nm 程度に限定されるが、より広い波長範囲を必要とする場合にはレーザーダイオード（LD）素子を差し替えることにより対応可能である。または LD コントローラーは共通に 1 台だけ用意し、外部共振器付き LD マウントを複数作製しておくこともできる。

LD の発振線幅と、LD 素子中に形成されたダブルヘテロ接合量子構造が本来もつ光学ゲインの関係を図 1 に示す。活性層の光学ゲインは実現されている発振線幅よりもバンド幅が広い（数 nm 程度）。発振線幅は素子の共振器構造により決定されるからである。LD 素子作製時に、素子両端面で劈開され、裏面には完全反射コーティングが、表面には適当な反射率のコーティ

* 大阪電気通信大学 工学部 電子材料工学科

2003 年 4 月 21 日受理

§ 大阪電気通信大学 学術フロンティア推進センター

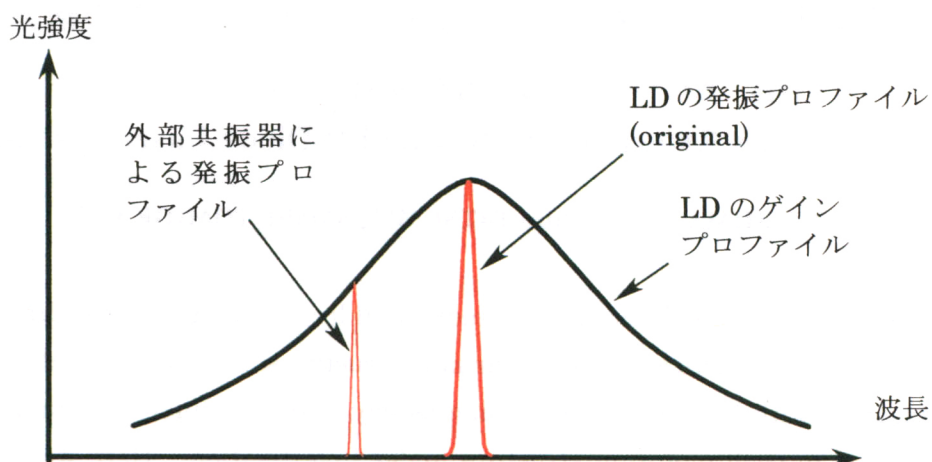


図1 発振波長選択の概念図

ングが施され*, 共振器構造が形成される. この共振器構造により共振器内には特定の波長の定在波が選択的に立ち, 共振器内に配置された活性層はこの波長でレーザー発振する. このようなメカニズムで光学ゲインよりもはるかに細い発振線幅を実現している.

同一規格で製造されたLDでもこの共振器長のバラツキなどにより発振ピーク波長は個々に異なる. 従って別個外部共振器を構成して, LD

(a)



(b)

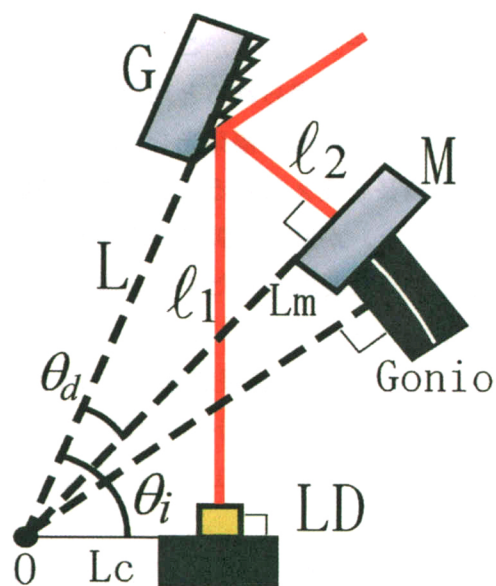


図2 外部共振器の配置

LD: レーザーダイオード, AL: 非球面レンズ,
T: サーミスタ, M: ミラー, Gonio: ゴニオステージ,
G: 回折格子, H: シートヒーター,
F: 光ファイバーコネクタ

*レーザーダイオード表面のコーティングの反射率は (製品では未公開仕様の場合が多いが), 取出しビーム強度を確保するためあまり高く設定されていない.

素子表面での反射光以上の強度の光を活性層に戻せば、外部共振器による発振が favor されると考えて良からう。このようにして外部共振器での発振を利用することにより、光学ゲインバンド内では違った波長で発振させることが可能となる訳である。本研究では可視光領域において波長可変機能をもつ Littman 型外部共振器³⁾を構成し、その線幅と可変波長を追跡することに成功したので報告する。

2. 外部共振器の構成

外部共振器の配置を図2に示す。図2(a)は実体図で、レーザーダイオードLDから出射されるレーザービーム#を非球面レンズALでコリメートし、回折格子Gで回折した光をミラーMで180°反射させ、元の光路に戻す。同じ回折条件を満たすので、反射光はLDに戻るように回折する。こうしてLD・G・Mの三者で外部共振器が構成され、新たな共振条件ができる。この反射光がLD素子表面での反射光より強いことが、外部共振器でレーザー発振が実現するための条件である。

発振波長をモニタするため、回折格子Gからの鏡面反射（0次の回折光）を光ファイバーに導いた。G・Mを取付けているミラーマウントのティルトねじを回して、反射光がLD中央に戻るよう調整し、続いて発振波長をスペクトロメータでモニタしながら、発振波長が変化するようなティルトねじの位置を探した。回折格子Gへの入射角（Gの法線とのなす角）を小さくすると鏡面反射は弱くなるので、回折光が強くなり上記発振条件を満たし易くなる。だが入射角を色々変えてみると、ここで用いているブレード回折格子の回折効率が高いので、図2(a)に示したように入射角が45°より大きくても良好なレーザー発振が達成でき、発振波長が変化することが観測された。むしろ利用できる取出し光（Gからの鏡面反射光）強度を大きくとるため、入射角はなるべく大きくして安定発振するよう調整した。使用したLDは名目635nm 15mW（Blue Sky Research Inc., PS010）の市販品で、表面反射コーティングも標準である。

さらに取出し光強度を大きくするため、回折格子のブレード波長が635nmから離れたものを故意に使用した。ここでは短波長側にずらし⁴⁾、ブレード波長400nm、溝密度1200ℓ/mmのレプリカ回折格子を使用した。

次に、採用したLittman型配置について述べる。図2(b)に示すように、回折格子表面の延長線LとLD背面の延長線Lcとの交点をOとすると、ミラー表面の延長線Lmが常に点Oを通るように点Oを中心としてミラーを回転させる。この配置ではミラーによって反射（選択）される回折光の回折角 θ_d は延長線LとLmのなす角に一致し、ミラーの回転とともに変化するので、回折角の選択を介して外部共振器の発振波長を選択することが可能となる。この配置のメリットは、ミラーを回転させた際にその回転角で選択された波長において、外部共振器の共振条件が常に満たされることである。

LD活性層は幅よりも厚さはるかに小さいため、出射ビームは楕円形状で、活性層厚さ方向により広がっている。従って光ファイバーに効率よく結合するためには、直交する2箇の円筒レンズまたは2箇のプリズムを組合せてビーム断面を円形に変換する必要がある。本研究では、LD素子表面にμm程度の直径をもつ微小円筒レンズを配置し、ビーム拡がり角が等方的になるものを利用した。従って1枚の非球面レンズでコリメートできる。

この Littman 型配置での回折条件と共振条件の整合性³⁾について議論する. 図 3 に示すように, 溝間隔 d のブレード回折格子の対応する点 P, Q (溝間隔 d だけずれた 2 点, ここでは簡単のため頂点を示した) に入射角 θ_i で入射し, 回折角 θ_d で回折する光路の間の光路差は,

$$\Delta\ell_1 + \Delta\ell_2 = d \sin \theta_i + d \sin \theta_d \quad (1)$$

となり, これらの光路をとる光が強めあう条件は, n を任意の整数として

$$d(\sin \theta_i + \sin \theta_d) = n\lambda \quad (2)$$

となることである. 他方外部共振器の共振条件は, 図 2 (b)において共振器長

$$\ell_1 + \ell_2 = L \sin \theta_i + L \sin \theta_d \quad (3)$$

が半波長の整数倍となることとして

$$L(\sin \theta_i + \sin \theta_d) = n' \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

と書ける.

ここで(3), (4)式の左辺が相似であることに着目すると, (4)は

$$L = \frac{n'}{2n} d \quad (5)$$

と変形できる. 則ち, (2)式を満足する回折角 θ_d がある入射角 θ_i と回折次数 $-n$ に対して見つかったとき, L が $d/2n$ の整数倍になるよう調整すれば共振条件も満足される. 具体的手順としては,

- LD に対する回折格子の向きと, 回折格子・ミラーの相対位置を調整して回折光の反射が LD に戻るよう調整する,
- 回折格子の位置をわずかに平行移動し, 共振条件を探す, となろう.

重要なことは(5)式は波長に依存しないことである. つまり一旦回折条件と共振条件をともに満たす配置が見つかったら, ミラーを移動して回折角を変化させても共振条件は常に満足される. 波長を変化させても共振条件には影響しない. さらに都合いいことに, 図 2 (b)において点 O を中心としてミラーを回転させるので, ミラーは常に回折光と直交している. このように共振条件を満たしたまま波長可変できるという意味で, 図 2 (b)の配置は絶妙といえる³⁾.

ここで(2)式の左辺が+にな

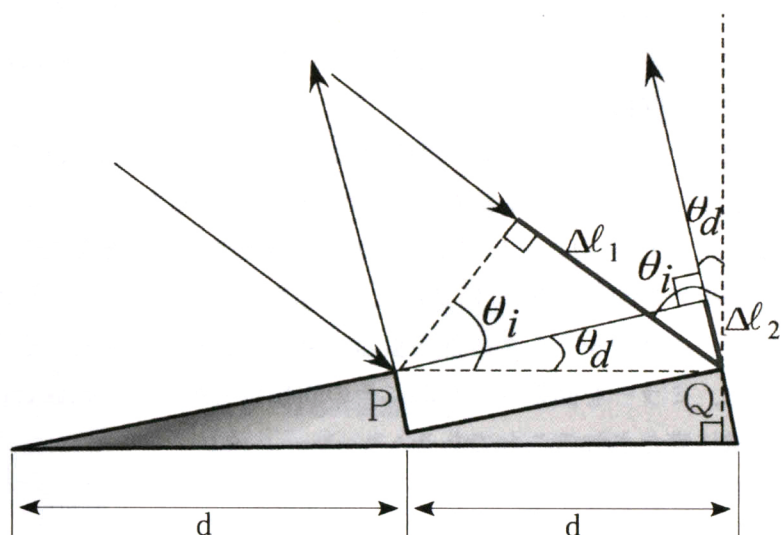


図 3 回折格子からの回折光が強め合う条件

っていることに注意．これは回折次数が負の回折で，しかも回折格子の法線方向に関して入射光と同じ側（後方）に回折する光を利用していることを物語っている．(2)式の左辺が+でなければ上述の自動トラッキングは実現できないので，この点は本質的である．実体図図 2 (a)では-2 次の回折光である．

3. 外部共振器の温度安定化

前節 a)，b) の手順で共振条件を満足するような回折格子・ミラー位置は見つかったが，発振波長は不安定で，ゴニオメータを指で回そうと手を近づけただけで発振波長はふらついた．この原因が体温による金属部分の伸長（共振器長の伸長）にあることが判明した．共振器長を一定に保つため温度コントロール回路⁴⁾を自作し，ベースプレート（熱膨張の少ないステンレスで再設計）に温度センサとシートヒーターを取付けてこの部分の温度を長時間一定に保つように改良した．

図 4 に温度コントロール回路の回路図を示す．温度センサ（サーミスタ）と温度設定用の抵抗値をブリッジ回路に組み，それらの電位降下の差をオペアンプで受けてパワーFET をスイッチングし，ヒーターを駆動するという構成である．1) ブリッジ回路を動作させる直流電圧は，ドリフトを抑制するため電圧リファレンス IC で完全に安定化させる，2) 差動信号のドリフト除去のため，時定数 30s よりも低周波の信号をカットするハイパスフィルタを初段オペアンプに入れる，3) ベースプレートの大熱容量による熱応答の遅さを考慮して時定数 3.3ms の積分回路を入れて PI 制御とする，などが特徴である．

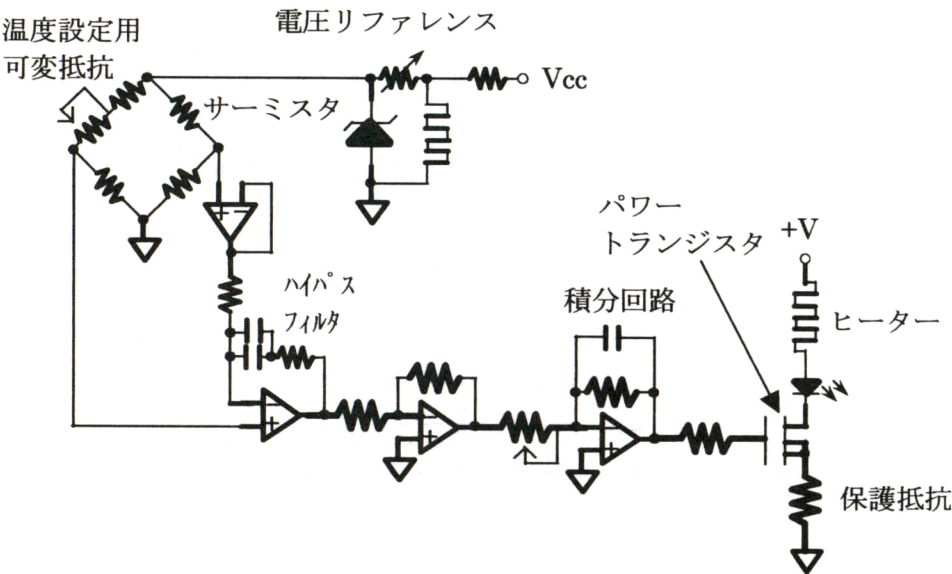


図 4 温度コントロール回路

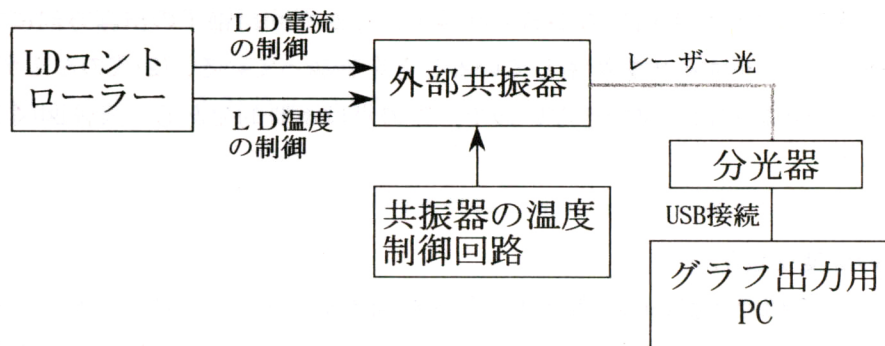


図5 システム構成

4. 外部共振器の共振の維持と波長選択性

前節の温度コントロール回路を用いてベースプレートを室温より僅かに高い温度に維持しながら外部共振器全体を断熱のため箱で覆った。この改良の効果を確かめるため、図5のシステム構成に従い、回折格子からの鏡面反射を取出し光としてマルチモード光ファイバーでスペクトロメータに導き、発振プロファイルを追跡したところ、時間的にも格段の安定が得られた。この安定性によって始めて、ゴニオメータを回しても外部共振器の共振が維持できるようゴニオメータの回転中心を位置調整することが可能になった。

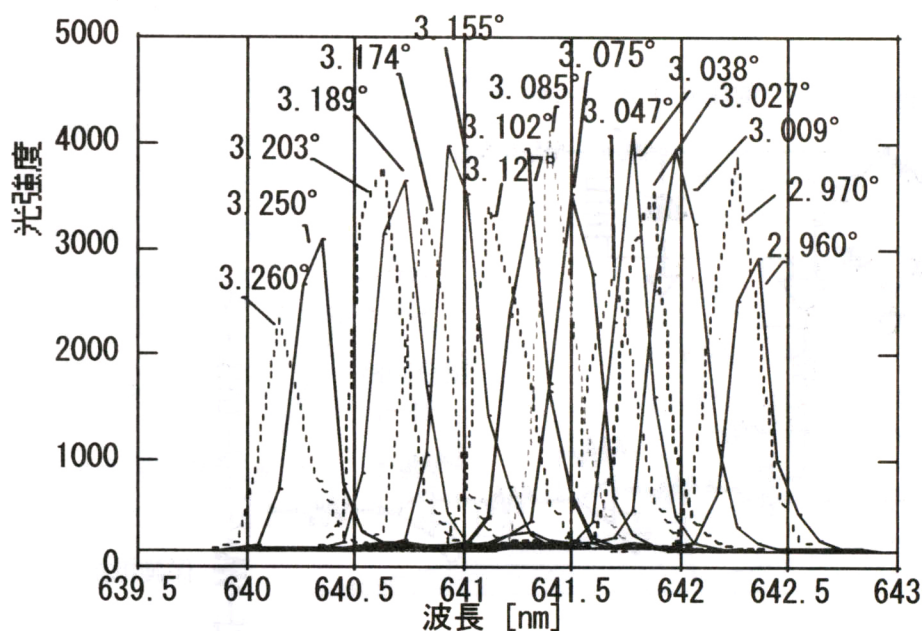


図6 可変波長の追跡
ゴニオメータの角度を表示

ゴニオメータを回してステアリング・ミラーを回転させ、外部共振器の共振の維持と波長選択性を追跡した結果を図6に示す。ゴニオメータの回転とともに発振ピーク波長が連続的に変化しているのが判る。表示した角度はゴニオメータ表示値であり、選択される回折角と増減が逆になっている。従って、回折角が 0.3° 増える間に発振波長は 2 nm 長波長シフトすることが判る。

スペクトロメータは波長分解能を高めるため、入射スリットが非常に狭い $5\mu\text{m}$ 幅、回折格子が $1200\ell/\text{mm}$ のものを使用しており、波長分解能は 0.2 nm である（データの表示間隔は形式的にこの半分程度になっている）。この分解能の範囲内では発振プロファイルは一律にシングルピークが実現されているように見える。だが発振線幅はより狭く、このグラフは評価に使用したスペクトロメータの分解能で決定されている可能性も高い。これを確かめるためにはより波長分解能の高い光スペクトラムアナライザーなどを用いる必要がある。またステアリング・ミラーを回転させるゴニオメータのマイクロメーター・ヘッドは現在手で回しているが、熱の影響を除去し、精密なコントロールを行うため、パルス制御のDCサーボモーターで駆動するよう改良中である。

5. まとめ

レーザーダイオードの外部に回折格子とミラーを配置し Littman 型外部共振器を構成してレーザーダイオードを発振させた。この配置により、ミラーを回転させて共振条件を維持したまま、発振波長の連続可変を実現した。安定発振させるためカスタム温度コントロール回路を自作し、ベースプレート温度を長時間一定に維持することが必須であった。

6. 参考文献

- 1) 佐藤友弘・須鎗章・富岡明宏, “近接場光学測定用光プローブの作製”, 大阪電気通信大学研究論集, 自然科学編 35 号 pp.69-77 (2000).
- 2) H. F. Hess, E. Betzig, T. D. Harris, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, “Near-Field Spectroscopy of the Quantum Constituents of a Luminescent System”, Science, **264**, pp.1740-1745 (1994).
- 3) K. Liu, and M. G. Littman, “Novel Geometry for Single-Mode Scanning of Tunable Lasers”, Optics Lett. **6**, pp.117-118 (1981).
- 4) K. B. MacAdam, A. Steinbach, C. Wieman, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, “A Narrow-Band Tunable Diode Laser System with Grating Feedback, and a Saturated Absorption Spectrometer for Cs and Rb”, Am. J. Phys., **60**, pp.1098-1111 (1992).

7. 謝辞

本研究の一部は平成 13・14 年度学術研究振興資金「低温近接場光学による表面ナノ構造の解析」および学術フロンティア推進事業「界面領域新機能材料の研究」の助成により行った。

