

#5

半導体レーザー特性の概要

---

---

---

---

---

---

# APPLICATION NOTE

---

# 半導体レーザー特性の測定

## Diode Lasers Approach Ubiquity, But They Still Can Be Frustrating To Work With

By Tyll Hertsens

ダイオードレーザーは「素晴らしい小さなデバイス」と呼ばれています。それらは小さくて効率的です。それらは直接変調および調整できます。これらのデバイスは、光通信システムの明瞭さを向上させ、自宅で演奏する音楽の忠実度を高め、他の多くの明白でない方法で日々影響を与えています。

しかし、ダイオードレーザーを動作させるのは面倒です。広い範囲のアプリケーションを可能にする特性の同じファミリーは、ダイオードレーザーを制御することを困難にします。

### 概要

レーザーダイオードの特性評価は、表1に示すように5つのカテゴリに分類できます。

Table 1. ダイオードレーザー測定の5つのカテゴリ。

電気的特性	光出力、電圧降下、およびPDモニター、電流微分解析の測定。
空間的特性	ニアフィールドとファーフィールドの出力光強度プロファイル出力ビームの指向角の測定。
波長特性	スペクトル幅と中心波長を計算し、モード構造を観察する為取得したスペクトルデータ。
光学特性	非点収差およびその他の波面誤差の測定。
動的特性	ノイズ、相互変調歪み、立ち上がり時間、立ち下がり時間、チャージングなどの測定。

この記事では、ダイオードレーザーの電気的特性、空間的特性、スペクトル特性について概説します。一般に、表1の「光」カテゴリは干渉干渉の領域に該当し、表1の「動的」カテゴリは、主にデバイス変調中のリアルタイム等価回路モデリングに関与し、高度にインタラクティブな試みを表します。表1の最後の2つのカテゴリは、他の著者のための他の記事のトピックを表しています。

### 電気的特性

L/Iカーブ。最も一般的なダイオードレーザー特性は、L/I曲線です（図1）。

出力光強度に対するレーザーに適用される駆動電流をプロットします。この曲線は、レーザーの動作点（定格光パワーでの駆動電流）およびしきい値電流（レーザー発振が始まる電流）を決定するために使用されます。

図1からわかるように、レーザーのしきい値はレーザーの温度に強く影響されます。通常、レーザーしきい値は温度が  $I_{th} \propto \exp(T/T_0)$  のように指数関数的に増加します。ここで、Tはレーザー温度（ケルビン）で、 $T_0$ はレーザーの「特性温度」（通常60~150 K）です。

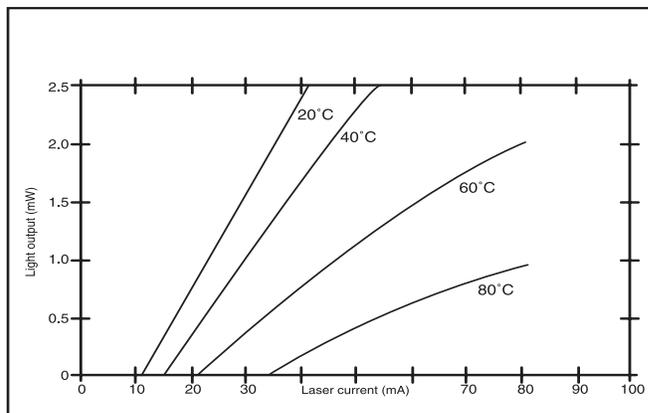


Figure 1. CWレーザー L/I曲線

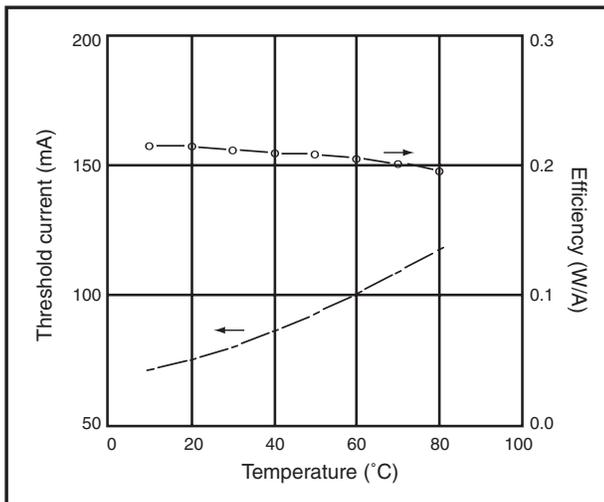


Figure 2. 温度が上昇すると、しきい値電流が上昇し、効率が低下します。

ダイオードレーザーの効率は、L/I曲線からも導き出されます。最も一般的にはスロップ効率として表され、mW/mAの単位で測定されます。しきい値シフトほど明白ではありませんが、温度が上昇するとレーザー効率も低下します(図2)。レーザー効率は通常25°Cで約0.3 mW/mAで、温度が10°C上昇するごとに約0.01 mW/mA低下します。

パルスL/I曲線。L/I特性は、低デューティサイクルパルスモードでも取得できます。パルスデータ(図3)と比較して、連続波データで観察されるしきい値の増加とスロップ効率の減少は、接合部温度の上昇に起因しています。デバイスの熱抵抗によるこの上昇は、通常40~80°C/Wです。通常、このタイプの測定で 사용되는パルス幅は100~500ナノ秒で、デューティサイクルは1%未満です。

連続波とパルスL/I曲線の異常な大きな違いは、LDダイの取り付け不良または接合部の漏れを示唆する場合があります。多くの場合、レーザー品質の低下の指標となります。

トラッキング比率。多くのダイオードレーザーパッケージには、レーザーキャビティの後面から出る光の強度を検出する後面モニターフォトダイオードが含まれています。通常、このフォトダイオードからの信号電流は、レーザー駆動回路のフィードバックソースとして使用され、ダイオードレーザーの出力パワーを安定化します。

モニターフォトダイオードの最も一般的な特徴は、出力電流とダイオードレーザーからの光出力を比較することです。モニターのフォトダイオード電流は出力光に比例するため、トラッキング比は単一の数値であり、mA/mWで測定されます。

この測定の異常な用途は、光ファイバーに直接結合されたダイオードレーザーの特性評価時に発生します。この場合の追跡率は、モニターのフォトダイオード電流によるファイバーからの光出力の比になります。トラッキング率は温度と駆動電流によって変化し、レーザーの出力ファセットとファイバーの入力端の間の結合効率の変化を示します。

このような追跡率の変動は、ファイバー取り付けの機械的不安定性またはレーザーのニアフィールドパターンの変化を検出するために使用できます。

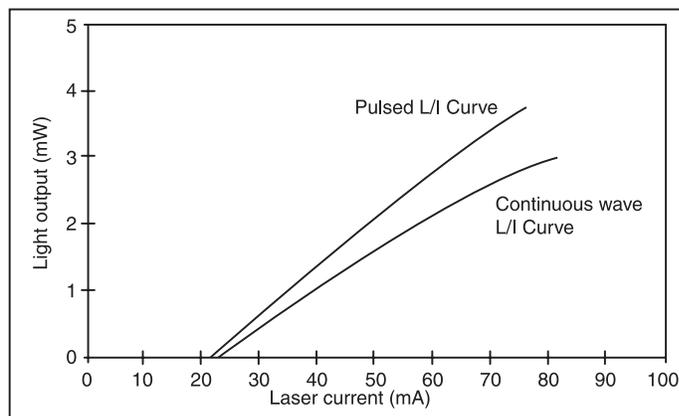


Figure 3. パルスレーザーL/I曲線

## V/Iカーブ。

レーザーでの電圧降下は、多くの場合、電気的特性評価中に取得されます。この特性は、他のタイプの半導体ダイオードの類似の特性に類似しており、図4に示すように、温度によって大きく変化しません。  
 注：ダイオードレーザーメーカーは、通常、他の種類のダイオードの電子産業における従来の慣行に従って、X軸に順方向電圧を印加します。ダイオードレーザーを特徴付ける計測器を製造している企業は、図4のような曲線を示し、X軸に順方向電流が流れます。  
 したがって、他のパフォーマンス曲線（後のセクションで説明します）をV/I曲線に重ねることができます。  
 従来のエレクトロニクス関係者は、これをV/I曲線の命名法を受け入れるのではなく、I/V曲線と呼びます。  
 動作電力でのダイオードレーザーの一般的な電圧降下は1.5ボルトです。  
 V/Iデータは、派生特性評価手法で最も一般的に使用されます。

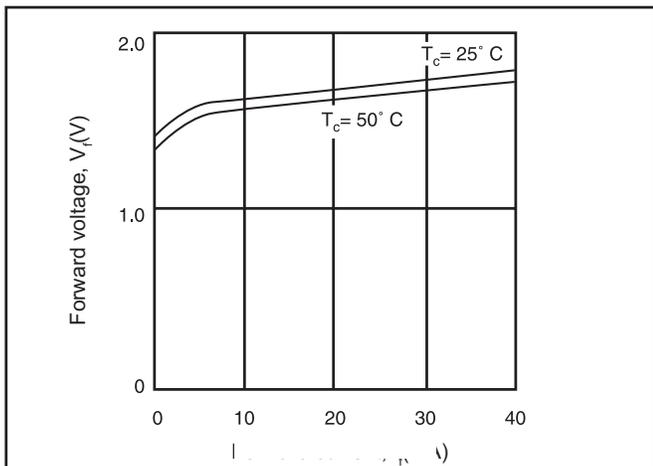


Figure 4. V/I 曲線。

## 注意事項。

ダイオードレーザーに大きな逆バイアスを印加すると、非常に大きな損傷を与えます。ダイオードレーザーのメーカーは、レーザーの逆バイアス破壊特性を調べて、デバイスのジオメトリを制御する場合があります。その限られた場合でも、メーカーは約10  $\mu$ Aの逆電流を超えないように注意しています。

しきい値電流を計算する正しい方法はありません。ただし、表2で説明し、図5で図解したように、一般に受け入れられている4つの方法があります。

表2に概説されている4つの方法のいずれも正常に使用できますが、2次導関数の方法が最も好まれているようです。

2セグメントフィット、1次導関数、および2次導関数メソッドは、Telcordia GR-468-COREおよびGR-3010-COREに基づいています。線形適合はTelcordiaによって認識されません。

Table 1. 発信閾値電流測定のための4つの計算法。

リニアFit	しきい値を超えるL / I曲線の直線部分に直線が一致するポイントは、ゼロの光パワーに対応するX軸と一致します。（図5a）
2セグメントFit	しきい値を超えるL / I曲線の線形部分に直線が一致する点は、Fit未満のL / I曲線のライナー部分に一致する直線を遮断します。（図5b）
1次導関数	dL / dI曲線の立ち上がりエッジの最大値の半分のポイント。（図5c）
2次導関数	d <sup>2</sup> L / dI <sup>2</sup> 曲線が最大になる点。（図5d）

## デリバティブの特徴付け

L / V / Iデータから計算される4つの頻りに使用される微分曲線があります。最も一般的に使用される導関数はdL / dI曲線です。

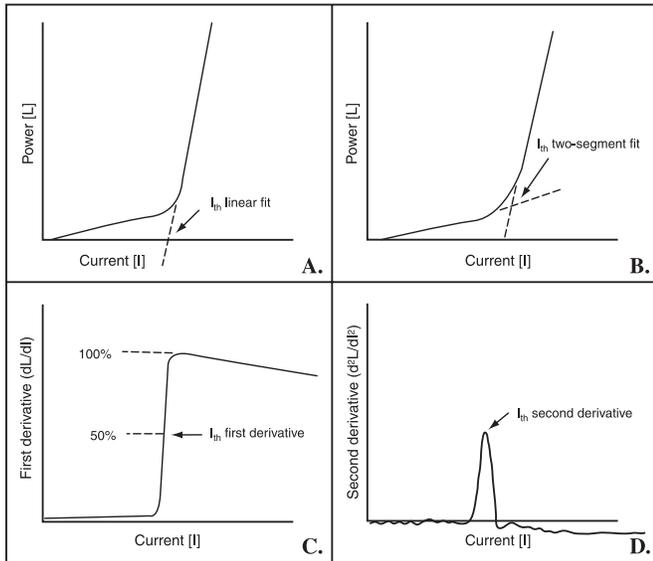


Figure 5. しきい値電流を見つけるいくつかの方法：  
A)線形適合、B)2セグメント適合、C)一次微分手法、  
およびD)二次微分手法。

図6の $dL/dI$ 曲線は、駆動電流に対する瞬間的なスロープ効率をプロットしています。非線形性に非常に敏感で、 $L/I$ データの「ねじれ」を識別するために使用されます。

$dL/dI$ 曲線と $L/I$ 曲線の関係を見ることに慣れたら、それなしではダイオードレーザーデータを見たくないでしょう。

$L/I$ データの2次導関数は $d^2L/dI^2$ 曲線です。図5dに示すように、ダイオードレーザーのしきい値の計算にほぼ排他的に使用されます。

残りの2つの導関数、 $dV/dI$ および $d^2V/dI^2$ 曲線（図7）は、プロセス制御フィードバックに最もよく使用されます

ダイオードレーザーの製造工程で。通常動的抵抗曲線と呼ばれる $dV/dI$ 曲線はオームで表され、特定の電流での電流の変化に対する実効抵抗です。図7に示すように、通常、LED動作とレーザー動作を分離するレーザーしきい値でこの曲線にシフトがあります。

$dV/dI$ 曲線は電圧で表され、元のデータからこれまで削除されていたため、直感的に理解することは困難です。

ただし、 $dV/dI$ 曲線は、ダイオードレーザーメーカーにとって非常に強力なツールです。

$dV/dI$ データの分析により、テスト対象の特定のダイオードレーザーの等価回路モデルを作成できます。

これらのモデルは、直列および並列、線形および非線形の抵抗回路要素を示します。

このデータから、接合理想係数、接触抵抗、漏れ電流、およびしきい値を計算できます。

デバイスメーカーは、これらの派生データを使用して、接合幅、エピタキシャル成長、化学量論、および他の多くのプロセス変数などのプロセスの側面を制御します。

$dV/dI$ 曲線を使用して、レーザーのしきい値を決定できることを忘れないでください。

これは、実装およびパッケージングの前にベアレーザーダイの特性評価が必要な生産アプリケーションで非常に便利であることがわかります。

この特性評価方法により、LDダイを検出器の前に配置するという時間のかかる（そして高価な）不便なしに、しきい値の計算が可能になります！

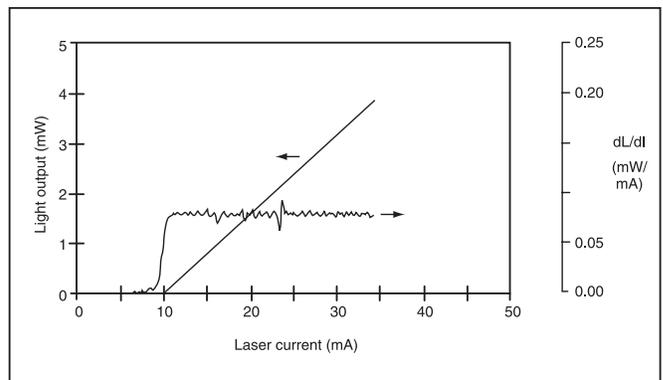


Figure 6.  $L/I$ 曲線の1次導関数は、実際のデバイスの $L/I$ 曲線の微妙な「ねじれ」を識別します。

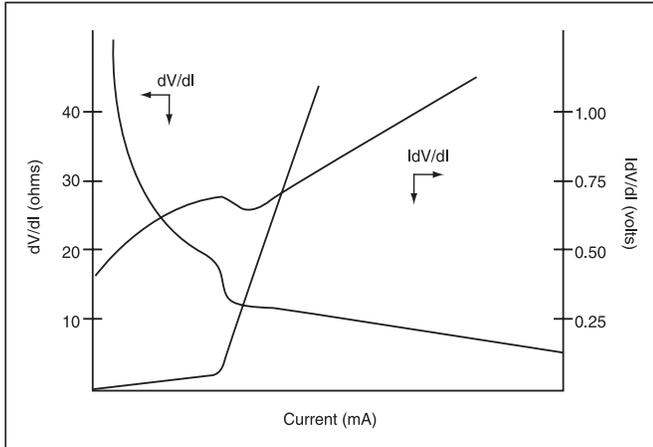


Figure 7.  $dV/dI$  および  $IdV/dI$  曲線は、多くの場合、製造プロセスを制御するためにダイオードレーザーメーカーによって使用されます。

## 空間特性

ファーフールドパターン。残念ながら、ダイオードレーザーは平行ビームを放射しません。

平均的なレーザーは、通常は断面が楕円形の円錐形の光を放射します。この円錐の発散角は、レーザーの活性領域に垂直および平行な軸の全幅と半分の最大光パワーによって測定されます。典型的な広がり角は、それぞれ $30^\circ$ と $12^\circ$ です。

この楕円は、レーザーの放出口が狭いスリットであり、その長軸が接合部に平行な平面にあるために発生します。

したがって、回折効果は、他の方向よりも一方向で強くなり、接合部に垂直な平面では角度が大きくなり、接合部に平行な平面では角度が小さくなります。

丸いビームを放射するダイオードレーザーを作成するために、デバイス構造を変更することにおいて、大きな進歩がありました。

これらの進歩は、レーザーキャビティの長さに沿って半導体材料の屈折率を調整し、さまざまないわゆる屈折率ガイド構造を作成することで達成されました。

レーザー出力の光強度分布プロファイルは、垂直面でほぼガウス分布です。平行面では、これはほとんどありません (図8)。レーザーキャビティ内の光は、デバイス構造の層の屈折率により、垂直面で単一の横モードに容易に制限されます。

平行面で光を単一モードに制限するのははるかに困難です。簡単に言えば、これはキャリア濃度と多くのインデックスガイド方法によって実現されます。

せいぜい、これらの方法は、レーザーがその定格光出力を超えるまで、接合部に平行な高次横モードの振動を阻止します。

最悪の場合、この平面の遠方のパターンは不規則な混乱です。

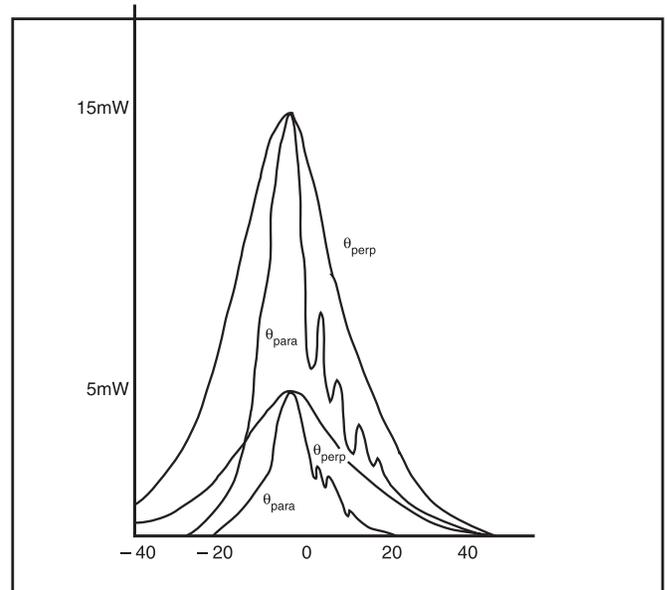


Figure 8. 実際のダイオードレーザーのファーフールドパターン特性。

もう1つの遠方界の特徴は注目に値します：ポインティング角度です。  
 これは、レーザーパッケージの機械的中心線を基準とした最大放射強度の軸です。  
 すべてのダイオードレーザーパッケージには基準面があります。  
 この基準面は、通常、パッケージが溶接されるフランジの前面です。（通常、フランジには、平行軸と垂直軸を参照するインデックスノッチもあります）。  
 ポインティング角度の誤差は平均で約1°ですが、ときどき4°になることもあります。

遠距離データを取得する従来の方法は、レーザーに平行および垂直なアークを通して小面積検出器を掃引することです。

実際には、これは3つの方法で実現できます。最初に、複雑なジンバルのセットを使用して、文字通り2つのアークを介して検出器をスイングします。  
 2つ目は、検出器を固定したままレーザーを振ることです。  
 3番目の方法では、2つの方法を組み合わせて、検出器とレーザーにそれぞれ1自由度の移動を与えます。

近視野パターン。  
 近視野データの収集は、基本的に、ダイオードレーザーの出力ファセットでの光出力のイメージングで構成されます。  
 これは、フィルムホルダーまたはテレビカメラ用のアタッチメントを備えた顕微鏡で行うことができます。  
**\*注意：レーザーをオンにした状態で、顕微鏡を通してレーザーを見つめないでください！**

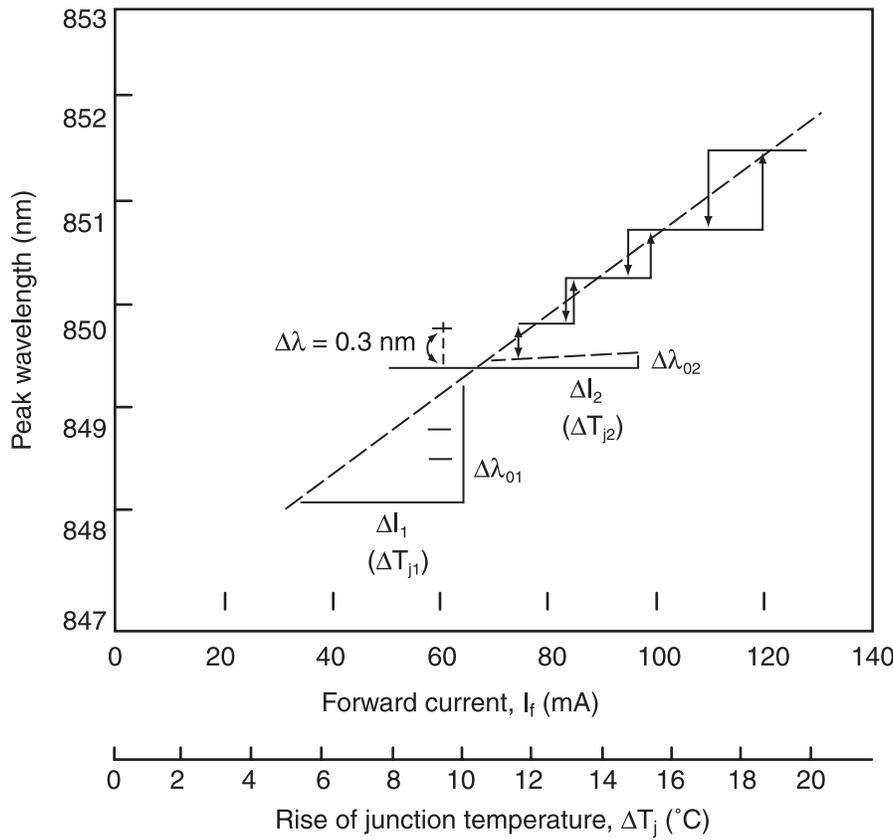


Figure 9. 850 nmダイオードレーザーの単一縦モードでの順電流の変化に伴うスペクトルシフト。

遠視野で観察される横モードの変化とビーム楕円率は、近視野をイメージングすることで観察できる現象に関連しています。

ただし、マルチストライプレーザーの場合、近視野イメージングでは、個々のレーザー要素の相対強度測定も可能です。

近視野イメージングでは、放射パターンの不均一性により、接合部に平行な平面でのマルチモード出力も示されます。

## スペクトル特性

### スペクトル幅。

ダイオードレーザーのスペクトルモード構造には、シングルモードとマルチモードの2つの基本タイプがあります。

スペクトルのコンテキストでは、これらは縦モードです。一般に、1300 nmおよび1550 nmデバイスはマルチモードデバイスで、スペクトル線幅は約3 nm FWHMです。

これの例外は、0.1 nm未満の線幅が一般的な分布帰還型レーザー (DFB) です。

短波長レーザーの中で、シングルモードとマルチモードの両方のデバイスが利用可能です。

現在、可視波長レーザーはマルチモードデバイスですが、この技術は非常に新しく、急速に変化するものです。

### 波長可変。

レーザーの中心波長をシフトさせる2つのパラメーターは、接合部温度と駆動電流です。

温度の変化は、半導体接合のバンドギャップに影響を与えるため、キャビティゲインプロファイルのピーク波長に影響します。

温度調整係数の一般的な値は、780 nmデバイスでは0.25 nm / ° C、1300 nmおよび1550 nmデバイスでは0.4 nm / ° Cです。

テレコムDFBレーザーの場合、波長は0.1 nm / 度で変化する場合があります。

許容される縦モードは、レーザーの有効共振器長を駆動電流で変化させることでシフトできます

(図9)。

この効果は、レーザー接合部の電流密度と瞬間接合部温度によって接合材料の屈折率が変化し、それにより実効共振器長が変化するために発生します。

熱係数は、変調周波数が高い場合を除いて、より大きな効果をもたらします。

これらの効果には、横方向のレーザーモードを制限する傾向があるという幸運な特性もあります

(前述の「遠距離場」セクションで説明したとおり)。

典型的な縦モード調整係数は、830 nmレーザーで1 pm / mAです。

### モードホッピング。

シングル縦モードレーザーでは、これらのチューニング効果により、一般に「モードホッピング」と呼ばれる現象が発生します。

これらのモードホップの発生はデバイスによって異なるだけでなく、温度に依存するヒステリシスも発生します。

モードホッピングは非常に困難な場合があります。

### 注意事項。

ダイオードレーザーに関する一般性を適度に正確にする能力は、そのスペクトル特性を議論するときに崩壊し始めます。

前述の効果の多くは、デバイスのパフォーマンスを悪化させ、低下させる傾向があります。

一般に、レーザーを動作させるときは、低ノイズの駆動電流と安定した制御可能な温度を提供することが重要です。

The following publications are available for download on at [www.ilxlightwave.com](http://www.ilxlightwave.com).

## White Papers

- A Standard for Measuring Transient Suppression of Laser Diode Drivers
- Degree of Polarization vs. Poincaré Sphere Coverage
- Improving Splice Loss Measurement Repeatability

## Technical Notes

- Attenuation Accuracy in the 7900 Fiber Optic Test System
- Automatic Wavelength Compensation of Photodiode Power Measurements Using the OMM-6810B Optical Multimeter
- Bandwidth of OMM-6810B Optical Multimeter Analog Output
- Broadband Noise Measurements for Laser Diode Current Sources
- Clamping Limit of a LDX-3525 Precision Current Source
- Control Capability of the LDC-3916371 Fine Temperature Resolution Module
- Current Draw of the LDC-3926 16-Channel High Power Laser Diode Controller
- Determining the Polarization Dependent Response of the FPM-8210 Power Meter
- Four-Wire TEC Voltage Measurement with the LDT-5900 Series Temperature Controllers
- Guide to Selecting a Bias-T Laser Diode Mount
- High Power Linearity of the OMM-6810B and OMH-6780/6790/6795B Detector Heads
- Large-Signal Frequency Response of the 3916338 Current Source Module
- Laser Wavelength Measuring Using a Colored Glass Filter
- Long-Term Output Drift of a LDX-3620 Ultra Low-Noise Laser Diode Current Source
- Long-Term Output Stability of a LDX-3525 Precision Current Source
- Long-Term Stability of an MPS-8033/55 ASE Source
- LRS-9424 Heat Sink Temperature Stability When Chamber Door Opens
- Measurement of 4-Wire Voltage Sense on an LDC-3916 Laser Diode Controller
- Measuring the Power and Wavelength of Pulsed Sources Using the OMM-6810B Optical Multimeter
- Measuring the Sensitivity of the OMH-6709B Optical Measurement Head
- Measuring the Wavelength of Noisy Sources Using the OMM-6810B Optical Multimeter
- Output Current Accuracy of a LDX-3525 Precision Current Source
- Pin Assignment for CC-305 and CC-505 Cables
- Power and Wavelength Stability of the 79800 DFB Source Module
- Power and Wavelength Stability of the MPS-8000 Series Fiber Optic Sources
- Repeatability of Wavelength and Power Measurements Using the OMM-6810B Optical Multimeter
- Stability of the OMM-6810B Optical Multimeter and OMH-6727B InGaAs Power/Wavehead
- Switching Transient of the 79800D Optical Source Shutter
- Temperature Controlled Mini-DIL Mount
- Temperature Stability Using the LDT-5948
- Thermal Performance of an LDM-4616 Laser Diode Mount
- Triboelectric Effects in High Precision Temperature Measurements
- Tuning the LDP-3840 for Optimum Pulse Response
- Typical Long-Term Temperature Stability of a LDT-5412 Low-Cost TEC
- Typical Long-Term Temperature Stability of a LDT-5525 TEC

- Typical Output Drift of a LDX-3412 Loc-Cost Precision Current Source
- Typical Output Noise of a LDX-3412 Precision Current Source
- Typical Output Stability of the LDC-3724B
- Typical Output Stability of a LDX-3100 Board-Level Current Source
- Typical Pulse Overshoot of the LDP-3840/03 Precision Pulse Current Source
- Typical Temperature Stability of a LDT-5412 Low-Cost Temperature Controller
- Using Three-Wire RTDs with the LDT-5900 Series Temperature Controllers
- Voltage Drop Across High Current Laser Interconnect Cable
- Voltage Drop Across High Current TEC Interconnect Cable
- Voltage Limit Protection of an LDC-3916 Laser Diode Controller
- Wavelength Accuracy of the 79800 DFB Source Module

## Application Notes

- App Note 1: Controlling Temperatures of Diode Lasers and Detectors Thermoelectrically
- App Note 2: Selecting and Using Thermistors for Temperature Control
- App Note 3: Protecting Your Laser Diode
- App Note 4: Thermistor Calibration and the Steinhart-Hart Equation
- App Note 5: An Overview of Laser Diode Characteristics
- App Note 6: Choosing the Right Laser Diode Mount for Your Application
- App Note 8: Mode Hopping in Semiconductor Lasers
- App Note 10: Optimize Testing for Threshold Calculation Repeatability
- App Note 11: Pulsing a Laser Diode
- App Note 12: The Differences between Threshold Current Calculation Methods
- App Note 13: Testing Bond Quality by Measuring Thermal Resistance of Laser Diodes
- App Note 14: Optimizing TEC Drive Current
- App Note 17: AD590 and LM335 Sensor Calibration
- App Note 18: Basic Test Methods for Passive Fiber Optic Components
- App Note 20: PID Control Loops in Thermoelectric Temperature Controllers
- App Note 21: High Performance Temperature Control in Laser Diode Test Applications

日本代理店  
株式会社 日本レーザー Newport機器部  
Tel: 03-5285-0853  
E-mail: Newport\_gr@japanlaser.co.jp  
<https://www.newport-japan.jp/>



---

For application assistance or additional information on our products or services you can contact us at:

**ILX Lightwave Corporation**  
31950 Frontage Road, Bozeman, MT 59715  
Phone: 406-556-2481 • 800-459-9459 • Fax: 406-586-9405  
Email: [sales@ilxlightwave.com](mailto:sales@ilxlightwave.com)

To obtain contact information for our international distributors and product repair centers or for fast access to product information, technical support, LabVIEW® drivers, and our comprehensive library of technical and application information, visit our website at:

**[www.ilxlightwave.com](http://www.ilxlightwave.com)**

