

#1

TEC素子を用いたレーザー
ダイオードの温度制御

APPLICATION NOTE

TEC素子を用いたダイオードレーザーと検出器の温度の制御

By Lawrence A. Johnson

最適な熱設計により、ダイオードレーザーと検出器の性能が安定します。

多くのアプリケーションでは、アクティブ温度制御によってオプトエレクトロニクスデバイスのパフォーマンスが向上します。

ほとんどの半導体検出器では、動作温度とともにノイズが減少します。

応答性は動作温度によっても変化するため、高度な応答性周波数精度が必要な場合は、アクティブな温度制御により安定化する必要があります。

ダイオードレーザー (=LD)の動作特性も温度によって大きく異なります。

発光波長、しきい値電流、動作寿命はすべて、デバイスの温度に強く関係しています。

780 nmで3 mWを放射する一般的なLDの場合、放射波長は平均0.26 nm / ° Cシフトし、しきい値電流は平均0.3 mA / ° Cシフトします。

1550 nmおよび20 mWで動作する一般的なテレコムDFBレーザーの場合、発光波長は平均0.11 nm / ° Cシフトし、しきい値電流は平均0.2 mA / ° C変化します。

さらに、動作温度が25° C上昇するごとに、動作寿命は1/2倍短くなります。

幸いなことに、熱電 (ペルチェ) デバイス (=TEC デバイス)は、光電子デバイスの多くのアプリケーションで正確な温度制御を行うためのシンプルで信頼できるソリューションを提供します。

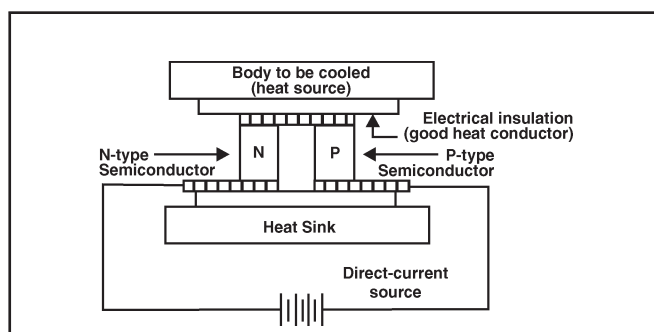
これらのソリッドステートデバイスは、周囲温度から60° C以上に小さな熱負荷を加熱または冷却し、0.001° Cを超える温度安定性を実現します。

TECデバイスには汎用性があるため、熱電冷却器は多くの光検出器およびLDパッケージで広く利用されています。

熱電デバイス (= TECデバイス)

1834年、ジャンC.ペルティエは、異種金属の接合部に電流を流すと、電流の方向に応じて、接合部で熱が生成または吸収されることを観察しました。ペルチェ効果は、現在呼ばれているように、すべての熱電デバイスの基礎です。今日、熱電冷却カップルは、図1に示すように、電気的に直列に接続され、熱的に並列に接続された2つの高濃度ドーパド半導体ブロック (通常はテルル化ビスマス) で作られています。この配置では、冷接点で吸収された熱 カップルを通過する電流に比例した割合でホットジャンクションに。この効果は、熱電モジュールの形成に使用されるカップルの数を増やすことで簡単に増加します。

Figure 1. A thermoelectric cooling couple.



熱電モジュールには、多くの場合、多数の熱電冷却カップルが含まれています。

これらのモジュールが一方の表面から他方の表面に熱を伝達できる速度は、モジュール内のカップルの数、カップルを通過する電流、モジュールの平均温度、およびモジュール全体の温度差に依存します。

個々の熱電モジュールは、最大60°Cの温度差を実現できます。

ただし、熱電モジュールの実際の性能特性を理解するには、内部および外部の制限要因の両方を理解することが重要です。

ペルチェ効果のヒートポンプ動作に加えて、熱もモジュールによって生成され、伝導によってモジュールを介して伝達されます。熱負荷がない場合、ペルチェ効果によってポンピングされる熱が他の2つの要因によってバランスがとられると、最大冷却温度差に到達します。

幸いなことに、熱電モジュールのメーカーが提供する性能グラフは、内部要因の正味の観点からモジュールの性能を示しています。

図2は、典型的なモジュールの性能を示しています。モジュールの熱伝達能力は、約60°Cの温度差でゼロに低下します。

図2は、モジュールの性能係数（COP）が温度差と駆動電流によってどのように変化するかを示しています。COPは次のように定義されます。

$$\text{COP} = (\text{Heat transferred}) \div (\text{Total electrical power supplied}) \quad (1)$$

モジュールの高温面で放散しなければならない熱には、低温面から除去される熱と、モジュールに加えられた電力によって生じるジュール加熱の両方が含まれることを忘れないでください。

たとえば、図2のデータを使用すると、50°Cの温度差で4 Wをポンプするのに約4 Aの駆動電流が必要であることがわかります。

この動作点では、モジュールのCOPは約17%であり、モジュールの高温の表面で発生する総熱量は次のようになります。

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{pumped}} \times (1 + 1/\text{COP}) = 34 \text{ W} \quad (2)$$

伝熱性能を制限する外的な要因には、ヒートシンクの制限と熱負荷の考慮事項が含まれます。

*ヒートシンク

概念的には、ヒートシンクの役割は単純です。通常は室温に近い一定温度の表面を提供します。用途によっては、アルミニウムの大きなブロックがうまく機能します。ただし、放散される熱が約1ワットを超えると、フィン、強制空気、さらには液体冷却が必要になります。

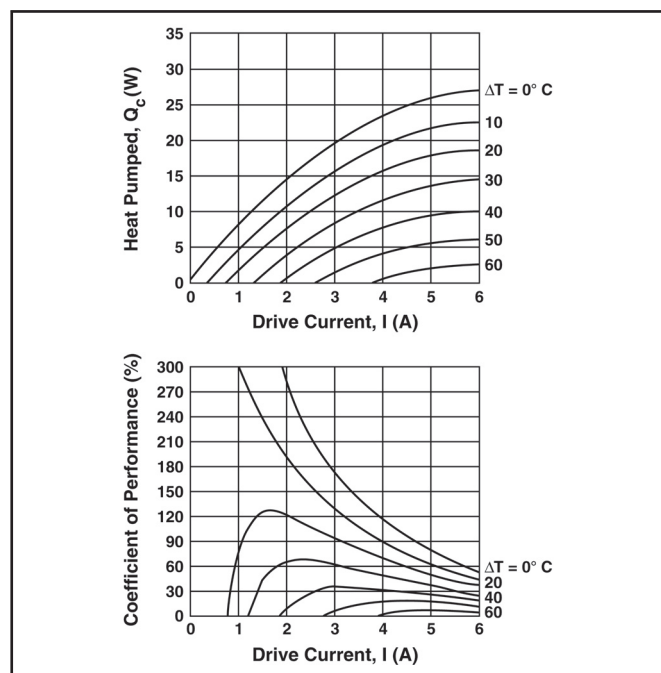


Figure 2. TECモジュールの一般的な性能：(a) ヒートポンプ能力と駆動電流、および (b) 性能係数（COP）と駆動電流。

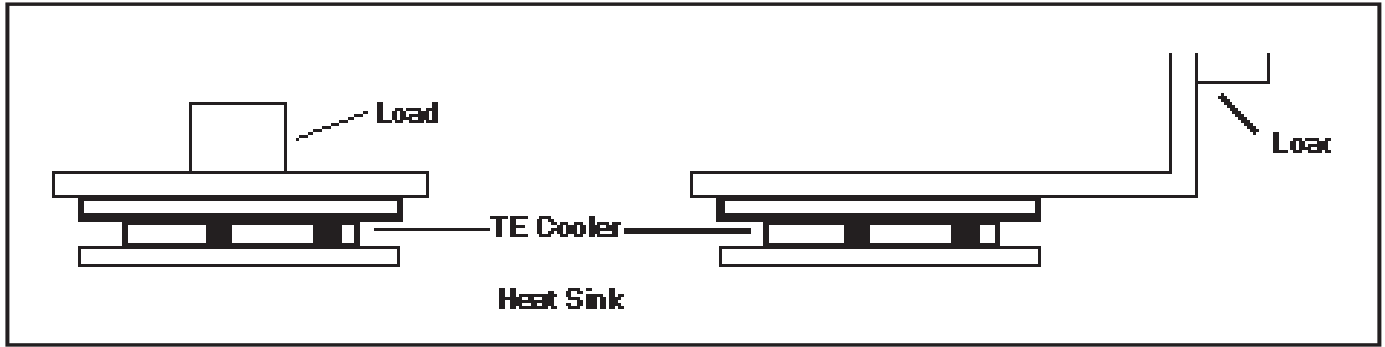


Figure 3. ジオメトリは、熱性能において大きな役割を果たすことができます。(a) 優れたジオメトリを表し、(b) 熱伝導率の値が低い貧弱なジオメトリを表します。

10Wの熱を加えると、環境温度下の4インチx4インチx2インチのアルミニウムブロックは、10分間で約5°Cしか加熱されません。

しかし、1時間にわたって、周囲温度より約23°C高い温度まで加熱し続けると、ほぼ同じサイズの標準的なヒートシンクでは、対照的に環境温度より約12°Cだけ高い温度になります。

熱負荷

熱電冷却のアプリケーションでは、クーラーと制御回路に与えられる熱負荷の性質が重要です。これらの負荷は、真空マウント内の小さなダイオードレーザーチップから大きな焦点面検出器アレイまでさまざまです。筑いくつかの重要な負荷パラメータを考慮する必要があります。

熱質量

熱質量は、物体の物理的質量と特定の熱の積です。高い安定性が必要な場合、大きな熱質量はしばしば利点ですが、急激な温度変化が必要な場合は不利です。

従来の1300 nmのファイバーピグテールダイオードレーザーパッケージでは、内部の熱電冷却器は、1ワット未満の電力で2.. 3秒でレーザーチップ温度を室温から0°Cに変更できます。

ただし、レーザーパッケージ自体の温度を同じ温度範囲にシフトするには、40秒と約50 Wの電力が必要です。

形状と熱伝導率

最適な温度制御を実現するには、冷却（または加熱）するデバイスと熱電冷却器の表面との間の熱経路の熱伝導率を高くし、物理的な長さを短くする必要があります。

図3は、温度安定化の容易さにおいてかなり異なる2つの単純な配置を示しています。

図3bの負荷とクーラーモジュール間の熱接続は、低い熱伝導率を示し、望ましくない遅延係数をもたらします。

熱伝導率が低いと、負荷での温度が所望の変化に反応するのが遅くなりますが、気流によって引き起こされる変化の影響を非常に受けやすくなります。

アクティブな温度制御が使用されている場合、ループゲインが非常に低い場合を除き、遅延係数により制御ループが不安定になります。

また、重要なのは、クーラーモジュールの面とそれらに取り付けられている表面との間の接触の質です。熱電冷却モジュールのほとんどの製造業者は、これらの表面間の隙間を0.001インチ未満にすることを推奨しています。

さらに、熱シリコングリースの薄膜

(Corning®タイプ340またはWake-field®タイプ120など)を表面間に塗布する必要があります。若しくはサーマルシート(グラフィットシート)の使用をお勧めします。

ダイオードレーザーの温度制御など、多くのアプリケーションでのデバイスの熱負荷は、デバイスが冷却（または加熱）されると熱を発生します。たとえば、一般的な3 mWのダイオードレーザーは、室温で動作すると約90 mWの熱を発生します。..の条件下で、100 mWのダイオードレーザーは約700 mWの熱を生成します。

対流熱伝達自然に発生する気流は、加熱された（または冷却された）デバイスと周囲の空気との間の熱伝達を引き起こします。

転送速度は、負荷の形状とその周囲に依存します。この熱伝達メカニズムは、一部の検出器アプリケーションのように、周囲から遠く離れてデバイスを冷却（または加熱）する必要がある場合に制限要因になる可能性があります。

これらの場合、真空容器がよく使用されます。自然対流の場合、熱は約0.5~1.0 mW / cm² / °Cの速度で伝達されます。自然対流による熱伝達を推定するには、次の式を使用できます。

$$Q = h A (\Delta T) \quad (3)$$

この式で、 $h = 0.5 \sim 1.0 \text{ mW} / \text{cm}^2 / ^\circ\text{C}$ 、 A は表面積、 ΔT は冷却または加熱された表面と周囲の大気との温度差です。

たとえば、0度に冷却された2 x 4 cmの取り付けプレートは、周囲の23° Cの周囲空気から約300 mWの熱量を連続的に吸収します。

伝導熱伝達

熱負荷を別の表面に接続する材料は、熱伝達の経路を提供します。

熱電冷却器のほとんどのアプリケーションでは、熱電モジュール自体が最大の伝導経路です。

上記で説明したように、この経路の影響は、一般に、サーモエレクトリッククーラーのメーカーが提供するパフォーマンスデータで説明されています。

ただし、他の経路の熱伝導率がある場合は、熱伝導率を合計熱負荷の計算に含める必要があります。適切な方程式は次のとおりです。

$$Q = k A \Delta T / L \quad (4)$$

ここで、 k は熱伝導率（アルミニウム $k = 2.36 \text{ W} / \text{cm}^2 / ^\circ\text{C}$ の場合）、 A は断面積、 L は長さ、 ΔT は温度差です。

放射熱伝達

放射熱伝達は、熱負荷とその周囲の温度差の4乗として変化します。

放射熱伝達は式5を使用して推定できます。5式では、小さな物体（1）が周囲の物体（2）に完全に囲まれていることを想定しています。

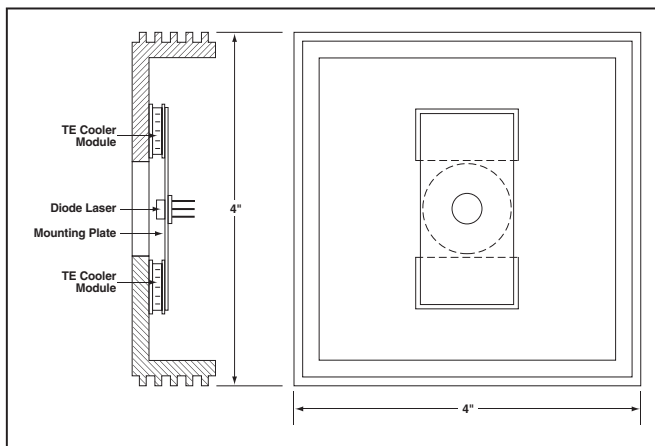


Figure 4. 汎用ダイオードレーザー取り付け治具の側面図と上面図。

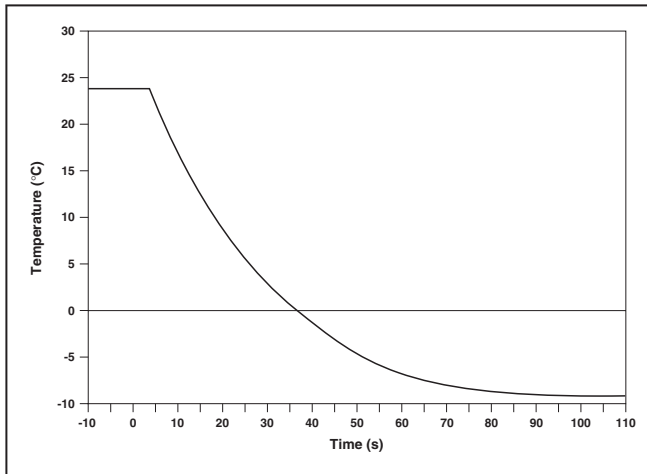


Figure 5. 図4に示す取り付けプレートの開ループ温度応答。48 Wのクーラー電力が適用されている場合。

$$Q = \sigma e_1 A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

ここで、 σ はStephan-Boltzman定数、 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 / \text{K}$ 、 e_1 と A_1 は密閉された物体の放射率と表面積、 T_1 と T_2 は密閉された物体の絶対温度です。

たとえば、高放射率の表面を想定して、 80°C の 1 cm^2 のプレートでは 20°C の周囲環境まで連続して 93 mW を消費します。

プレートが 30°C の場合、この消費は 12 mW に低下します。

どちらの場合でも、プレートの表面放射率を下げることにより、損失を大幅に減らすことができます。たとえば、金のコーティングを施す事で、損失を約50分の1に減らす事が出来ます。

熱電温度制御の実際の例を図4に示します。図4は、オープンフレームおよびウィンドウCANダイオードレーザーに適した機械的な取り付け治具を示しています。

このマウントは、取り付けの柔軟性、温度を変更できる速度、および温度の安定性の間の適切な妥協点を提供します。

図5は、48 Wの電力が熱電冷却器に印加されたときの、このフィクスチャの冷却された取り付けプレートの開ループ応答を示しています。

熱電モジュールを使用した正確でアクティブな温度制御は、通常、図6に示すような電子フィードバックループで実現されます。

このループの重要な要素は、温度センサー、エラーアンプ、エラー信号プロセッサ、およびバイポーラ出力ドライバーです。

実際の温度は温度センサーによって測定されます。

次に、この温度が設定点温度と比較され、差に比例したエラー信号が生成されます。

エラー信号プロセッサは、エラー信号と使用されている制御方法に基づいて出力を生成します。この出力は、熱電モジュールに接続されたバイポーラ出力ドライバーを制御します。

このタイプの制御ループの複雑さは、ほとんどの検出器冷却器コントローラーに見られる単純なアナログ比例コントローラーから、完全デジタルPID（比例-積分-差分）コントローラーまでさまざまです。

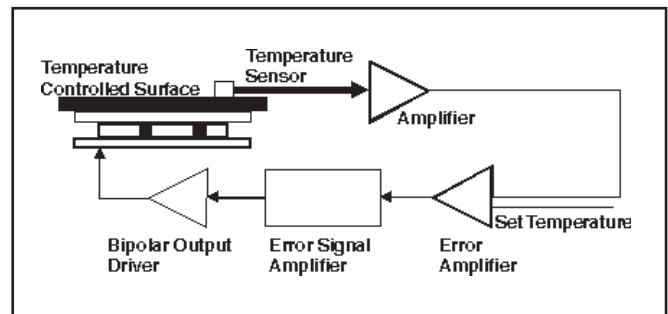


Figure 6. 温度制御用の電子フィードバックループ。

温度センサー

ダイオードレーザーまたは検出器を含むほとんどのセンサーアプリケーションでは、温度センサーは負温度係数 (NTC) サーミスターです。

これらのデバイスにはいくつかの利点があります。費用がかからず、正確で、非常に敏感で、扱いやすいです。一般的に、唯一の欠点は、抵抗が温度の非線形関数であることです。

ただし、固定点での温度制御が必要な場合、または抵抗から温度への変換を実行するためにマイクロプロセッサを使用できる場合 (およびその逆の場合)、これは実際には不利ではありません。後者の場合、Steinhart-Hartの式をサーミスタのキャリブレーションに使用できます。

$$1/T = A_0 + A_1 \ln(R) + A_3 [\ln(R)]^3 \quad (6)$$

この式で、Tはケルビン度単位の温度、Rはオーム単位のサーミスタ抵抗、A0、A1、A3はキャリブレーション定数です。この式を使用して、ほとんどのNTCサーミスタを広い温度範囲で0.01°C以内に較正できます。

一般的に使用される他の温度センサーは、半導体デバイス (AnalogDevice AD590やNational Semiconductor LM335など) 若しくはプラチナ抵抗温度検出器 (RTDセンサー) です。これらのデバイスは線形ですが、サーミスタほど敏感ではありません。

エラーアンプ

誤差増幅は、測定された温度 (またはサーミスタ抵抗) と設定点温度 (または抵抗) の差です。これは通常、単純なオペアンプ回路で実現されます。

エラー信号プロセッサ

エラー信号プロセッサは、通常、何らかの形式の方程式を実装します。

$$M = B + GE + (1/R) \int \dot{E} \, ds + D (dE/dt) \quad (7)$$

この式で、Mはエラー信号プロセッサの出力です。B、G、R、およびDは、必要な熱負荷と性能に依存する定数です。Eはエラー信号入力を表します。

方程式の右側の4つの項は、一定のオフセット、比例項、積分項、微分項を表します。

比例制御

ほとんどの単純なコントローラは、方程式の比例項のみを実装します。

$$M = GE \quad (8)$$

この場合、サーモエレクトリックモジュールへの駆動信号は、実際の温度 (またはサーミスタ抵抗) と設定温度 (または抵抗) の差に比例します。

このタイプのコントローラは、シンプルなオペアンプ回路要素を使用して簡単に実装できます。実際には、回路のゲイン (G) は実験的に設定され、設定点のステップ変化に対するオーバーシュートを最小限に抑えた高速応答を生成します。

比例コントローラでは、コントローラが最終状態に落ち着いた後でも、常に残留誤差があります。この誤差は、設定温度と実際の温度の差に比例します。これは、コントローラループのゲインに反比例します。

これは、大きな熱負荷を制御する必要がある場合に特に問題になります。

この場合、発振を防ぐためにコントローラのゲインを低く設定する必要がありますが、ゲインを低く設定すると、残留誤差が大きくなります。

一定のオフセット（式7の最初の項）を追加することで、残留誤差を緩和できる場合があります。ただし、これは、設定温度と周囲温度が比較的一定のままである場合にのみ実用的です。熱負荷が小さく、熱電冷却器にしっかりと結合されている場合、または適度な温度安定性のみが必要な場合にのみ、比例コントローラが通常適切な選択です。

例としては、TECクーラーを内蔵した冷却検出器やレーザーパッケージがあります。

比例積分 (PI) 制御

単純な比例コントローラの問題の多くは、式7の積分項を追加することで解決できます。

積分により、残留誤差が除去されます。ただし、新しいパラメーター（R、コントローラのリセット時間と呼ばれることも多い）を設定する必要があるため、この利点にはコストがかかります。一部のアプリケーションでは、これは迷惑になる可能性があります。最適な性能を実現するには、熱負荷特性が変更されるたびにループゲインGとリセット時間Rの両方を調整する必要があります。

実際には、Rの単一の値を選択し、それを一定に保ちながらループゲインGを変化させて、さまざまな熱負荷に対応することが可能です。パフォーマンスは最適ではありませんが、通常は許容でき、比例積分制御の固有の利点を保持します。比例積分制御の欠点は、大きな残留誤差を統合するためにコントローラが遅くなる可能性があることです。この問題は、完全なPID制御ループで克服されます。

比例積分微分 (PID) 制御

完全なPID制御ループは、式7のすべての項を実装します。微分項は、別のパラメーターDを追加することにより、ループの応答時間を改善します。微分パラメータにより、オーバーシュートおよびリングングの問題を効果的に処理できます。これは、大きな熱負荷を迅速に制御する必要がある場合、または急速な温度サイクルが重要な場合に非常に重要です。

ILXのLDT-5948および5980は完全なPID制御を採用しているため、熱負荷を迅速かつ正確に制御できます。

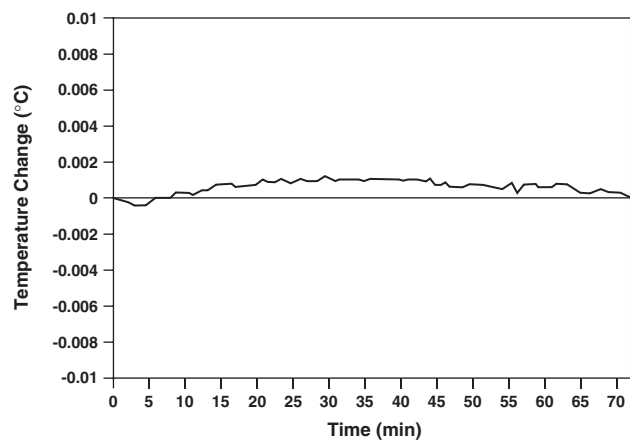
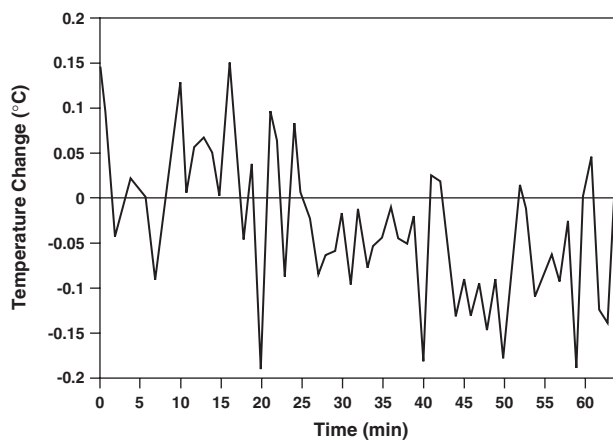


Figure 7. 図4の取り付けプレートの閉ループ温度安定性（背面カバープレート (a) を取り外し、(b) を取り付けた状態)

バイポーラ出力ドライバー

このステージは、TECモジュールを駆動するための電力を提供するだけです。数ワットの電力レベルの場合、この機能はバイポーラトランジスタ出力段を使用して簡単に実現できます。最大120Wの電力レベルの場合、LDT-5980は、高電力、高速応答、および非常に正確な温度制御要件に最適です。

性能

温度コントローラーの2つの重要なパフォーマンス基準は、安定性と速度です。適切な条件下で、上記の3種類の制御アーキテクチャはすべて、 0.001°C を超える安定性を達成できます。

実際には、負荷の近くの気流が通常、安定性の制限要因です。

図7は、図4に示した取り付け具の取り付けプレートの温度変動を示しており、リアカバープレートが取り付けられている場合と取り付けられていない場合があります。

この例では、比例積分フィードバックループを使用してアクティブな温度制御を実行しました。フィクスチャー内部に断熱フォームまたはグラスウールを使用して、気流をさらに制限することにより、さらなる改善が得られます。

これらの制御ループが設定温度のステップ変化に応答できる速度は、負荷特性と利用可能なTEモジュールの電力量によって異なる場合があります。しかし、基準点として、標準的なファイバーピグテールダイオードレーザーパッケージを60秒未満の時間で室温から 0°C までスイングすることが実用的であることがわかりました。

The following publications are available for download on at 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/>



株式会社日本レーザー

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

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

