

#4

サーミスターの校正と
Steinhart-Hart 方程式

APPLICATION NOTE

サーミスターの校正と Steinhart-Hart 方程式

サーミスタは、レーザーダイオードで使用するための安価で正確な温度モニターを提供します。負温度係数（NTC）サーミスタの非線形抵抗温度特性は、Steinhart-Hart方程式、LaGrange多項式、またはその他のモデリング手法を使用して、高精度にモデリングできます。

図1は、10kΩNTCサーミスタの一般的なR-T関係曲線を示しています。

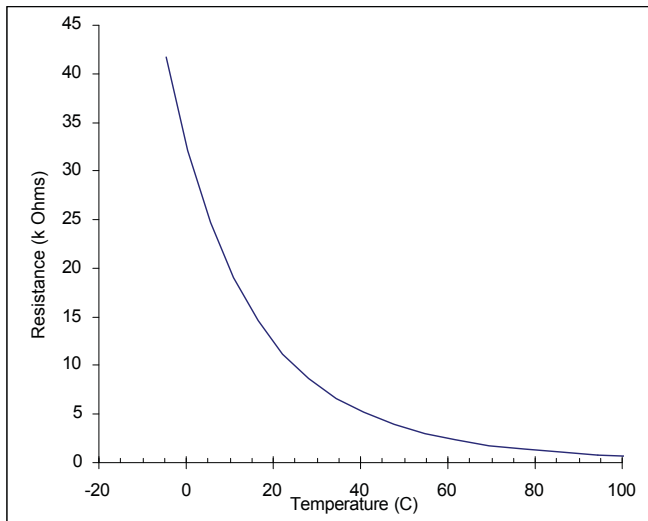


Figure 1. NTC R-T 応答性.

1968年、SteinhartとHartは、海洋研究用の正確な温度測定を行うために、サーミスタR-T特性のモデルを開発しました。現在、R-T特性評価の最も一般的なモデルはSteinhart-Hart方程式です。

このノートでは、Steinhart-Hart方程式を使用してサーミスタを校正する2つの方法について説明しています。

最初の方法は、ILX Lightwave Model LDT-5948およびLDT-59801温度コントローラー、またはSteinhart-Hart方程式を使用する他の温度コントローラーで使用できます。

方程式の2番目の形式はより単純で、最初の2つのSteinhart-Hart定数のみが使用される場合に使用されます。

スタインハート-ハート方程式

3項のSteinhart-Hart方程式:(式1) は、サーミスタR-Tモデリングに使用される最も一般的なモデルです。

$$(1) \quad 1/T = C_1 + C_2 * \ln(R) + C_3 * \ln(R)^3$$

ここで、Tはケルビン単位の絶対温度で、Rはオーム単位のサーミスタ抵抗です。C1、C2、およびC3という用語は、サーミスタのSteinhart-Hart定数です。

Steinhart-Hart方程式のより単純な2項形式（式2）が使用される場合があります。

$$(2) \quad 1/T = C_1' + C_2' * \ln(R)$$

Note that $C_1' \neq C_1$ and $C_2' \neq C_2$.

Steinhart-Hart定数を計算する3つの方法

Steinhart-Hart方程式の定数を計算する3つの方法を表1にまとめます。コンピュータープログラムは、ILX Lightwaveの担当者またはWebサイトのダウンロードセクションから無料で電子的に入手できます。

1. 3項のSteinhart-Hart方程式は、ILX Lightwaveモデル39xxおよび37xxレーザーダイオードコントローラーでも使用されます。

The Excel version of STEIN1.EXE is printed in the Appendix.

Table 1
Three Methods of Calculating
Constants C_1 , C_2 , C_3

Table 1 Notes:

	Method 1	Method 2	Method 3
Model	Eq. (1)	Eq. (1)	Eq. (2)
Program	STEIN1 Or Excel	STEIN2	STEIN3
Accuracy¹	0.05 C_2	0.01 C_2	0.3 C_3
Calculation Method	Three-point	Least-squares fit	Least-squares fit

- 1 Accuracy over 0°C to 50°C range; assuming temperature and resistance readings are accurate to four places.
- 2 Using 10kΩ thermistor and ILX Lightwave model LDT-5910B temperature controller.
- 3 Using 10kΩ thermistor and ILX Lightwave model LDT-5525 temperature controller.

温度に関する議論 精度

サーミスタの校正方法は、特定のアプリケーションの精度要件に依存します。表1は、3つの異なる方法を使用して予想される精度を示しています。

サーミスタ定格

製造業者は、通常、抵抗許容差 (R_{tol}) または温度許容差 (T_{tol})、および抵抗の温度係数

(α) を使用して、いくつかの方法でサーミスタ許容差を指定します。定格 R_{tol} および T_{tol} は、通常、追加の偏差係数を使用して 25°C で与えられます。

他の温度のため。抵抗の温度係数 (α) は、温度が 1°C 変化した場合の抵抗の変化率であり、他の 2 つの許容誤差のいずれかで指定できます。3 つの要因は、式 3 に示すように関連しています。

$$(3) \quad T_{tol} = R_{tol} / \alpha$$

サーミスタが Steinhart-Hart モデルでキャリブレーションされると、その範囲の温度許容値はモデルの許容値に改善されます。

したがって、 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ (つまり、厳しい公差) に校正された安価なサーミスタは、同じ温度範囲で $\pm 0.02^\circ\text{C}$ に校正された高価なサーミスタと同じくらい正確です。

実質精度

LDT-5948 または 5980、または他の ILX 温度コントローラーを使用して、サーミスターを校正するときに温度を独立して測定できます。

しかしながら、精度を保証するには、機器の抵抗測定値を正確に校正し、温度を測定するために以前に校正したサーミスタ (Steinhart-Hart 係数を入力) を使用する必要があります。

また、GPIB を介して温度を照会しない限り、測定器の温度分解能によって精度が低下します。

安定性と精度

真の温度との差異である温度精度は、主にサーミスタの校正に依存します。

設定温度からの不変性である温度安定性は、コントローラーの設計とサーミスターおよび TE モジュールの環境に依存します。

LDT-5948 または 5980 を使用すると、 0.001°C 以上の短期的な温度安定性を達成できます。

多くの場合、サーミスタの製造元が R-T 値を提供しますが、これらの値の精度はサーミスタの抵抗許容値に依存します。

高温耐性が必要な場合は、これらの R-T 値を破棄し、以下で説明するように新しい値を測定することをお勧めします。

一部のアプリケーションでは、公称R-Tデータで十分であり、以下に説明する「より高速な方法2」を使用してSteinhart-Hart定数を計算できます。

ILX Model 520の未校正サーミスタには、次の3項の公称定数値が付属しています。

$$C1 = 1.125$$

$$C2 = 2.347$$

$$C3 = 0.855$$

LDT-5525で使用するための2項の名目定数は次のとおりです。

$$C1' = 0.99$$

$$C2' = 2.57$$

Steinhart-Hart定数の計算手順

新しいサーミスタの定数を計算するには、予想される動作範囲をカバーするいくつかの異なる温度でそのサーミスタの温度と抵抗を測定する必要があります。

次の手順では、公称温度を設定および制御するための何らかの方法と、温度を参照するための校正済みの精密サーミスタが必要です。

すべての方法で、定数の最終的な精度は温度および抵抗測定の精度に依存することに注意してください。

サーミスタが校正された温度範囲外で使用されると、制御温度の許容値は急速に低下します。温度と抵抗の値は、サーミスタの意図された動作範囲よりも広い範囲にわたって、等間隔の増分で作成する必要があります。

1. 公称温度を設定し、安定させる。
2. 高精度DMM（最低4桁の精度）を使用して、基準サーミスタと未校正のサーミスタの抵抗を読み取ります。
3. 新しい公称温度に変更する前に、抵抗を3回読み取ります。
方法1を使用する場合は3つの読み取り値を平均化できます。方法2または方法3を使用する場合はすべての読み取り値を使用できます。
4. 方法1を使用する場合は、合計3つの温度設定で手順1～3を繰り返します。
方法2または方法3のいずれかについて、実用的な回数だけ測定を繰り返します。これらの2つの方法は、最小二乗適合を使用して定数を決定し、より多くの測定を行うとより正確になります。
5. 摂氏温度での「真の」温度は、精密サーミスタの定数と、以下の式4に示す式1の逆数を使用して決定できます。

$$(4) T = (C_1 + C_2 * \ln(R) + C_3 * \ln(R)^3)^{-1} - 273.15$$

近似Steinhart-Hart方程式である方法3を使用する場合、式5を使用して定数C3を使用する項を無視します。

$$(5) T = (C_1 + C_2 * \ln(R))^{-1} - 273.15$$

6. 式4を使用して計算された「真の」温度と、未校正のサーミスタから測定された抵抗の2つの列を持つ表にデータをコンパイルします。

このデータを表1にリストされている3つの方法のいずれかで使用して、新しいサーミスタの3つのSteinhart-Hart定数を決定します。

(T)	(R)
-0.01	32444
14.99	15534
...	...
...	...
25.01	9864
36.95	5936
50.10	3560
0	-1

Steinhart-Hart定数計算の3つの方法

方法1、STEIN1.EXE

STEIN1.EXEは、次から直接実行できます。
Windows環境またはExcelスプレッドシートを使用できます（プログラムリストについては、付録を参照してください）。3つの温度と抵抗値が入力され、定数値が返されます。定数値のいずれかが負の場合、エラーが発生しているため、データを確認または再測定する必要があります。

定数は、以下に示すようにそれぞれスケールリングすることにより、ILX温度コントローラーが使用する形式で出力されます。

$$(6) C1 = C_1 * 10^3$$

$$(7) C2 = C_2 * 10^4$$

$$(8) C3 = C_3 * 10^7$$

プログラムまたはスプレッドシートはこのスケールリングを実行するため、出力値は温度コントローラーに直接入力できます。

方法2、STEIN2.EXE

STEIN2.EXEは最小二乗適合誤差の削減を使用するため、適切な適合のためにR-T曲線を調整するには、より多くの温度/抵抗測定値を取得する必要があります。

データは、図2に示す形式でASCIIデータファイルに入力する必要があります。

Figure 2. Data format for STEIN2.EXE.

温度と抵抗の測定値は1つのスペースで区切る必要があります、ファイルは「-1」の抵抗測定値で終了する必要があることに注意してください。

データファイルをExcelで作成し、「.PRN」ファイルとして保存して、データがスペースで区切られていることを確認できます（データがタブで区切られている場合、プログラムは正しく機能しません）。

定数は、ILX温度コントローラーで必要な形式で出力されます。

または、EasySTEIN2.EXEと呼ばれるプログラムを使用できます。

このプログラムは、個別のデータファイルを使用するのではなく、データを直接入力するように要求します。STEIN2.EXEと同様に、定数は温度コントローラーに直接入力される形式で出力されます。

一定の不確実性も計算され、表示されます。

どちらのプログラムも、Philip R Bevingtonが「物理科学のデータ削減とエラー分析」、McGraw-Hill、ニューヨーク、1969で説明した方法を使用します。行列反転は、N連立方程式を解くために使用されます。データファイル内（マーカーを除く）。

係数C1、C2、およびC3は、データに対する曲線の適合度の尺度である X^2 を最小化することによって決定されます。

より高速な方法2

前述のように、一部のメーカーは、サーミスタで公称R-T値を提供しています。特定の用途で高温制御の許容値が必要ない場合、「公称」のSteinhart-Hart定数値は、メーカーのR-T値から方法2で計算できます。

温度誤差は、式(4)を使用して、「公称」定数値と公差定格のワーストケース抵抗値を使用して計算できます。

このエクササイズの結果は、図3に1%と5%の公差のサーミスタで示されています。

誤差は、C1、C2、およびC3を導出するときの抵抗許容誤差に基づいた温度の不確実性です。抵抗測定の不確実性に基づく追加の誤差は含まれていません。

図3に示すように、50°C未満では、5%の許容誤差10kΩのサーミスタでこの誤差は約±1.5°C未満です。標準的な許容誤差1%の10kΩサーミスタの誤差は、50°Cで±0.6°Cよりも優れています。

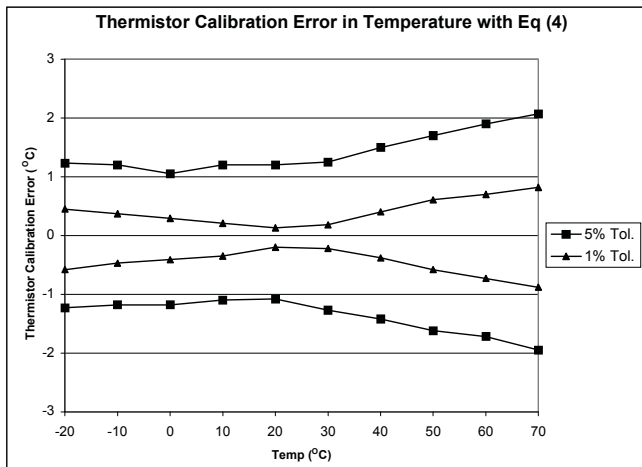


Figure 3. サーミスタのキャリブレーションエラーによる温度誤差。

方法3、STEIN3.EXE

方法2と同様に、3番目の方法は最小二乗適合誤差の削減を使用して、良好な適合のためにR-T曲線を調整します。このメソッドは、最初の2つのSteinhart-Hart定数のみが使用される場合に使用することを目的としています。

R-Tデータは、方法2で説明した方法と同じ方法で収集およびフォーマットされますが、STEIN3.EXEというタイトルのプログラムが使用されます。

方法2と同様に、サーミスタの製造元から提供された公称R-T値を入力し、STEIN3.EXEを実行することにより、方法3を使用したより高速な方法を実行できます。

結果の「公称」Steinhart-Hart定数値は、LDT-5525に入力できます。温度誤差は、「公称」定数値と公差定格のワーストケース抵抗値を使用して式5を使用して計算できます。

図4に示すように、50°C未満では、5%許容誤差10kΩサーミスタの場合、この誤差は約±2°C未満です。標準的な許容誤差1%の10kΩサーミスタの誤差は、50°Cで±0.8°Cよりも優れています。

図4は、式5を使用するときモデルLDT-5525温度コントローラーで使用される、モデル510 (10kΩ) サーミスタのキャリブレーションに関連する誤差も示しています。繰り返しますが、これには抵抗測定の誤差は含まれません。

LDT-5525を使用した温度のサーミスタキャリブレーションエラー

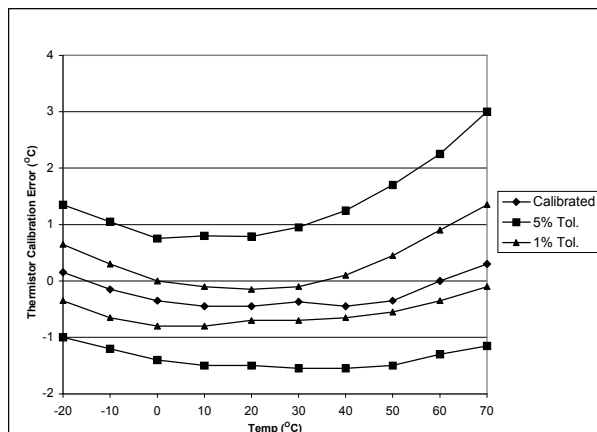


Figure 4. サーミスタのキャリブレーションエラーによる温度誤差。

結論として

サーミスタのキャリブレーションは難しくありませんが、時間がかかる場合があります。したがって、最初にアプリケーションの要件を決定し、次に適切な校正方法を選択するのが最善です。このアプリケーションノートで説明されている方法を表2にまとめます。

Table 2
サーミスタ校正の概略

*ILX Lightwaveモデル37xxおよび39xxレーザーダイオードコントローラーでも使用されます。

	Method 1	Method 2	Method 3	Method 2	Method 3
Data Points	3	>3	>3	R-T provided by mfg	R-T provided by mfg
Method	Three-point fit	Least-Squares fit	Least-Squares fit	"Nominal" calculation	"Nominal" calculation
Model	Equation (1)	Equation (1)	Equation (2)	Equation (1) Equation (4)	Equation (2) Equation (5)
Program	STEIN1.EXE or Excel	STEIN2.EXE	STEIN3.EXE	STEIN2.EXE	STEIN3.EXE
Accuracy	± 0.05 °C	± 0.01 °C	± 0.3 °C	± 0.01 °C	± 0.01 °C
Instrument	LDT -5948/80*	LDT -5948/80*	LDT -5525	LDT -5948/80*	LDT -5525

サーミスタの精度は主にサーミスタのキャリブレーションと抵抗測定の精度の関数ですが、温度の安定性はコントローラと制御環境に依存します。

サーミスタの選択の詳細については、ILX Lightwave Application Note # 2、温度制御用サーミスタの選択と使用を参照してください。

プログラムのコピーは、www.ilxlightwave.comのダウンロードセクションからILXから無料で入手できます。

APPENDIX - Method 1 Excel Spreadsheet

Type in the equations as shown. Temperature readings are entered in Cells C3-C5; Resistance readings are entered in Cells F3-F5. The results are shown in Cells F9-F11, and are scaled so they may be entered into the LDT-5910B directly.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2			Enter Temperature Values Here			Enter Resistance Values Here	
3		T1 =	<i>T1</i>		R1 =	<i>R1</i>	
4		T2 =	<i>T2</i>		R2 =	<i>R2</i>	
5		T3 =	<i>T3</i>		R3 =	<i>R3</i>	
6							
7		T1K =	=C3+273.15				
8		T2K =	=C4+273.15			Results are shown here	
9		T3K =	=C5+273.15			C3 = =C22*10000000	
10						C2 = =C23*10000	
11		A1 =	=LN (F3)			C1 = =C24*1000	
12		A2 =	=LN(F4)				
13		A3 =	=LN(F5)				
14							
15		Z =	=C11-C12				
16		Y =	=C11-C13				
17		X =	=1/C7 - 1/C8				
18		W =	=1/C7 - 1/C9				
19		V =	=C11^3 - C12^3				
20		U =	=C11^3 - C13^3				
21							
22		C3a =	=(C17-C15*C18/C16)/(C19-C15*C20/C16)				
23		C2a =	=(C17-C22*C19)/C15				
24		C1a =	=1/C7-C22*C11^3-C23*C11				
25							

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

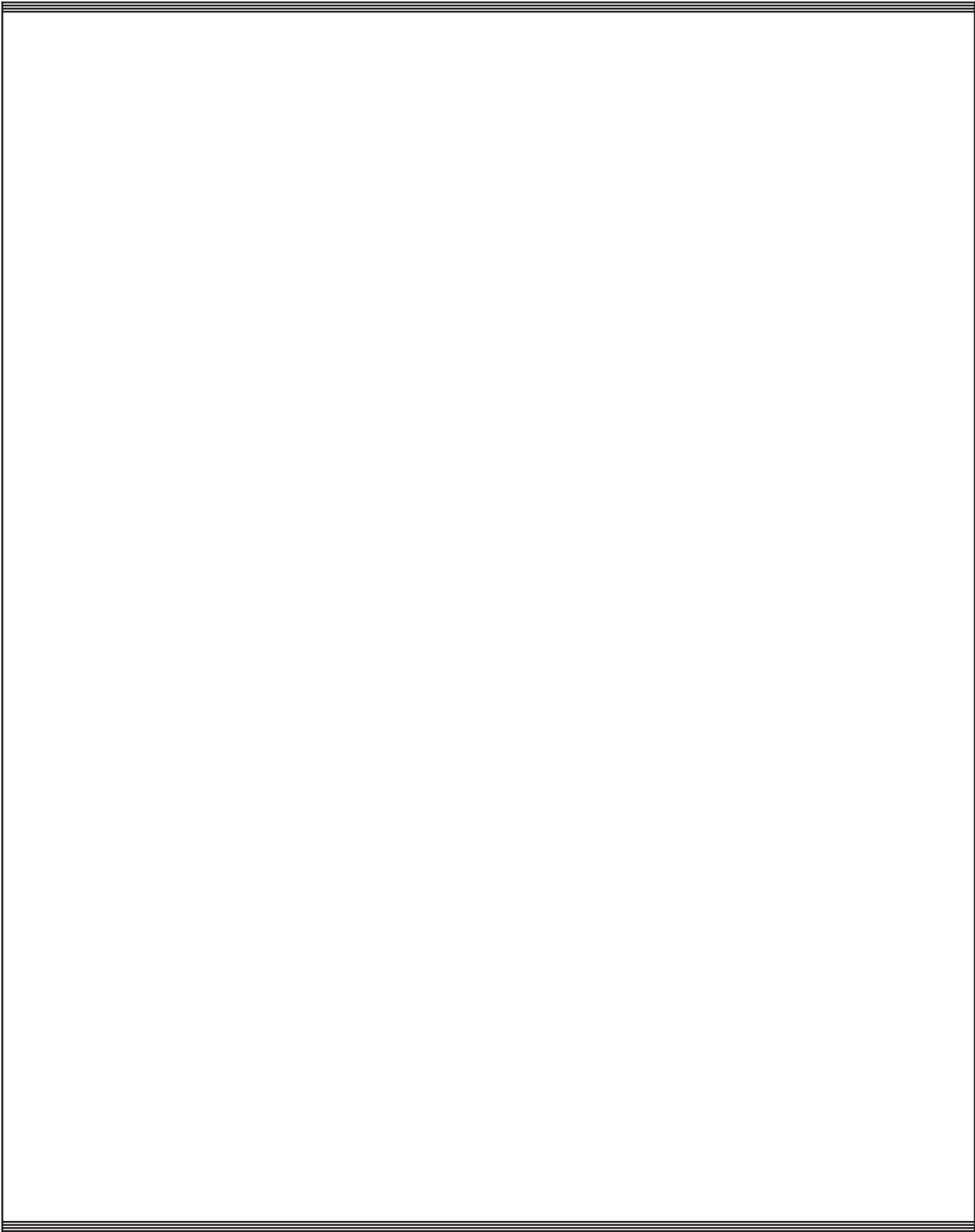
Technical Notes

- 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

