

光テストセット

Optical Test Set

UDC 535-15 : 621.317.78 : 681.7.069.24/.3

杉本 隆
市川 和一
井川 考人
坂本 英之

Takashi Sugimoto
Kazuichi Ichikawa
Kouji Igawa
Hideyuki Sakamoto

計測器事業本部 計測器事業部 第4開発部
計測器事業本部 計測器事業部 第4開発部
計測器事業本部 計測器事業部 第4開発部
計測器事業本部 計測器事業部 第4開発部

1 まえがき

インターネットを中心とするコンピュータ間通信の需要が増大したのに伴い、通信容量の拡大が世界的な緊急課題になっている。その解決手段として、波長分割多重（WDM：Wavelength Division Multiplexing）技術が鍵を握っており、基幹系光通信システムにおいて、1波あたりの伝送速度を2.5Gbit/sもしくは10Gbit/sをベースとするWDM方式の研究・開発が進められている。欧米では既に実用化が進んでおり、国内でも採用の動きが活発になっている。

このWDM市場では、①高安定な光源、②WDM対応波長光源、③高精度光パワー測定、が要求される。また、汎用光測定市場でも、①、③は強く要求され、従来機種より高性能・多機能な基本測定器が必要とされている。

以上の要求に対応するため、今回、光テストセット（MT9810A）と、光源および光センサユニットを開発した。光テストセットの外観を図1に示す。

2 開発の基本方針

新しい光テストセットを開発するにあたり、設計上、特に留意した点を以下に示す。

2.1 光基礎測定器のプラットフォーム構築

プラグインユニット方式を採用し、さまざまな用途に対して最適なユニットを提供できる形態をとる。また、機能・性能を各ユニット単体で完結させ、本体に新しいユニットを逐次追加できるようにする。これらにより、光減衰器ユニットや光チャネルセレクトユニットなどを随時開発することにより、基本光測定器をすべてカバーできる構成をとる。

2.2 基本性能の向上

光源、光パワーメータとしての基本性能を向上させる。具体的項目は以下の通り。

- (1) 光源：光出力レベル、光出力安定度、波長安定度
- (2) 光センサ：光パワー測定範囲、光パワー測定精度、光パワー測定リニアリティ

2.3 WDM対応

WDMに使用する光源の光周波数（波長）に関しては、ITU-Tで勧告がなされている。ITU-T勧告では、192.1THz（1,560.61nm）から196.1THz（1,528.77nm）まで、最小100GHz（約0.8nm）間隔の光周波数が規定されている。さらに近年、WDM用波長は前述の光周波数帯（C Band）以外にも、186THzから190THz付近（L Band）の光周波数帯に拡張される傾向がある。そこで、C BandからL Bandまで100GHz間隔でカバーした光周波数を持つ光源を開発する。

3 機器の構成

光テストセットの本体、および光源、光センサユニットの

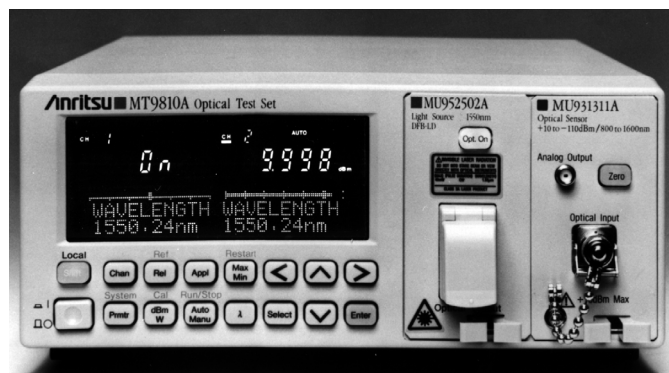


図1 MT9810Aの外観
External view of optical test set

ブロック図をそれぞれ図2, 3, 4に示す。光テストセットは本体とプラグインユニットで構成される。本体には2つのユニットが装着可能であり、幅213mm、高さ88mm、奥行き351mmと小型である。今回開発したユニットは、光源5種類（1,550nm帯DFB-LD、1,600nm帯DFB-LD、1,310nm FP-LD、1,550nm FP-LD、1,310/1,550nm FP-LD）とセンサ2種類（高感度、汎用）である。DFB-LD光源ユニットは、光周波数（波長）をオプション指定できる。光源の出力はレーザ製品安全規格（IEC 60825-1、21CFR1040.10）に基づいた光出力制御を採用し、レーザ放射に対して使用者を保護できる構造にした。光テストセットの外部制御機能としては、RS-232C（EIA-232-E）または GPIB（IEEE488.2）による外部コンピュータからの制御用インターフェースを装備した。

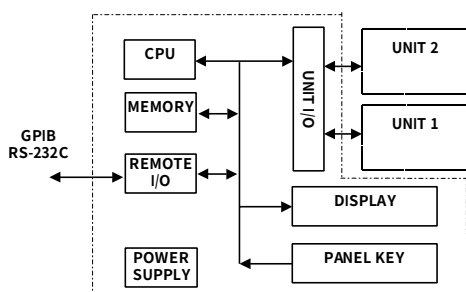


図2 本体のブロック図
Block diagram of main frame

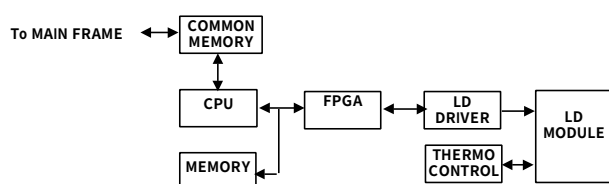


図3 光源ユニットのブロック図
Block diagram of light source unit

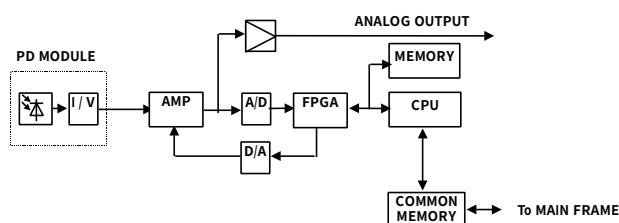


図4 光センサユニットのブロック図
Block diagram of optical sensor unit

4 設計の要点

4.1 全体

光テストセットは、ユニットを順次開発していくことによって、用途を拡張できる汎用測定器であり、将来追加されるユニットの操作にも対応できることが必要となる。そのため、ユニット内にCPUとフラッシュメモリを搭載して、ユニットでデータ処理やソフトウェアのバージョンアップなどを行えるようにし、ユニット毎の機能・性能をユニット単位で完結させた。

ユニットのCPUはユニット内部の設定・処理のほか、本体とCPU間通信を行う。また、ユニットのフラッシュメモリは本体のリモートコントロールを介して書き換え可能である。これによって、ユニットのソフトウェアのバージョンアップが容易になる。

光テストセットの主用途は光信号の供給とレベル測定である。この市場では、小型であることが強く要求されるので、小型化を念頭に設計を行った。処理の中心となるCPUには部品の削減と処理の高速化のため、RISC（Reduced Instruction Set Computer）方式のワンチップマイクロコンピュータを使用した。プラグインユニットには回路集約のためFPGA（Flexible Programmable Gate Array）を使用した。

波長について、主にWDMの分野では、光周波数として周波数表記する場合が多い。そこで、光周波数と波長のどちらでも表示できるようにした。

4.2 本体

本体は電源部、表示部、処理部、インターフェース部から構成される。

電源部は100V系/200V系のいずれの電圧でも使用でき、電源電圧を設定する必要がないものを選択した。

表示部は蛍光表示管を新規に開発した。汎用のドットマトリクス表示装置を使用すればどのような表示も可能であるが、表示内容が数値に限定されることと、表示を大型化し見やすくするために専用の表示装置を開発した。今回開発した表示装置は、上半分は数値表示、状態表示、および単位表示の専用表示とし、下半分は汎用性を考慮してドットマトリクスにした。

パネルのキーは部品点数の削減と省スペースのためにラバースイッチを使用した。このラバースイッチを表示装置と一体化し、省スペース化を実現した。一部のラバーには全体を

光らせる構造を採用し、外部制御の状態（リモート/ローカル）や光源の出力状態を明確に表示するようにした。

処理部は、CPU、ROM、RAMおよびI/Oから構成され、データの演算・記憶・通信・表示を処理する光テストセットの中核部分である。CPUには前述の通り、RISC方式のものを使用した。

インターフェース部は外部から制御するためのケーブルまたはユニットを接続する。外部制御用インターフェースとしては、GPIB、RS-232Cを持つ。また、レーザ製品安全規格で要求されているリモートインターロックコネクタ、および光出力制御キースイッチもインターフェース部に装備した。

4.3 光源

光源は主に、CPU、メモリ、FPGAを含む制御部、温度制御部、光の出力レベルを制御するAPC（Auto Power Control）部から構成される。

光源は、WDM用光源と、光デバイスの性能試験等に使用できる汎用光源、の2種類を開発した。WDM用光源には、発光デバイスにDFB-LDを使用した。また、汎用光源には、FP-LDを使用した。

WDM用光源の光周波数（波長）はITU-Tの勧告に対応し、顧客が必要とする光周波数を供給できるようにした。光周波数の違いに光学モジュールのみで対応するため、その他のハードウェアやソフトウェアは共通化できた。

また、DFB-LD光源では、LDの温度を制御して $\pm 60\text{GHz}$ （約 $\pm 0.5\text{nm}$ ）の範囲で光周波数を変えられるようにした。これにより、光周波数の微調整や、ITU-Tグリッド光周波数の近辺での性能試験に使用可能となった。

光源の出力レベルはPDS（Passive Double Star）による損失を補うために、 $+10\text{dBm}$ 程度の出力が必要である。そこで、DFB-LD光源では $+10\text{dBm}$ （ 10mW ）、FP-LD光源では $+7\text{dBm}$ （ 5mW ）を実現した。また、出力レベルはLDの電流を制御して -6dB （ 25.1% ）まで可変できるようにした。

光源の出力の高安定化は高出力化と並んで重要な性能である。高安定度を実現するためには、ドライバ回路と光学系が安定していることが必要である。そのうち、後者の安定度がレベル安定度に対して支配的であり、LDモジュールの温度制御に大きく依存する。そこで、LDモジュールから発生する熱をユニットのケースに放熱する構造にすることにより、短期で $\pm 0.005\text{dB}$ （ $\pm 0.0115\%$ ：一定温度、15分間）、長期で $\pm 0.02\text{dB}$ （ $\pm 0.46\%$ ：一定温度、6時間）という安定度を実現した。

現した。

LDモジュールの温度制御は、光源の波長安定度にも影響する。前述のような対策を行うことにより、短期で $\pm 2\text{GHz}$ （一定温度、15分間）、長期で $\pm 4\text{GHz}$ （一定温度、6時間）の安定度を実現した。

光コネクタについては、他機種でも実績のある交換可能光コネクタを採用した。これにより、FC-PC、ST、DIN、HMS-10/A、SCの各コネクタについて、ユーザ交換で簡単に対応できる。

4.4 光センサ

4.4.1 高感度化、低リターンロス

光センサの最低受光感度を悪化させる1つの原因としてPD（Photo Diode）のノイズがある。これを抑えるために、冷却型のPDを使用することは一般的によく知られている。高感度光センサでは -100dBm 以下の光レベルを測定することを目指した。 -100dBm 以下の光を測定するためには、温度上昇によるジョンソンノイズの影響だけでなく、外部からのノイズの影響も抑えなければならない。そこで、高感度光センサでは、ノイズレベルを低減し、高感度測定を実現するために、I/V変換器とPD、帰還抵抗の一部をバタフライ型のパッケージに気密封入した。これにより外部からのノイズの影響を低減した。さらに、パッケージ内部にサーミスタ、ペルチェ素子を内蔵し、PDモジュール自体を冷却することで、ノイズ帯域幅 1Hz 、ピーク・トゥ・ピークで約 -100dBm までノイズレベルを低減させることができた。図5に、高感度光センサに使用したPDモジュールの外観を示す。

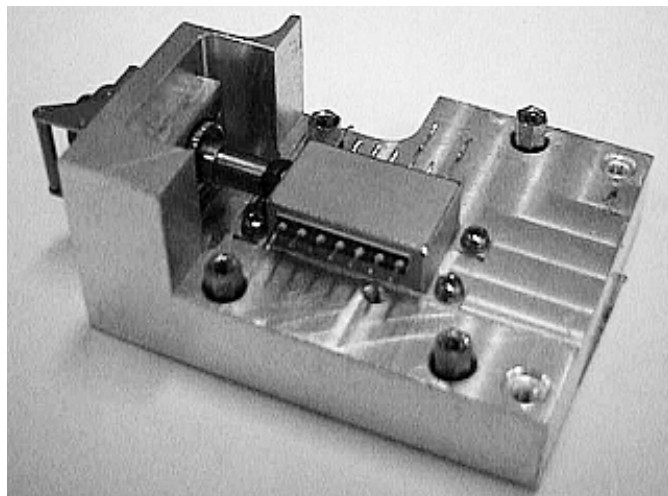


図5 PDモジュールの外観
External view of PD module

また、汎用型光センサも含め、被測定光ファイバとの結合部に片端斜研磨フェルールを使用することにより、PDモジュール内部からの反射を抑え、低反射（反射減衰量40dB以下）を実現した。

4.4.2 偏波依存性損失

偏波依存性損失（PDL：Polarization Dependent Loss）は、すべての偏光状態が光センサに入力されているときの、PD出力の最大値および最小値の差で示される。近年、PDLは光コンポーネントの重要なファクタとなっている。

今回開発した2種類の光センサは低反射を実現するために、片端斜研磨フェルールを使用しているが、このフェルール斜研磨面でPDLが発生する。また、PD素子自体にもPDLがあり、これはPD素子生成中に結晶軸が形成されるためにPDLが発生すると考えられている。

これらのPDLを減らすために、斜研磨フェルールに対しPDを傾け、フェルール斜研磨面にPDの結晶軸を合わせることで、それぞれのPDLを打ち消し、PDL値0.02dB以下を実現した。

4.4.3 高確度化

光センサの測定確度（不確かさ）は、光のパワーを正確に測定する上で非常に重要なファクターである。光パワーは国家標準からの校正体系、すなわちトレーサビリティが確立されている。当社では、国家標準から製品まで、企業内標準を介した校正連鎖を構成したトレーサビリティ体系を構成し、国家標準にトレーサブルな光パワーメータを供給している。

光パワーメータの校正については、IECやJISなどで規格化されている（IEC61315、JIS C 6184）。この規格では、国家標準から製品に至る各校正段階において生じる誤差が、次の校正段階に次々と累積される。したがって、光パワーメータの確度を向上するには、国家標準器から最小限の誤差でトレース（校正）することが必要になる。

そこで、IECおよびJISの規格に則り、社内標準器からの高確度なトレースを目指して開発を行った。前述のように、確度を向上させることは、誤差の縮小にほかならない。確度に影響する誤差要因はさまざまである。本開発では、安定度、偏波依存性、コネクタ結合部の再現性の各性能を向上、また、光センサ内部の反射を抑えることによってトレーサビリティの向上を行い、基準状態で確度 $\pm 2\%$ を実現した。

また、正確な測定を行う上で重要であるリニアリティについては、受光増幅器系の見直しや、PD自体のリニアリティを検証することで、 $\pm 0.01\text{dB}$ のリニアリティを実現した。

4.4.4 帯域設定

光パワー測定としては、従来は連続光や決まった変調周波数（270/1k/2kHz）の変調光測定が主であった。そのため、従来の光パワーメータでは、測定安定度を達成できる直流増幅器の帯域幅に固定されていた。しかし、光パワーメータの用途としては、パルス光のアベレージ測定、高速パワー変動の測定、低レベル測定等、さまざまであり、これらの測定に最適な直流増幅器の帯域幅も異なってくる。高速のパワー測定では、直流増幅器の帯域幅を広くすればするほど、測定応答時間が速くなり、高速パワー測定が可能になる。一方、低レベル測定では、直流増幅器の帯域幅を狭くすればするほど、ノイズレベルを下げることができ、高感度測定を実現できる。そこで、今回開発した光センサでは、直流増幅器の帯域幅を設定できるように設計した。高感度光センサで0.1Hz～100kHz、汎用光センサで0.1Hz～10kHzまで10倍ステップで帯域幅を変えることができ、上記のようなさまざまな光パワー測定が可能となっている。

5 主な特性

5.1 光源

5.1.1 光出力安定度

図6に、DFB-LD光源（MU952501A）の光出力安定度を示す。規格は $\pm 0.005\text{dB}$ 以内であるが、実力はこの図のように、 $\pm 0.002\text{dB}$ 程度であることがわかる。

5.1.2 光周波数安定度

図7にDFB-LD光源（MU952501A）の光周波数安定度を示す。この場合も、規格（ $\pm 2\text{GHz}$ 以内）に対し、実力は $\pm 0.05\text{GHz}$ 程度と安定しており、WDM試験用光源として最適である。

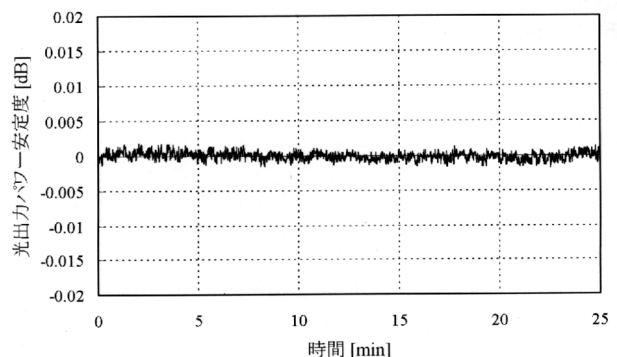


図6 DFB-LD光源の光出力安定度
Optical output stability of DFB-LD light source

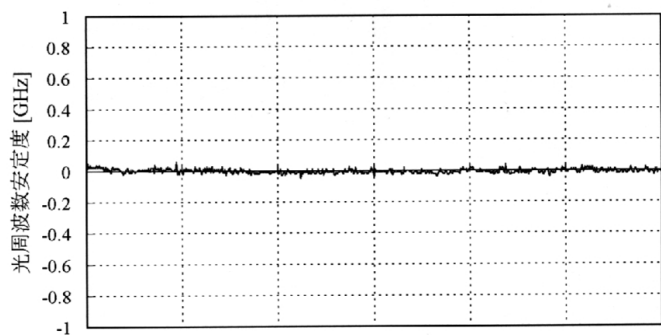


図7 DFB-LD光源の光周波数安定度
Optical frequency stability of DFB-LD light source

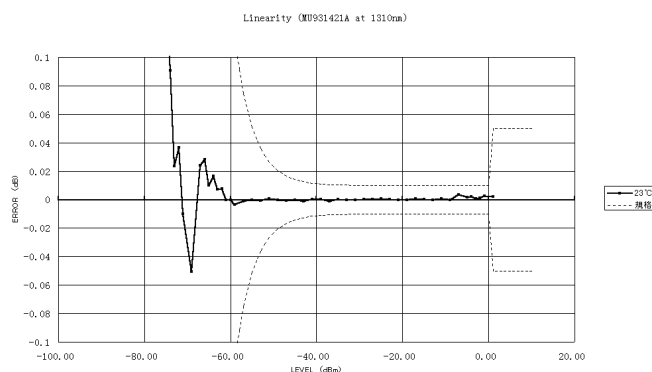


図8 光センサのリニアリティ
Linearity characteristics of optical sensor

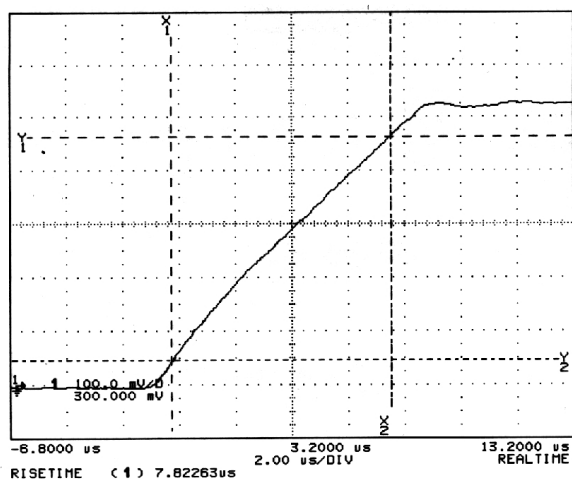


図9 光センサのアナログ応答
Analog response of optical sensor

5.2 光センサ

5.2.1 リニアリティ

図8に汎用光センサのリニアリティを示す。

5.2.2 アナログ出力応答

図9に高感度光センサのアナログ応答を示す。高感度光センサは帯域を100kHzまで設定できるため、約10 μ sの応答速

度で光パワーの変動を測定できる。

6 規格

光テストセットの本体、光源ユニットおよび光センサユニットの規格を表1に示す。

表1 光テストセットの規格
Specifications for optical test set

形 名	MT9810A
収納ユニット数	最大2個
表示器	蛍光表示管：7セグメント（5-1/2桁）、2画面 ドットマトリクス（138×20ドット） 専用セグメント（AUTO, AVG, MOD, CAL, SYS, PRMTR, APPL, REMOTE）
表示範囲	199.999～+199.999dBm, $\pm 0.0001\text{pW} \sim \pm 10,000\text{W}$
表示分解能	dBm：0.001, 0.01, 0.1 dB：0.001, 0.01, 0.1 W：5桁
システム設定項目	リモート制御の選択：GPIO, RS-232C GPIOパラメータ設定：アドレス RS-232Cパラメータ設定：データ長, パリティビット, 転送速度 ブザー音量調整：4段階 輝度調整：9段階 日付・時刻設定：年, 月, 日, 時, 分, 秒（24時間表示）
機 能	総 合 設定条件記録：最大10個（各チャンネル） 設定状態コピー 制御対象チャンネルの選択 光センサ使用時 バーグラフ表示：60ドット 記録測定：各チャンネル最大1,000個のデータを記録可能 演算：チャンネル間差表示, 最大値-最小値表示, 相対値表示（相対値基準, 数値入力）, 校正値補正
外部制御	GPIO, RS-232C
光安全保護機構	リモートインターロック, キー制御
環境条件	動作温度・湿度：0～+50℃, $\leq 90\%$ （結露なきこと） 保存温度：-25～+71℃
寸法・質量	213(W), 88(H), 351(D) mm, $\leq 3.5\text{kg}$ （ユニットを除く）
電 源	AC100～120/200～240V（+10%, -15%）, $\leq 70\text{VA}$, 47.5～63Hz

表1 光テストセットの規格（続き）
規格（ユニット）

光源	形 名	MU952501A/02A/ 03A/04A/05A	MU952601A/02A/ 03A/04A/05A/06A	MU951301A	MU951501A	MU951001A
	発光素子	DFB-LD			FP-LD	
	適合ファイバ	SM ファイバ (ITU-T G.652)				
	波長/光周波数 (fp)* ¹	191.7～195.9THz (1,563.86～1,530.33nm)	186.3～191.6THz (1,609.19～1,564.68nm)	1,310±20nm	1,550±20nm	1,310±20nm 1,550±20nm
	スペクトル半値幅* ¹	≦30MHz		≦5nm	≦10nm	≦5nm/10nm
	光出力* ¹	+10±1dBm	+7±1dBm	+7±1dBm		
	光出力安定度 時間安定度 (短期)* ^{1*2*3} 時間安定度 (長期)* ^{1*2*4} 温度安定度* ^{1*2*5}	≦±0.005dB ≦±0.02dB ≦±0.25dB	≦±0.01dB ≦±0.02dB ≦±0.25dB	≦±0.002dB ≦±0.02dB ≦±0.1dB		≦±0.005dB ≦±0.05dB ≦±0.15dB
	光周波数安定度 時間安定度 (短期)* ^{1*3} 時間安定度 (長期)* ^{1*4}	≦±2GHz ≦±4GHz		— —	— —	— —
	光出力減衰機能	減衰量：0.00～6.00dB, 0.01dB ステップ, 確度：≦±0.5dB				
	内部変調機能	周波数：270Hz, 1kHz, 2kHz ±0.1%, デューティ：50±5%, 消光比：≧13dB				
	光周波数可変機能	可変範囲：fp±60GHz, 1GHz ステップ 確度：≦±10GHz		—	—	—
	ウォームアップ時間	1時間 (光出力ON後)				
	光コネクタ	FC-PC, ST, DIN, HMS-10/A, SCに対応				
	レーザ製品安全規格	IEC60825-1：クラス3A, 21CFR1040.10：クラスⅢb				
	環境条件	動作温度・湿度：+15～+35℃, ≦90% (結露なきこと) 保存温度：-25～+71℃		動作温度・湿度：0～+50℃, ≦90% (結露なきこと) 保存温度：-25～+71℃		
	寸法・質量	41(W), 78(H), 335(D) mm, ≦700g				
光 セ ン サ	形名	MU931311A		MU931421A		
	受光素子	InGaAs-PD				
	入力形式	ファイバ入力				
	波長範囲	800～1,600nm		750～1,700nm		
	光パワー測定範囲* ⁶	連続光：+10～-110dBm 変調光：+7～-90dBm		連続光：+10～-80dBm 変調光：+7～-90dBm		
	ノイズレベル* ⁷	-93dBm		-73dBm		
	偏波依存性* ⁸	≦0.02dB				
	反射減衰量* ⁸	≧40dB				
	基準条件での測定確度* ⁹	±2%				
	動作条件での測定確度* ¹⁰	±3.5%				
	リニアリティ* ¹¹	±0.05dB (+10～0dBm) ±0.01dB±0.3pW (0～-90dBm)		±0.05dB (+10～0dBm) ±0.01dB±30pW (0～-70dBm)		
	校正係数入力	-99.999～+99.999dBを入力可能				
	波長感度特性補正	測定波長を0.1nm単位で入力可能				
	ゼロセット動作	ゼロ点の自動補正				
	レンジ切換	AUTO/MANUAL				
	変調光受光	CW/MODの切換, MOD：270Hz, 1kHz, 2kHz				
	測定インターバル* ¹²	1, 10, 20, 50, 100, 200, 500ms, 1s～99h59min59s				
	アベレージ設定	OFF, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1,000回				
	アナログ出力* ¹³	約+2V				
	帯域切換* ¹⁴	AUTO, MANUAL MANUAL：0.1, 1, 10, 100Hz, 1k, 10k, 100kHz (CWモードのみ)		AUTO, MANUAL MANUAL：0.1, 1, 10, 100Hz, 1k, 10kHz (CWモードのみ)		
	光コネクタ	FC-PC, ST, DIN, HMS-10/A, SCに対応				
	環境条件	動作温度・湿度：0～+50℃, ≦90% (結露なきこと) 保存温度：-40～+71℃				
	寸法・質量	41(W), 78(H), 335(D) mm, ≦700g		41(W), 78(H), 335(D) mm, ≦550g		

注：波長はすべて真空中の値。
* 1：連続光, 光減衰量0.00dB, SMファイバ (ITU-T G.652), FC-PCコネクタ使用時。
* 2：光源側から見た反射減衰量が40dB以上の時。
* 3：15min, 一定温度 (20～30℃内の一点)。
* 4：6h, 一定温度。
* 5：8h, +15～+35℃ (DFB-LD光源) または0～+50℃ (FP-LD光源)。
* 6：波長1,300nm。
* 7：測定インターバル100ms, アベレージ10回, ピーク・ピーク・ノイズ, 波長1,300nm。
* 8：SMファイバ (ITU-T G.652) を使用, 反射減衰量≥45dB, 波長1,550nm。
* 9：基準条件：SMファイバ (ITU-T G.652), マスタFCコネクタ使用。入力パワー100 μW (−10dBm), 連続光, 波長1,300nm, 周囲温度23±2℃, 校正当日, ウォームアップ時間1時間後 (MU931311A) / 30分後 (MU931421A)。
* 10：動作条件：SMファイバ (ITU-T G.652), マスタFCコネクタ使用。連続光, 波長1,000～1,600nm (MU931311A) / 1,000～1,650nm (MU931421A) の任意の一波長, 周囲温度23±5℃, 校正後1年以内, ウォームアップ時間1時間後 (MU931311A) / 30分後 (MU931421A)。
* 11：測定条件：23±5℃内の一定温度, 帯域幅設定Auto/0.1Hz/1Hz/10Hz, 連続光, 波長1,000～1,600nm (MU931311A) / 1,000～1,650nm (MU931421A) の任意の一波長, 入力パワー100 μW (−10dBm) 基準, ウォームアップ時間1時間後 (MU931311A) / 30分後 (MU931421A)。
* 12：測定インターバルが100ms以下は記録測定時のみ。
* 13：各測定レンジのフルスケール値。
* 14：約3dBの帯域幅。帯域幅を100kHzに設定時の応答速度は, アナログ出力の振幅によって異なる。

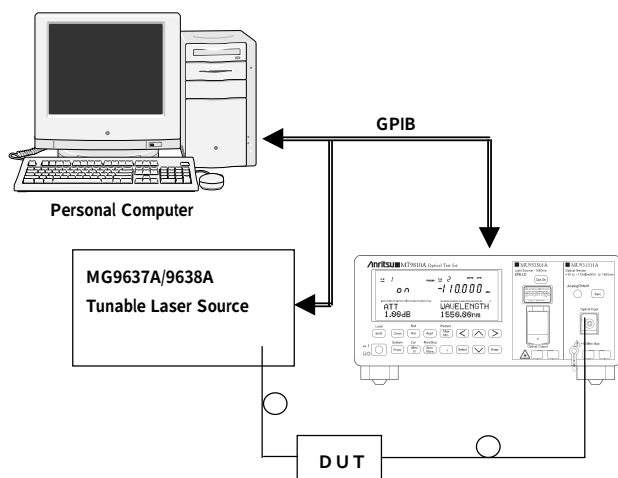


図10 WDM用デバイスの波長特性評価のシステム構成例
Evaluation system example of wavelength characteristics for WDM device

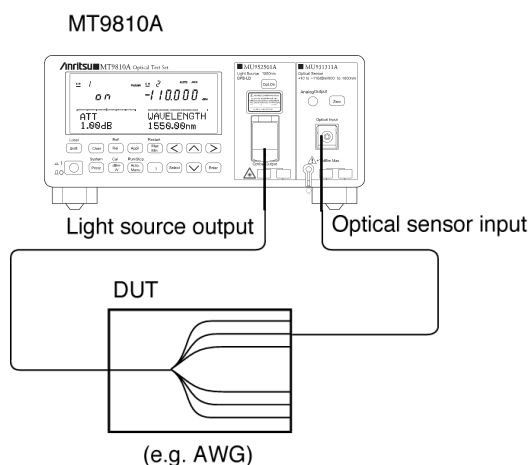


図11 挿入損失測定システムの構成例
Measurement system example of insertion loss characteristics

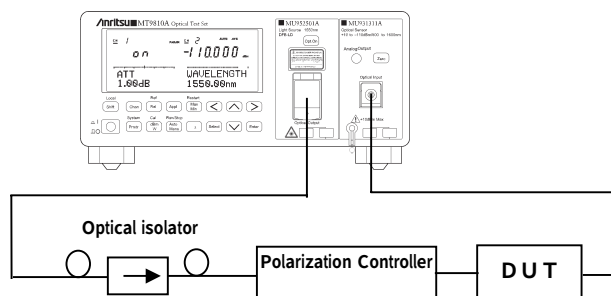


図12 偏波依存性損失測定システムの構成例
Measurement system example of polarization dependence loss characteristics

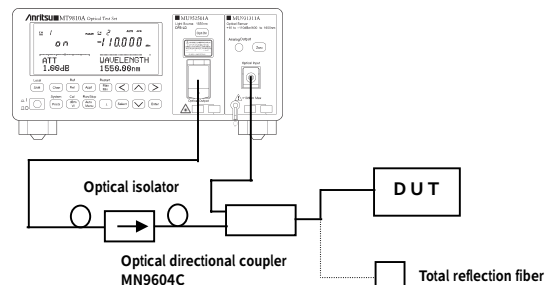


図13 リターンロス測定システムの構成例
Measurement system example of return loss characteristics

7 アプリケーション

光テストセットを使用したアプリケーション例を以下に示す。

7.1 WDM用デバイスの波長特性評価

図10にWDM用デバイスの波長特性評価のシステム構成を示す。

7.2 分波・合波デバイスの挿入損失測定

図11に光コプラやアレイ導波路回折格子（AWG）などの挿入損失測定システムの構成を示す。

7.3 偏波依存性損失測定

図12に光デバイスの偏波依存性損失（PDL）測定システムの構成を示す。

7.4 リターンロス測定

図13にリターンロス測定システムの構成を示す。

8 むすび

WDMを中心とした光通信市場や汎用光測定市場など、高精度測定を要求される分野に対応した光テストセットの開発を行った。新しい光テストセットは、「発展する基礎測定器」というコンセプトに沿って開発を行った。メインフレームは、さまざまな要求に対応したユニットを逐次供給できる構成にした。また、WDM用光源ユニットでは、ITU-Tグリッドに対応し、光出力+10dBm、光出力安定度±0.005dB以下、光周波数安定度±2GHz以下、高感度光センサでは、測定精度±2%（基準条件）、リニアリティ±0.01dB以下、光パワー測定範囲+10～+110dBmを実現した。

光テストセットは、光源、光パワーメータに留まらず、光減衰器や光チャネルセクタ等の単体基礎光測定器を統合するものである。したがって、今後は市場要求に応じて新規ユニットの開発を行う予定である。