

15. B. Dahmani, L. Hollberg, R. Drullinger, "Frequency stabilization of semiconductor lasers by resonant optical feedback," **Opt. Lett.** **12**, 876 (1987).
16. M. Gehrtz, C. G. Bjorklund, E. A. Whittaker, "Quantum-limited laser frequency-modulation spectroscopy," **JOSA B** **2**, 1010 (1985).
17. S. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Ito, T. Kimura, "Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers," **IEEE J. Quan. Elec.** **QE-18**, 582 (1982).
18. Z. Xiang, D. T. Cassidy, "Modulation spectroscopy with a semiconductor diode laser by injection-current modulation," **JOSA B** **14**, 1945 (1997).
19. S. Kasapi, S. Lathi, Y. Yamamoto, "Amplitude-squeezed, frequency-modulated, tunable, diode-laser-based source for sub-shot-noise FM spectroscopy," **Opt. Lett.** **22**, 478 (1997).
20. P. Lodahl, J. L. Srensen, E. S. Polzik, "High efficiency second harmonic generation with a low power diode laser," **Appl. Phys. B** **64**, 383 (1997).
21. S. Sayama, M. Ohtsu, "Tunable UV CW generation at 276-nm wavelength by frequency conversion of laser diodes," **Opt. Comm.** **145**, 95 (1998).
22. D. A. W. Klirer, J. P. Koplrow, L. Goldberg, "Narrow-band, tunable, semiconductor-laser-based source for deep-UV absorption spectroscopy," **Opt. Lett.** **22**, 1418 (1997).

さらなる情報

C. E. Wieman, L. Hollberg, "Using diode lasers for atomic physics," **Rev. Sci. Instrum.** **62**, 1, 1991.

M. D. Levenson, S. S. Kano, **Introduction to Nonlinear Laser Spectroscopy**, revised, Academic Press, Inc, 1988.

製品ラインナップ

- Vortex™ チューナブルレーザー
- Velocity™ 広範囲チューナブルレーザー
- 平衡型受光器
- Neutral Density (ND) フィルターホイール



ニューフォーカス アプリケーションノート #10

波長掃引実験：時間短縮および生産環境でのリアルタイムプロセス制御の実現

Swept-Wavelength Testing: Saving Time and Bringing Real-Time Process Control to the Manufacturing Environment

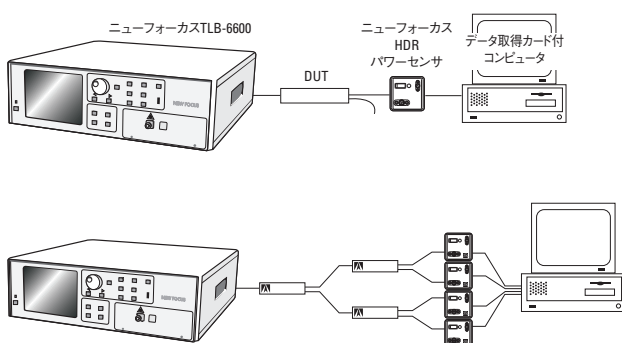
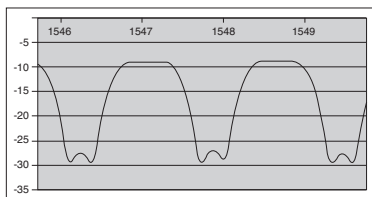


表1：3つの異なるMUX測定方法における代表的な所要時間。

図1：インターリーバーの実験システムには、波長掃引チューナブルレーザー、多重チャンネルデータ取得ボード、パワーセンサを使用します。図1aでは、このシステムを使用してデバイスのひとつのチャンネルを実験します。図1bでは、システムにインターリーバーとパワーセンサを追加することで、希望するチャンネル数まで実験システムを拡大していく方法を示しています。単純化のため、コンピュータとレーザーをつなぐGPIB接続はこの図では示していません。GPIB接続は、実験の開始、レーザーとコンピュータとの接続を開始するために使用され、規定の波長帯でのみデータを記録できるようにするものです。

スweep波長チューナブルレーザー P32参照
高ダイナミックレンジパワーセンサ P183参照

電気通信ネットワークの高い需要に対応するため、電気通信団体は絶えずその技術の開発を進め、より狭いチャンネル間隔や波長帯の拡大に向けて取り組んでいます。現時点で最新式の技術である、高密度WDM (DWDM) と呼ばれるシステムは、50 GHz (0.4-nm) という非常に狭いチャンネル間隔を使用しますが、多くの企業がすでにチャンネル間隔をさらに狭くするための議論を重ねています。さらに、当初のWDMシステムが1530 nmから1565 nmの波長帯に限られていたのに対し、新しい拡張型バンド対応エルビウム増幅器により、WDMシステムが1530 nmから1615 nmで動作することが可能になりました。

WDMチャンネル数が増加した結果、ネットワークコンポーネントを完全に特徴付けるために必要な時間と複雑さもそれに比例して増加しました。ネットワークコンポーネントとはマルチプレクサや利得平坦化フィルタなどであり、それらの多くが、対象となるチャンネルだけでなく、波長帯全体で特徴付ける必要があります。

WDMシステムのデバイスは、意図的に波長依存の光学特性を有しています。そのため、多くのWDMコンポーネントは製造中に中心（またはチャンネル）波長に正確に設定するか、その波長帯全体で挿入喪失を最低限に抑えるように最適化する必要があります。その一例が、ファイバブラッググレーティングデバイスまたはコート付のエタロンフィルタのいずれかをベースにしたマルチプレクサです。ファイバブラッググレーティングをベースとしたデバイスでは、回折格子にわずかな応力をかけることで中心波長を設定します。コート付のエタロンフィルタを使用するデバイスでは、オプティクスをわずかに傾けることで中心波長を調整します。歴史的に、広帯域光源と光スペクトルアナライザ (OSA) を使用する方法を使用して、製造中のコンポーネントの性能を監視しています。この方法は非常に高速ですが、DWDMシステムのチャンネル間隔と高いチャンネルカウントにより、これらのシステムの限界に達しようとしています。より高い分解能を達成するため、チューナブルレーザーと検出器を使用しますが、マルチプレクサ (MUX) の対象範囲にレーザーを配置することは、冗長な、時間のかかるプロセスですので、この方法はデバイスの最終試験にしか使用されません。

このアプリケーションノートでは、測定分解能を犠牲にすることなく、測定時間を大幅に短縮し、OSAの速度でレーザーの分解能を達成する新しい方法をご説明します。この方法では、波長は一定の速度で連続的に掃引され、その間に出力が記録されます。そのため、コンポーネントの調整時に起こる変化の観察に十分な速度の、非常に高い分解能のスペクトル図を得ることができます。この方法は明らかにDWDMコンポーネントの最終試験と品質管理のアプリケーションに使用できますが^{1,2}、それだけでなく、製造行程の間にその場実験を行えるため、DWDMコンポーネントの製造を改善する機会も生み出します。実際に、アセンブリ環境でリアルタイムの高分解能測定を行えるため、デマルチプレクサ、マルチプレクサ、およびその他のDWDMデバイスの製造を大幅に改善することができます。

波長掃引技術は、長年にわたり、RFおよびマイクロ波の業界で使用されてきました。ネットワークアナライザは、掃引光源とパワーメータを組み合わせたものを使い、周波数領域における挿入損失とリターンロスの特徴付けます。光学領域では、チューナブルレーザーが波長帯全体で連続的にスイープし、その間に出力が記録されます。そのため、極めて直線的で反復可能な走査のある、チューニング可能で、モードホップのないレーザーが必要です。この要件を満たすレーザーのひとつが、New Focus™ TLB-6600チューナブルレーザーです。このレーザーは、波長掃引測定に特定して設計されています。波長はCバンドとLバンドの両方をカバーし、極めて直線的な反復可能なモードホップのないチューニングをその波長帯全体で提供します。また、特許申請中の駆動部の設計により、極めて直線的で反復可能な走査を確保しています。さらに、電気トリガーの機能もあり、対象となるスペクトル領域に走査が達成すると、検出器をトリガーしますので、リアルタイムでコンポーネントの波長変化をモニタリングすることが容易になり、ユーザーはリアルタイムのフィードバックにより調整を行うことが可能です。（このトリガーは、オシロスコープ上で検出器の出力を表示するためにも使用できます。）波長トリガーの安定性と、走査の反復可能性により、オシロスコープで測定した動作が、実験中のデバイスのスペクトル変化による動作であることを確実にします。最後に、高い出力により、デバイス内の複数の出力チャンネルの同時測定が可能です。代表的な波長掃引システムを完成するのに必要なその他のコンポーネントには、受信器として使用するモデル2103高ダイナミックレンジパワーセンサなどの高速パワーセンサ、データ収集と保管用のNational Instruments™ PCI-6110E (5 MS/秒、4チャンネル) などのデータ取得カード、さらにNational Instruments PCI-GPIBなどのGPIBコントローラカードがあります。

図1で示すこのシステムは、インターリーバーを特徴付けに使用されます。インターリーバーは、DWDMチャンネルの多重化や逆多重化に使用します。波長掃引システムを使用すると、これらのデバイスの測定をわずか1秒で実行できます。この技術の速度と効率により、操作担当者はリアルタイムで反映される結果を見ながら調整が可能になり、メーカーはリアルタイムのプロセス制御が行えるようになります。

波長掃引技術の使用法に関するその他の事例は、ニューフォーカスのアプリケーションノート8および9でご説明しています。アプリケーションノート8の“WDM Muxのリアルタイム波長トリミング”では、ファイバブラッググレーティングを使用するMuxの製造方法を説明します。この製造方法では、ファイバにわずかな応力をかけることによる波長シフトを測定します。アプリケーションノート9の“ファイバブラッググレーティングの温度ドリフト測定”では、安定型ファイバブラッググレーティングのわずかな温度ドリフトの測定についてご説明します。

アプリケーションノート10：波長掃引実験：時間短縮および生産環境でのリアルタイムプロセス制御の実現

出力を記録しながらレーザーの波長を一定の速度（最大2000 nm/s）で連続的に掃引することで、コンポーネントを調整する際の変化を観察するのに十分な速度の、極めて高分解能のスペクトル図を得ることができます。

従来の波長特性評価手法との比較

広帯域雑音源およびOSA手法では、ELED（端面放射型振発光ダイオード）、エルビウムファイバ増幅器のASE（自然放射増幅光）光源などの広帯域光源、およびOSAを使用します。すでに言及したとおり、この手法は高速（代表的な走査は1秒）で極めて広い波長帯（>50 nm）を操作できることが特徴ですが、波長分解能が比較的低い（OSAの制限により、代表値0.1 nm）ため、一部の重要なDWDMコンポーネントの特性評価には適さないことがありました。一例として、80チャンネルで50 GHzシステムの復調器について検討してみます。チャンネル間のアイソレーションが30 dB以上必要です（つまり、線中心から0.4 nm離れた時のデバイスの損失が30 dB以上）、測定には0.01 nm（10 pm）の分解能が必要です。

それでも、OSAが波長選択性のない光源として作用するため、OSA手法はダイナミックレンジが優れています。そのため、相対的な測定で十分なサブコンポーネントのアセンブリレベルでは、この手法がうまく使用されています。技術者は、装置の速さを活かして、サブコンポーネントの配置を最適化できます。分解能は制限されますが、アイソレータやタップなどのスペクトル情報がほとんどないデバイスにとっては受け入れ可能な手法です。より複雑な波長依存性を有するデバイスでは、より複雑な手法が必要です。

その一方、ステップ測定法では、チューナブル光源（通常は外部共振器型ダイオードレーザー）およびパワーメータまたは検出器を使用することで、高い分解能を得ることができます。この方法では、波長掃引手法と同じ高分解能、高出力の特性を共有しますが、速度は大幅に低下します。これは、希望の波長帯でレーザーが各ステップで光学スループットを測定するため、各測定ポイントでレーザーが一定時間停止することが原因です。たとえば、1520~1570 nmの波長帯をカバーし、分解能が1-nmの広帯域光源では、50回測定する必要があります。平均ステップ時間を400 msとすると、この種の走査には20秒かかります。ドロップフィルタのような狭帯域デバイスでは、3 nmで10 pmの分解能が必要であり、測定ポイントは300ヶ所ありますので、測定には数分間かかります。最後に、50 GHzシステム用の80チャンネルの復調器では、近傍チャンネル全体の実際の形状とアイソレーションを見る必要があります。30-nmの波長スパンをカバーし、分解能が0.01-nmであるということは、3500ヶ所の測定ポイントをカバーする必要があるという意味であり、測定には約20分間かかります。しかもこれは、単一偏光時にデバイスの出力チャンネルひとつにつき約20分間かかることを意味しますので、偏光依存効果がある場合、4種類のストークスパラメータを測定する必要があります。そのため、測定には少なくとも4倍の時間がかかります。対照的に、New Focus™ TLB-6600レーザーを使用した波長掃引手法の走査速度は2,000 nm/sであり、35-nmの波長帯をカバーするのに必要な時間はわずか0.1秒です。

現在、低ノイズ波長掃引レーザーは60 dBを超える波長統合型ダイナミックレンジを実現し、ノイズの少ない測定が可能です。ノイズ特性は測定時のダイナミックレンジを制限しますので、レーザーのノイズスペクトルを理解することが重要になります。レーザーによってノイズ仕様は異なりますので、お客様に正確な比較を行っていただけるよう、New Focusのレーザーでは幾つかの異なる方法で仕様を定義しています。

まず、分解能帯域幅（RBW）0.1 nmと0.2 nmのOSAを使用し、キャリアから離れた2つの測定点におけるASE（自然放射増幅光）の仕様を定義します。これに加えて、全波長で統合した信号とASEの比も規定します。これは、レシーバに波長感受性がなく、波長に関わらず、すべての入射パワーを統合するため、特に重要な仕様になります。

この統合型ダイナミックレンジは、合計除去率が>100 dBで、ウィンドウが0.8-nmの2つのカスケード式ファイバブラッググレーティングのスペクトルを観察することで測定します。図2をご覧ください。ファイバブラッググレーティングはレーザーキャリアの波長を除去しますが、ASEの大部分は透過します。ASEの測定に使用するパワーメータのダイナミックレンジは>90-dBです。レーザー波長はファイバブラッググレーティング全体を走査しますので、測定した除去率は、レーザーのノイズスペクトルにのみ制限されます。測定した除去率は、フィルタの0.8-nm帯域幅より外側の光源からの放射光を統合した合計値に対する信号の比率の測定値です。

これが達成可能な波長統合型ダイナミックレンジであり、お客様のラボで見られる現実的な予想値です。

ASEまたはダイナミックレンジの仕様を比較するときは、次の質問を忘れないでください。

- 1) 測定はOSAを使用して行われたか？ その場合の分解能帯域幅は？ キャリアからの距離は？ どの波長帯で測定したか？
- 2) 統合型S/N比の値は？ 測定時のキャリアからの距離は？ どの波長帯で測定したか？ どの手法を使用したか？

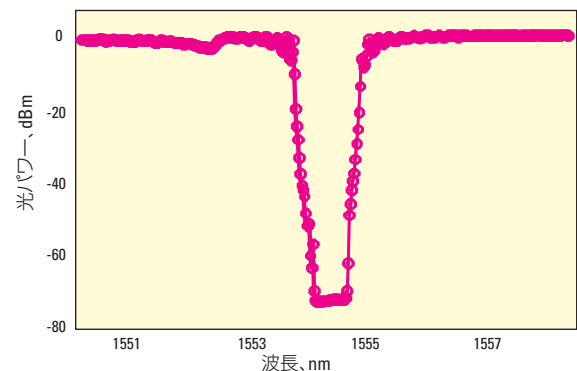


図2：2つの狭帯域幅ノッチフィルタ式のファイバブラッググレーティング型リフレクタを整合させ、そこを透過する光のパワーを弊社の波長掃引レーザーを使用して測定しました。信号のパワーに対する統合型ASEバックグラウンドパワー（0.8-nmのフィルタ幅の外側）の比率は、>70 dBです

注：OSAを使用すると測定に時間がかかるため、波長掃引測定には不適です。検出システムには数100 kHzの帯域幅が必要です。

まとめ

近年、電気通信システムにおけるチャンネル数が増加傾向にあり、それに伴い波長特性を評価する測定効率が重要な課題となっています。広帯域光源とOSAを使用する手法は高速ですが、複雑なデバイスの特性を決定するために求められる分解能には達していません。レーザーを“ステップ”させてから測定させる技術では、ダイナミックレンジと分解能の両方を提供できますが、速度が非常に遅くなります。しかし、波長掃引測定手法では、OSA手法よりも高速で、レーザーの分解能を有します。この手法は最終実験における用途がありますが、DWDMコンポーネントのアセンブリにも大きな利点があり、デバイスが複雑さを増すほど、費用を大幅に低減できます。

参考文献

1. Nyman, Bruce, "DWDM Component Characterization," **NIST Symposium on Optical Fiber Measurements**, (Sept. 1998), p.1.
2. Nyman, Bruce, "Four measurement methods characterize WDM components," **OptoElectronics World**, (Sept. 1998), p. S2

アプリケーションノート10：波長掃引実験：時間短縮および生産環境でのリアルタイムプロセス制御の実現

スイープ波長チューナブルレーザー P32参照
高ダイナミックレンジパワーセンサ P183参照

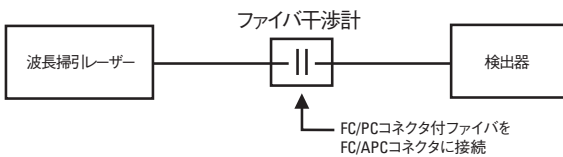


ニューフォーカス アプリケーションノート #11

波長掃引実験：パッシブ型ファイバ光学コンポーネントにおける波長掃引特性評価の理解

Swept-Wavelength Testing: Insights into Swept-Wavelength Characterization of Passive Fiber-Optic Components

チューニングリアリティ — 光学



波長掃引システムの構築には、チューナブルレーザー光源、実験対象のデバイス、パワーセンサ、データ取得システムが必要です。

パッシブ型ファイバ光学コンポーネントで高分解能波長特性評価を行うための波長掃引手法では、従来手法よりも迅速にコンポーネントの特性を評価することができます。以前は数分から数時間かかった測定が、今では数秒で行えるようになりました。この波長掃引手法は、製造工程でのその場測定にも使用できますので、デバイスの整備や調整をリアルタイムで行えます。このアプリケーションノートでは、次の項目についてご説明します。

1. 波長依存測定の定義
2. 波長掃引システムの構築
3. 測定を行う
4. データの解釈

この手法の概要と、従来手法との比較については、アプリケーションノート10：波長掃引実験：時間短縮と生産環境でのリアルタイムプロセス制御の実現 をご覧ください。

1. 波長依存測定の定義

WDMおよびDWDMネットワークシステムの複雑さが増し、チャンネル数が増え、チャンネル間隔が狭くなり、波長帯が広がるにつれ、広帯域ネットワークコンポーネント（カプラ、コンバイナ、スプリッタ、アッテネータ、アイソレータ、サーキュレータなど）および狭帯域ネットワークコンポーネント（マルチプレクサ、デマルチプレクサ、インターリーバ、波長フィルタなど）の両方について、波長依存光学特性を完全に特徴付ける重要性が高まっています。

波長平坦度や偏光依存損失などの特性は、ネットワークシステムの性能全体に悪影響を与える可能性があります。狭帯域デバイスの場合、中心波長、クロストーク、場合によってはチャンネル間隔を測定することが、システム性能を最適化するために特に重要になります。狭帯域デバイスと広帯域デバイスは全波長帯で使用されるため、対象チャンネルのみに限らず、全波長帯における光学特性を測定することが重要です。さまざまな特性を測定するために採用できる手法が幾つかあります。

波長の関数としてスループット強度を測定することで、次の仕様を決定できます。

- 中心波長
- チャンネル間隔
- 波長平坦度
- フィルタの伝達関数
- クロストーク

光源の一部をリファレンス光として分割するさまざまな手法を活用することで、挿入損失のフィルタ除去率を測定できます。