

光増幅器(EDFA)の特性評価

光スペクトラムアナライザ MS9740A による光増幅器の NF/Gain 測定

MS9740A

光スペクトラムアナライザ

目次

1. はじめに
2. NF/gain 測定の概要
3. 測定例
 - 3.1 レベル補間法
 - 3.2 偏光ヌリング法
 - 3.3 パルス法
4. まとめ

1. はじめに

1990年代後半に出現したエルビウムドープ光ファイバ増幅器(erbium doped fiber amplifier: EDFA)により波長多重信号(wavelength-division multiplexing: WDM)の一括増幅が可能になり、光海底ケーブルや光加入者系などの長距離・大容量通信システムへの応用が活発に行われている。この長距離・大容量伝送のキーデバイスであるEDFAの特性評価では、利得(gain)と雑音指数(noise figure: NF)が重要な測定項目であり、IEC61290, JISC6122で規格化されている。本稿ではアンリツの光スペクトラムアナライザMS9740Aを用いたEDFA・NF/Gain特性の測定に関して、測定方法やそれぞれの利点、注意点についてまとめた。

2. NF/gain 測定の概要

光スペクトラムアナライザ(optical spectrum analyzer: OSA)によるEDFAのgain測定は、EDFAの入力光と出力光のレベル比から簡単に求めることができる。NFの測定においてはEDFA自身が発する自然放出光(amplified spontaneous emission: ASE)のレベルを正確に測定する事が重要である。しかし、実際のASEは増幅された信号光に埋もれているため直接測定することは難しい。このASEのレベルを測定する方法として様々な方式が提唱されており、代表的な方法として以下の3つが挙げられる。

- ① レベル補間法
- ② 偏光ヌリング法
- ③ パルス法

① レベル補間法は、信号光波長近傍のASEレベルから信号光波長におけるASEレベルを補間し推定する方式である。この方式は測定が比較的簡単に行え、測定点の周辺のASEが平坦な場合にはかなり再現性の高い測定を行える。

② 偏光ヌリング法は、EDFAから出力されるASEが一般的には無偏光である事に着目し、EDFAに偏光した信号光を入力し、EDFAからの出力光から検光子を用いて「増幅された信号光成分(偏向成分)」(およびASE成分の50%)を除去する事により、直接ASEを測定する方式である。この方式は、偏波状態の調整が必要となるが、①において、フィッティングが困難な場合には有効な方法である。

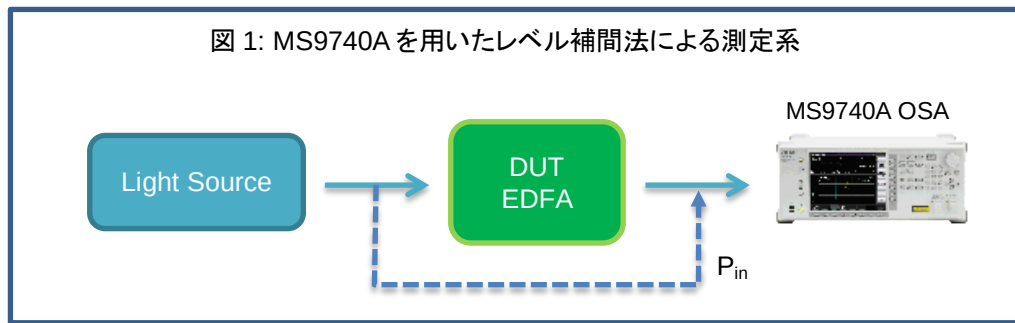
③ パルス法は、メタステーブル状態にあるEDFAのErbiumイオンが、基底状態へ回復するまでに比較的長い時間がかかることを利用している。すなわち、EDFAへの入力光をこの回復時間より十分短い周期でON/OFFし、信号光がOFFの期間に同期してEDFAからの出力のレベルを測定することで、信号光がある状態のASEを直接測定する方式である。この方式は、大掛かりな周辺機器が必要となるが、多重化された信号(WDM)にも対応できる。

MS9740Aでは、以上に挙げた3つの方式すべてに対応する内部アプリケーションソフトを標準装備している。それぞれの具体的な測定例と測定時の注意点について以下に述べる。

3. 測定例

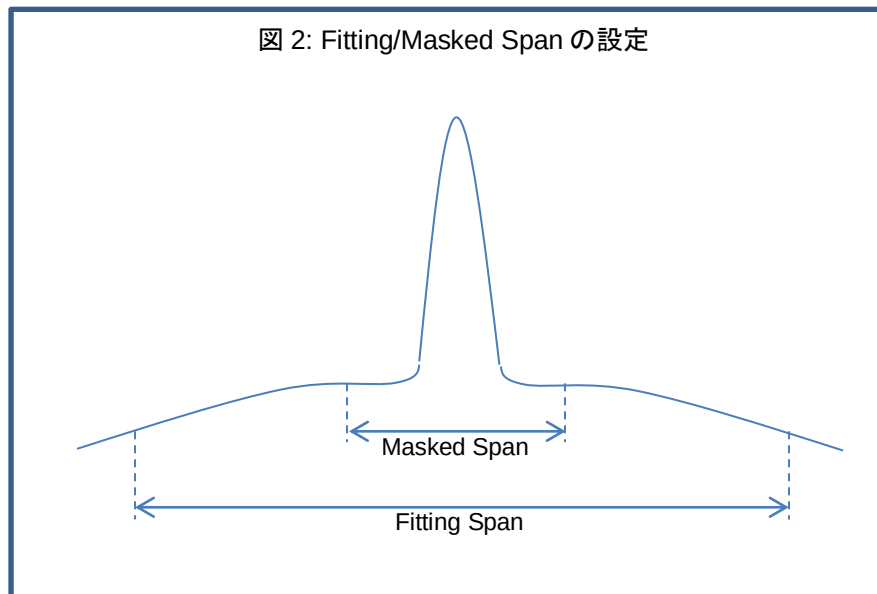
3-1. レベル補間法

(1) レベル補間法によるNF/gain測定系を図1に示す。



(2) 測定手順

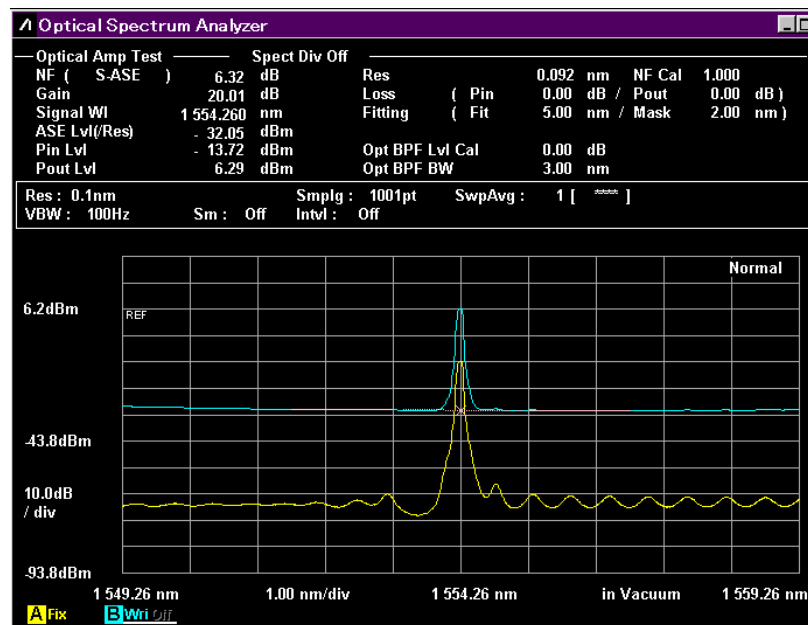
- ① 光源(Light Source)の出力を直接OSAに入力し、EDFAへの入力信号 P_{in} を測定する。
- ② OSAの測定メモリを P_{out} に切り替える。光源をEDFAへ入力し、EDFAからの出力光をOSAに入力し P_{out} を測定する。
- ③ データの補間を行うための範囲(Fitting Span)、および、補間計算のためのデータから除く範囲(Masked Span)を設定する。Fitting Spanは、その範囲内に他の信号光が含まれない波長幅を、またMasked Spanは、信号光の影響を受けている波長幅を設定する。(図2)
- ④ Fittingの方法を設定する。
 - ・Gauss Fit (ガウシアン曲線近似)
 - ・Mean (直線近似)



(3) 測定結果の例

図3に測定例を示す。この測定ではガウス近似によりASEのレベルを求めた。また、設定したFitting Spanは5nm, Masked Spanは2nmである。この測定の20回の繰り返しにおけるNFの測定値の再現性は0.1 dB以下であった。

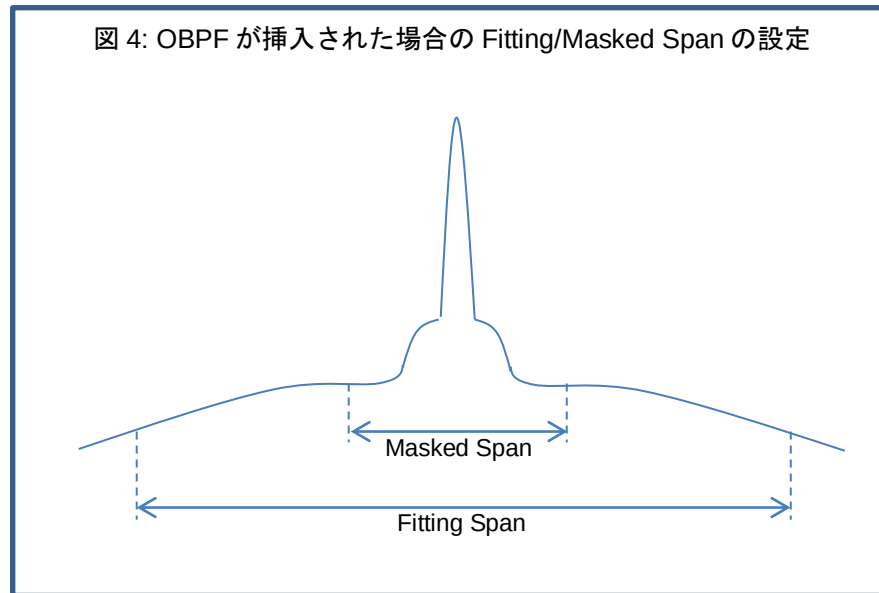
図 3: レベル補間法を用いた NF/Gain 測定例



(4) EDFA の出力に、光バンドパスフィルタ(OBPF)が挿入されている場合の測定

測定手順は上記(2)の場合と同じであるが、測定開始時にパラメータとしてOBPFの諸特性、及びレベル補正のためのデータを入力する。(取説 5.5 参照)

また、このときMasked Span はOBPF の通過帯以上の値を設定する必要がある。(図4参照)



(5) スペクトラム除算法による測定

EDFAの出力には、ASEのほかに増幅された信号光のノイズ成分が加わっている。このためASEのレベルをより正確に求めるためには、以下のような補正をかける必要がある。

$$ASE = ASE' - G \times P_{in_noise} \dots\dots\dots (1)$$

ASE': 測定されたASE のレベル, G: EDFA のゲイン, Pin_noise: 入力信号のノイズ成分

この補正されたASEのスペクトラムに対してレベル補間を行うことで、より正確なASEのレベルを求めることができる。MS9740Aでは、このスペクトラム除算法のON/OFF を選択できる。(Spectrum Div. ON/OFF機能)。図5はスペクトラム除算法を用いてNF/gain を測定したものである。また図6は同条件のEDFAを除算法を用いずに測定したものである。両者のNF の測定値ではおよそ0.1 dBの違いが観測された。

DFB-LD 等、信号光のほかにサイドモードを持つ光源では、スペクトラム除算法によりサイドモードの影響を軽減できる。

図 5: スペクトラム除算法による測定

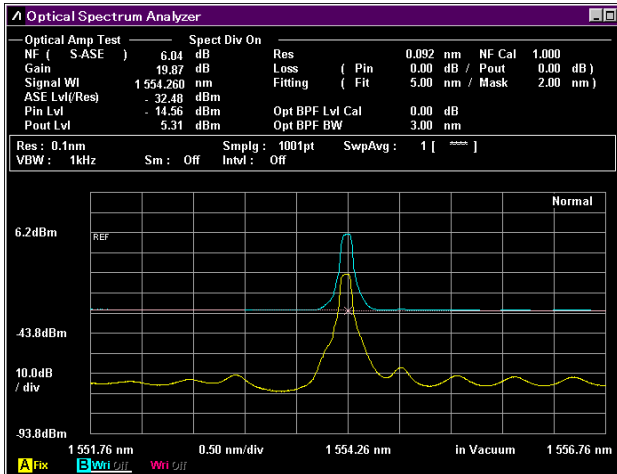
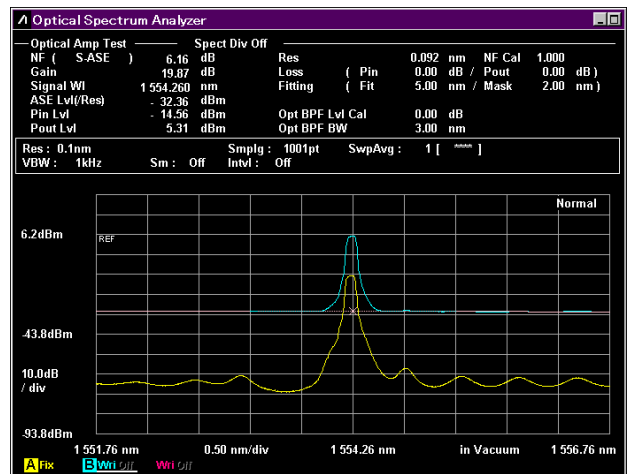


図 6: スペクトラム除算法を用いない測定



次の測定例は、入力光として、DFB-LDに光ノイズとしてASE光源を重畳した場合である。図7、および図8に、それぞれスペクトラム除算法を用いた場合と用いない場合の測定結果を示す。このようなケースにおいてもスペクトラム除算法を適用した方が入力光のノイズ成分の影響を抑圧した測定結果になっていることがわかる。

図 7: スペクトラム除算法による測定

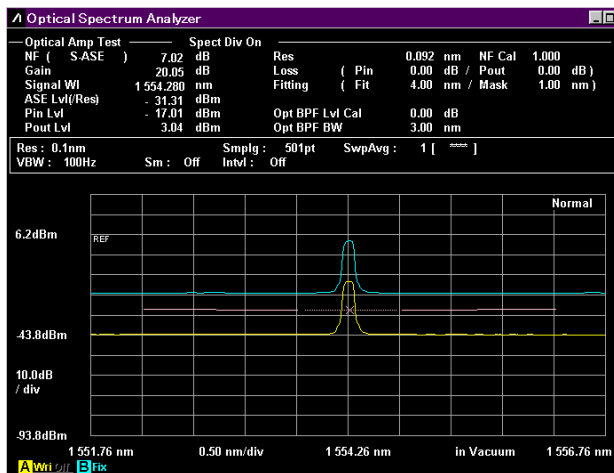
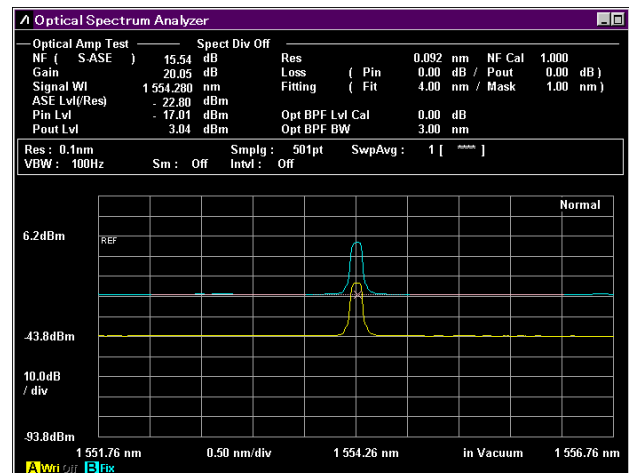


図 8: スペクトラム除算法を用いない測定



(6) レベル補間法の注意点

レベル補間法による測定では、補間を行うためのデータが十分な場合、かなりの精度でNFを測定できる。しかし、多重された信号のNFを測定する場合、設定できるFitting SpanはWDMのチャンネル間隔によって制限されてしまう。このようなWDM信号のNF測定では後述のパルス法による測定が必要である。

スペクトラム除算法で測定を行う場合、式(1)のPin_noiseの値が不定であるような場合は正しく測定できない。例えば、入力信号の光ノイズ成分が、Fittingを行う範囲においてOSAのノイズに埋もれているような場合が挙げられる。下図はその一例である。この測定結果では、スペクトラム除算法をONIにした場合において、NFの測定結果が明らかにおかしいことがわかる(図9, 図10)。

こういった測定誤差を避けるためには、光ノイズ成分がOSAのノイズレベルより十分大きくなるようにOSAのVBWを設定する必要がある。(VBWと受光感度の関係: 取説 付録E参照)。

図 9: スペクトラム除算法による測定

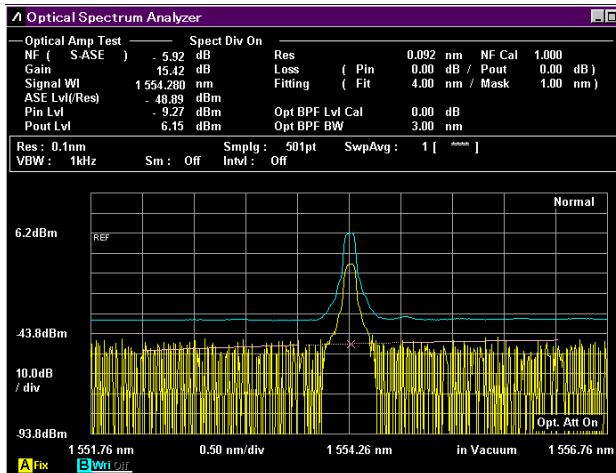
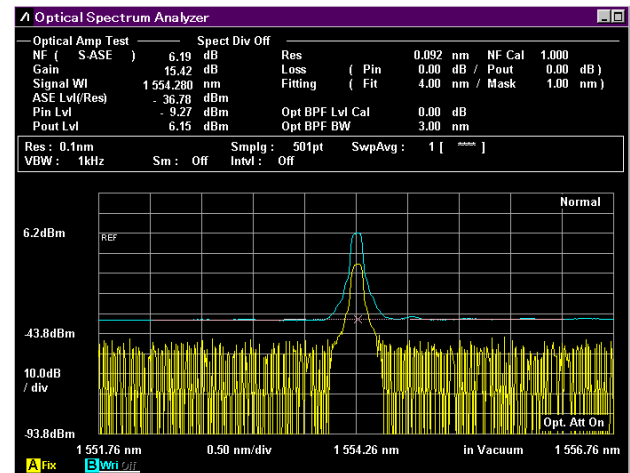


図 10: スペクトラム除算法を用いない測定

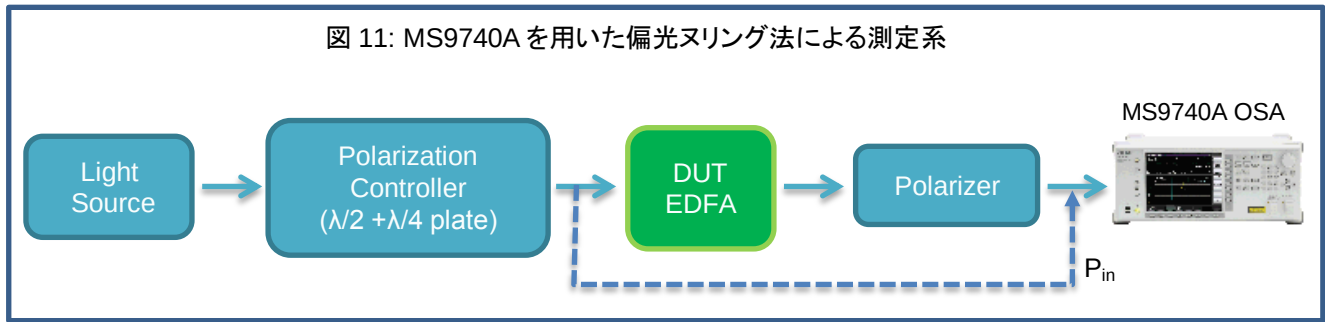


また、スペクトラム除算法を用いる場合において、式(1)のASE'と $G \times \text{Pin_noise}$ の値が非常に近くなってしまうような場合には注意が必要である。つまり、出力光のASE光がゲイン倍された入力光ノイズよりも十分大きい場合は無視されるほど小さいので問題とならないが、出力光のASEノイズが、ゲイン倍された入力光のノイズよりも非常に小さくなる場合、ゲイン倍された入力光ノイズ、 $G \times \text{Pin_noise}$ の、Pin_noiseの誤差が測定結果に影響を与えてしまうということである。

例として、入力光レベルの誤差が1uW, 出力光のASEレベルが1mW, ゲインが20dBの場合を考える。この場合、入力光レベルの誤差は100倍され、100uWとなるため、除算法による測定誤差は10%($\approx 0.45\text{dB}$)を含むこととなる。

3-2. 偏光ヌリング法

(1) 偏光ヌリング法によるNF/gain測定の測定系を図11に示す。

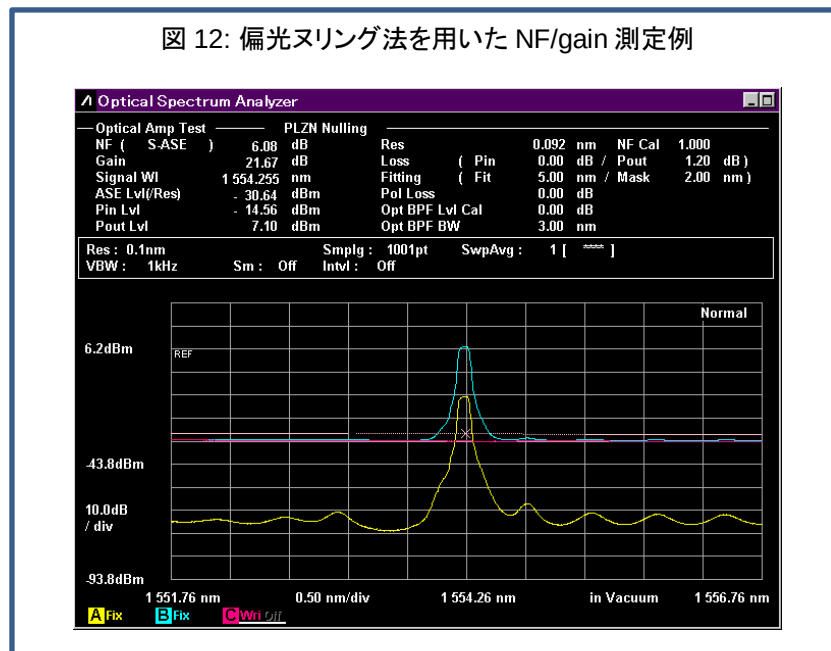


(2) 測定手順

- ① 検光子(Polarizer)の挿入損失を測定し、パラメータのPout loss に入力する。
- ② 偏光コントローラ(Polarization Controller)の出力を直接OSAに入力し、EDFAへの入力信号Pin を測定する。
- ③ 図11のように接続を行い、OSAの測定をPaseに切り替える。OSAで観測される信号のレベルが最小となるように偏光コントローラと検光子を調節し、レベルが最小になった状態でOSAの掃引を止め、ASEのスペクトラムを取得する。このとき、OSAのVBWをASEが正確に観測できる最大のバンド幅に設定することで、偏光の調整が容易となる。
- ④ OSAの測定をPoutに切り替え、観測される信号のレベルが最大になるように再度偏光コントローラと検光子を調節し、レベルが最大となった状態でOSAの掃引を止め、Poutのスペクトラムを取得する。
- ⑤ 取得したASE スペクトラムに対しFitting Span とMasked Spanを設定しレベル補間を行う。補間の詳細は既述の3.1項レベル補間法を参照。

(3) 測定結果

図12にMS9740A の偏光ヌリング法を用いたNF/gainの測定例を示す。



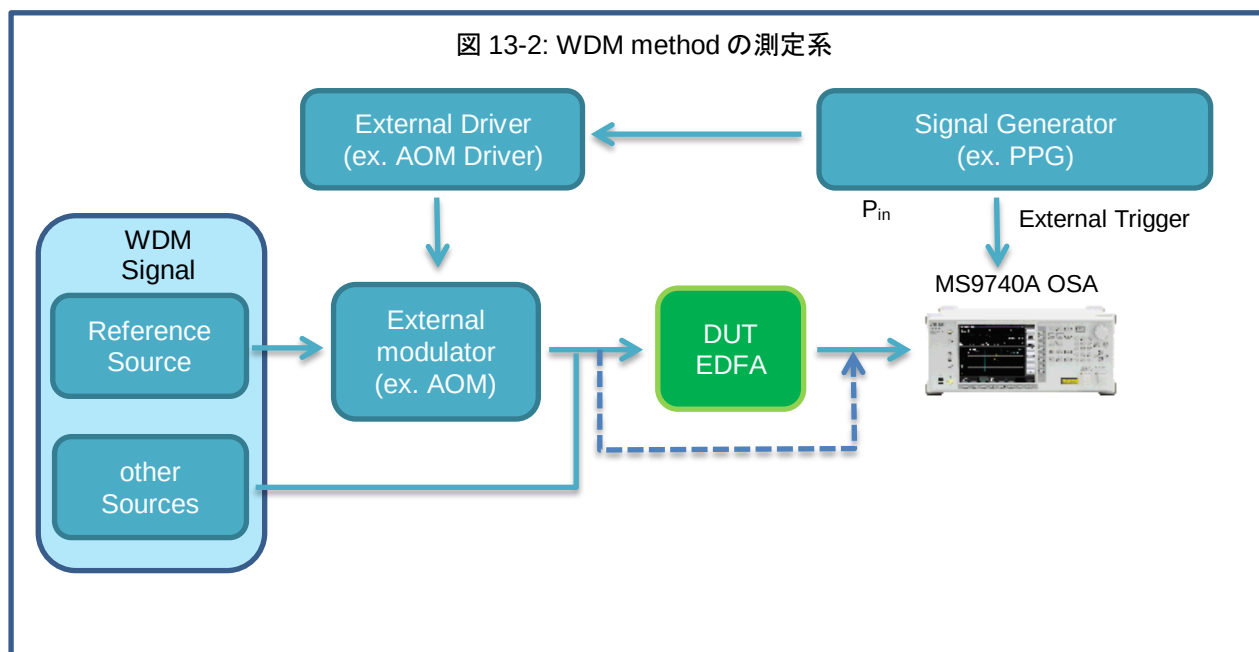
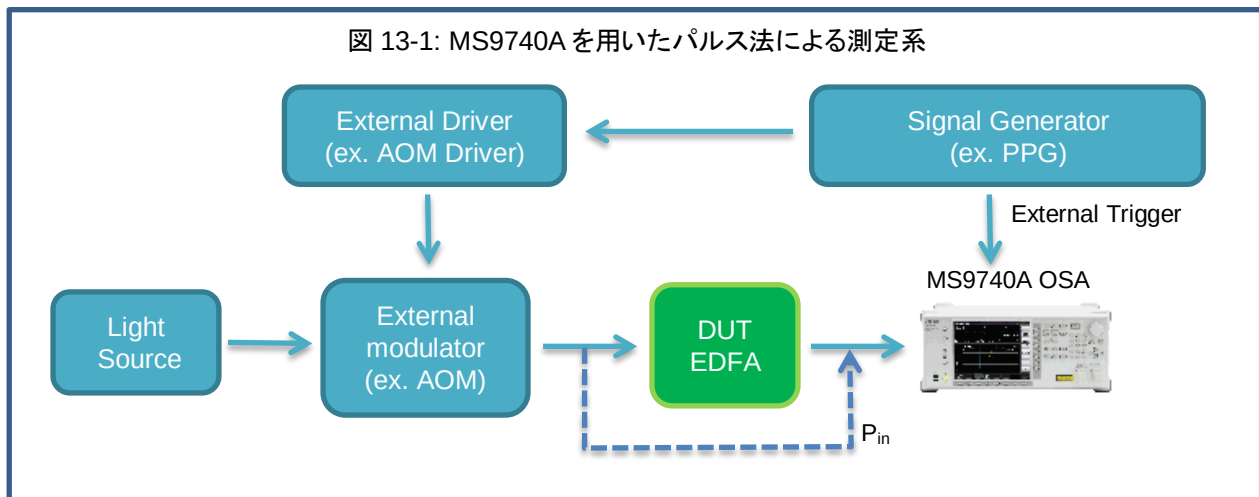
(4) 偏光ヌリング法の注意点

この方式では測定する信号光の偏光状態によって、たえず偏光コントローラと検光子を調整する必要がある。入力光の偏光度や検光子の偏光消光比が十分でない場合、信号光を完全にコントロール／消去することができず、測定誤差となってしまう。また、使用する偏光コントローラと検光子の挿入損失の偏光依存性(PDL)が、直接測定精度に影響してしまうので、PDL の小さいものを使用する必要がある。

3-3. パルス法 (WDM method)

MS9740Aではパルス法を用いた測定として、単一光源の測定に使用する“Pulse method”とWDM信号に対応した“WDM method”を選択できる。WDM信号をEDFAで増幅する場合と単一信号を同じEDFAで測定する場合はNF特性が異なることがある。WDM MethodはWDMされた信号のうちの一つをパルス法を用いて測定することによって、増幅されたWDM信号におけるNF/gainをより正確に測定することを目的としている。

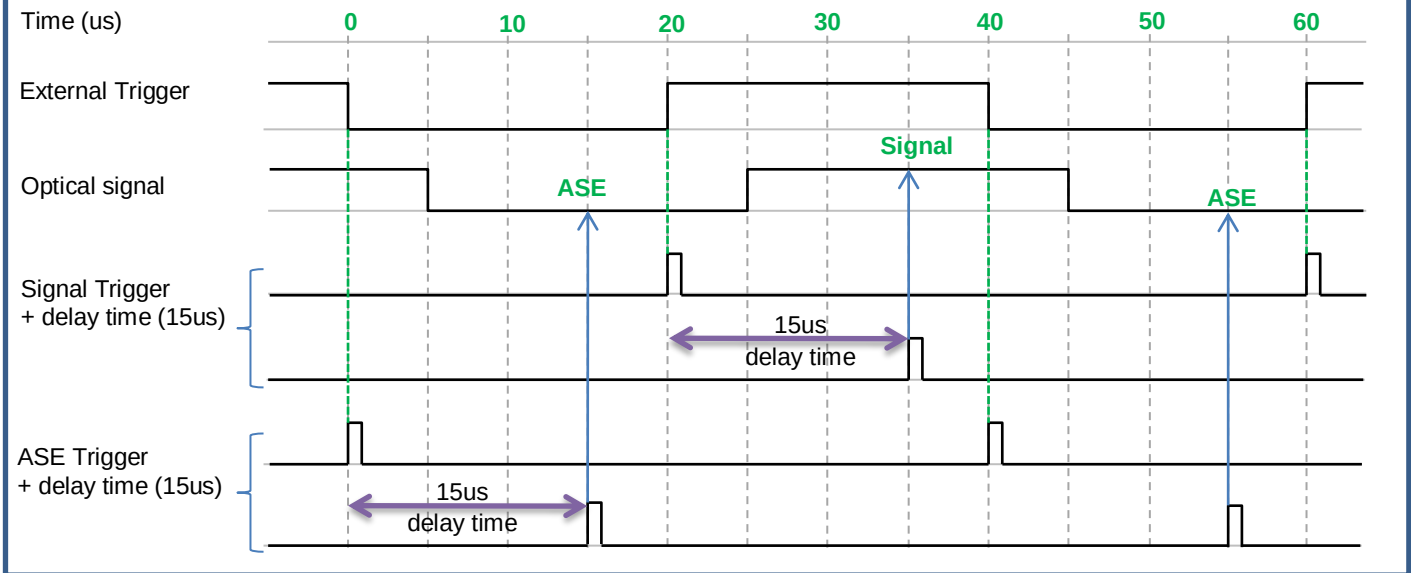
(1) パルス法によるNF/gain測定系を図13-1, 13-2に示す。



(2) 測定タイムチャート

MS9740Aを用いたパルス法によるタイムチャートの例を図14に示す。この測定では、OSAに入力したexternal triggerの立ち上がり時間から、設定されたdelay time後の点で増幅された信号を測定し、立ち下がりの時間からdelay time後の点で、ASEを測定する。

図 14: パルス法による測定タイミングチャート (delay time = 15us)



(3) 測定の手順

- ① OSAの測定モードをExternal Triggerモードに設定し、VBWをTrigger信号周波数よりも十分広い帯域に設定する(1 MHzまたは100kHzが望ましい)。Signal Generatorからの同期信号をOSAの背面にあるExternal Trigger端子へ入力する。
- ② AOMの出力を直接OSAに入力し、測定レベルが最大になるようにdelay time を調節する。レベルが最大となった状態で入力レベルPinを測定する。
- ③ EDFAを図13-1または13-2の様に接続し、OSAの測定メモリをPoutに切り替える。測定レベルが最大になるように再度delay timeを調節し、最大となった状態でEDFAの出力Poutを測定する。このときASEの測定は各測定点において時系列に自動的に行われる(タイミングチャート参照)。

(4) 測定結果

図15にMS9740Aのパルス法を用いたNF/gainの測定例を示す。今回の測定では、外部変調器として(AOM)を用いた。使用したAOMの消光比は、約40 dB である。

ASEのレベルに若干のひずみが生じているが、これはAOMの消光比による誤差である。消光比による誤差については(5)-②で説明する。

図16にWDM methodを用いての多重化された信号を測定した結果を示す。本測定でも同じEDFAを用いているが、本測定においては信号レベルとASEレベルの比が30dB程度であるため、ASEレベルがひずみなく測定できていることがわかる。

図 15: Pulse method による測定

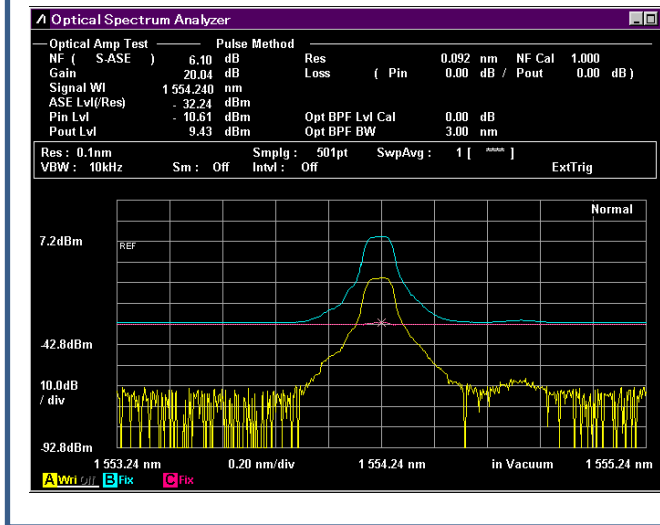
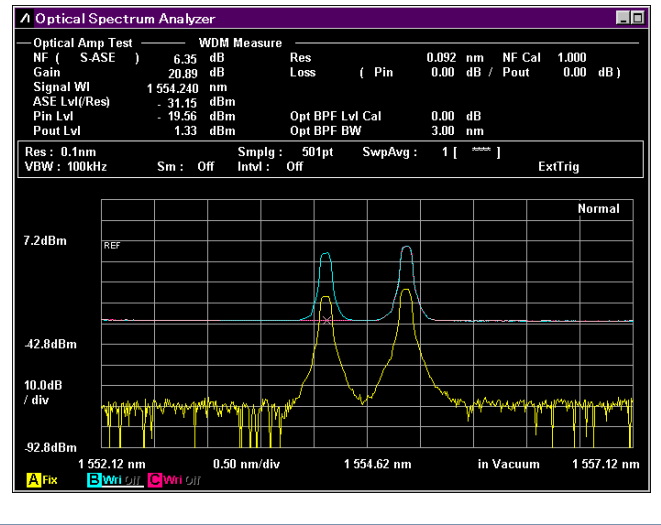


図 16: WDM method による測定



(5) Pulse Method使用時の注意点

① 測定誤差とdelay timeの関係

Erbiumイオンのメタステイブル状態からの復帰時間はおおよそ数msである。このため信号光をOFFした直後から数十usの間では、ASEのレベルは信号光がある場合とほとんど等しいと考えられる。一方、ASEを測定するときのOSAの受光部は、信号がOFFになった直後では完全に飽和した状態であり、この飽和状態から回復するためにはかなり時間に要する。この時間は、増幅された信号光とASEのレベル差に依存し、レベル差が30 dBの時には約10 us程度である。十分なdelay timeを設定できない場合、測定にエラーが発生するので注意が必要である。

また、EDFA自身にALC(Auto Level Control)などの出力コントロール機能が搭載されている場合、入力光がOFFになり、出力光が変化した際に自動的に出力コントロールされるため、ALCのフィードバック周期等を事前に調べ、適切なTrigger周波数を調べておくなどの注意が必要である。

② 光源のON/OFFの消光比に起因する測定誤差

この測定においては、ASEのレベルを測定する際に、信号光は完全にOFFになっていなければならない。例えば、EDFAへ入力する変調光の消光比が十分でない場合、ASEのレベルに信号光のレベルが漏れ込み、

①の場合と同様のエラーが発生する。例えば、増幅された信号光とASEのレベル差が35 dB程度である場合、0.1 dB以下の誤差で測定を行うためには、光源のON/OFFの消光比は55 dB以上が必要となる。

③ Trigger周波数とVBW設定について

VBWはTrigger周波数よりも十分高い周波数に設定する必要があるため、SN比が高い被測定物の場合、ASEがOSA自身のノイズに埋もれてしまい、正確に測定できない場合がある。

以上の注意点から、Pulse MethodはWDM信号の測定について効果は高いが、測定にあたっては、被測定EDFAの性質やパルス駆動源のスイッチの性能をはじめ、測定系についてもよく調べておく必要がある。また、パルスの繰り返し周波数を必要以上に遅くした場合、EDFAのQスイッチ発振により巨大なパワーが出力されることがあり、測定器を含め周辺機器を焼損する可能性があるため、注意が必要である。(IECでは繰り返し周波数は10kHz以上が望ましいとされている。)

4. まとめ

以上アンリツのOSA MS9740A を用いたEDFAのNF/gain測定についてまとめた。今後も、さまざまな測定要求が見込まれるEDFA・光増幅器の評価において、アンリツでも技術調査等を継続して行い、光増幅器測定アプリケーションを充実していきたい。

注: 特許に関するお願い

パルス法による光増幅器の測定法に関して、日本電信電話株式会社の米国特許No.5, 521, 751. と、Agilent Technologies Inc. の米国特許No.5, 340, 979 及びこれらの対応外国出願が公開されております。光スペクトラムアナライザを用いて本書の測定例 3.3 項に記載の測定方法を採用する場合は、上記特許との関係が問題となるおそれがあります。この場合、お客様が光スペクトラムアナライザを用いて採用する測定方法が問題の要因となりますので、光スペクトラムアナライザ単独では解決できません。したがって、お客様の責任において、上記特許に関する対応策をご検討のうえ、測定方法を構成されますようお願い申し上げます。



お見積り、ご注文、修理などは、下記までお問い合わせください。記載事項は、おことわりなしに変更することがあります。

アンリツ株式会社

<http://www.anritsu.com>

本社	〒243-8555 神奈川県厚木市恩名 5-1-1	TEL 046-223-1111
厚木	〒243-0016 神奈川県厚木市田村町 8-5	
	計測器営業本部	TEL 046-296-1202 FAX 046-296-1239
	計測器営業本部 営業推進部	TEL 046-296-1208 FAX 046-296-1248
	〒243-8555 神奈川県厚木市恩名 5-1-1	
	ネットワーク営業本部	TEL 046-296-1205 FAX 046-225-8357
新宿	〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-14-1	新宿グリーンタワービル
	計測器営業本部	TEL 03-5320-3560 FAX 03-5320-3561
	ネットワーク営業本部	TEL 03-5320-3552 FAX 03-5320-3570
	東京支店(官公庁担当)	TEL 03-5320-3559 FAX 03-5320-3562
札幌	〒060-0042 北海道札幌市中央区大通西 5-8	昭和ビル
	ネットワーク営業本部北海道支店	TEL 011-231-6228 FAX 011-231-6270
仙台	〒980-6015 宮城県仙台市青葉区中央 4-6-1	住友生命仙台中央ビル
	計測器営業本部	TEL 022-266-6134 FAX 022-266-1529
	ネットワーク営業本部東北支店	TEL 022-266-6132 FAX 022-266-1529
大宮	〒330-0081 埼玉県さいたま市中央区新都心 4-1	FSKビル
	計測器営業本部	TEL 048-600-5651 FAX 048-601-3620
名古屋	〒450-0002 愛知県名古屋市中村区名駅 3-20-1	サンシャイン名駅ビル
	計測器営業本部	TEL 052-582-7283 FAX 052-569-1485
	ネットワーク営業本部中部支店	TEL 052-582-7285 FAX 052-569-1485
大阪	〒564-0063 大阪府吹田市江坂町 1-23-101	大同生命江坂ビル
	計測器営業本部	TEL 06-6338-2800 FAX 06-6338-8118
	ネットワーク営業本部関西支店	TEL 06-6338-2900 FAX 06-6338-3711
広島	〒732-0052 広島県広島市東区光町 1-10-19	日本生命光町ビル
	ネットワーク営業本部中国支店	TEL 082-263-8501 FAX 082-263-7306
福岡	〒812-0004 福岡県福岡市博多区榎田 1-8-28	ツインスクエア
	計測器営業本部	TEL 092-471-7656 FAX 092-471-7699
	ネットワーク営業本部九州支店	TEL 092-471-7655 FAX 092-471-7699

再生紙を使用しています。

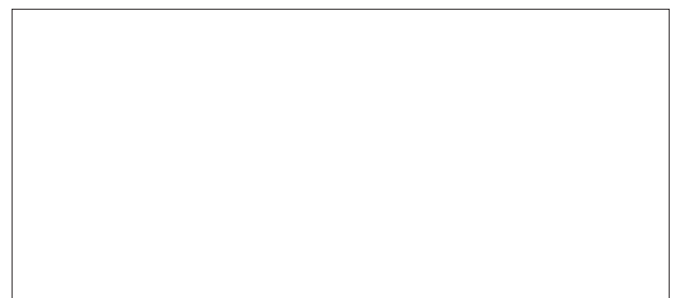
計測器の使用方法、その他については、下記までお問い合わせください。

計測サポートセンター

 TEL: 0120-827-221、FAX: 0120-542-425
受付時間／9: 00～12: 00、13: 00～17: 00、月～金曜日(当社休業日を除く)
E-mail: MDVPOST@anritsu.com

● ご使用の前に取扱説明書をよくお読みのうえ、正しくお使いください。

1106



■本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本国政府の輸出許可または役務取引許可が必要となる場合があります。また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。

No. MS9740A-J-F-1-(1.00)



2011-11 MG