

高速利得傾斜補償器の開発

Development of a Fast Gain Tilt Compensator

畑野 達也*
Tatsuya Hatano

尹 大烈*
Daeyoul Yoon

水野 一庸*
Kazuyou Mizuno

概要 今後のWDMシステムにおいて、より柔軟性があり、信頼性の高いネットワーク構成を構築するに当たり、伝送路に対して信号の入出力を行うOADMを用いたネットワーク構成が検討されている。そのOADMに入力される信号光の増減に伴うEDFAでの利得変動や伝送路で発生するラマン利得変動が、サブmsのオーダーで発生することが知られている。これらの利得変動は、波長方向に発生する利得傾斜であることが知られており、信号光間のパワーレベル偏差による伝送特性の劣化要因となる。我々は、これらの利得変動による利得傾斜を補償するLN偏光変換器を用いた μ sオーダーで動作可能な高速利得傾斜補償器を開発した。

1. はじめに

近年のインターネットの急激な普及による通信の大容量化、高速化に伴い、WDMシステム (wavelength division multiplexing system, 波長多重通信方式) の研究が活発に行われている。今後のWDMシステムにおいて、より柔軟性があり、信頼性の高いネットワーク構成を構築するに当たって、伝送路に対して、信号光の入出力を行うOADM (optical add-drop multiplexer, 光合分波器) を用いた構成が検討されている。

OADMに入出力される信号光の増減に伴い、EDFA (erbium-doped fiber amplifier, エルビウム添加ファイバ増幅器) の利得変動や伝送路で発生するSRS (stimulated raman scattering, 誘導ラマン散乱) によるラマン利得変動が、サブmsオーダーで発生することが知られている。

図1に、OADMを用いた伝送システムブロック図を示す。図1のように、例えばファイバ切断等によってOADMへの

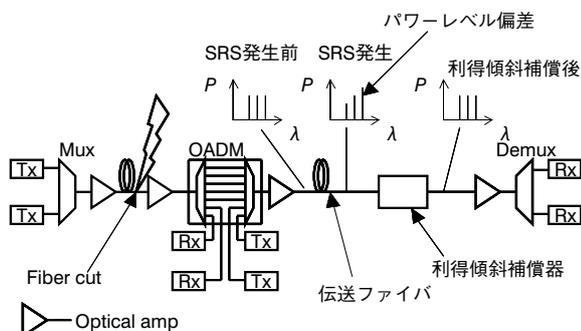


図1 OADMを用いた伝送システムブロック図
Block diagram of a transmission system with OADM.

入力信号数が減少した場合、伝送ファイバでのSRSによるラマン利得変動が起こる。この利得変動は、波長方向に発生する利得傾斜であることが知られており、信号光間のパワーレベル偏差による伝送特性の劣化要因となることから、利得傾斜補償をする様々な方式が提案されている。

その補償方式としては、EDFAの内部の励起光源を操作することによる利得傾斜調整、VOA (variable optical attenuator, 可変光減衰器) による出力パワーレベルの平坦化、並びに、図2に示すような制御パラメータによって、波長-透過率特性の傾斜を可変できる利得傾斜補償器 (gain tilt compensator, 以下GTC) によって、発生した利得傾斜を補償する方式などが提案されている。中でも、GTCは使用する帯域を一括補償することが可能であり、補償幅も大きいことからシステムコスト低減の点から期待されている。

これまで、GTCを構成する方式として、ファラデー回転子を用いた手法²⁾や、石英ガラスなどを材料とした平面導波路でマッハツェンダー回路をヒータなどの加熱手段を用いて、波長

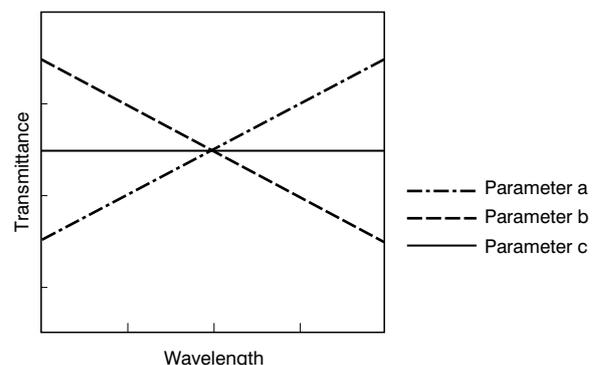


図2 可変利得傾斜補償器の透過率特性の傾斜変化
Transmittance characteristics of variable GTC.

* 研究開発本部 ファイタルフォトンクス研究所

透過率特性の傾斜量を変化させる方式³⁾が提案されているが、サブmsのオーダーで発生する利得変動に追従できるものではなかった。そこで、我々は、サブmsのオーダーで発生する利得変動による利得傾斜補償をするため、LN (lithium niobate, ニオブ酸リチウム) 偏光変換器を用いて、 μs オーダーで動作可能なGTCを開発した。

2. 原理と構成

本章では、傾斜損失波形の発生原理とLN偏光変換器について記載する。

2.1 傾斜損失発生原理

図3に、本GTCにおいて透過率特性の傾斜が変化する原理を示す。X軸方向に直線偏光された光が複屈折結晶に入射すると、入射光の互いに直交する偏光成分の間には、波長に依存した位相差 Δ が発生する。その位相差 Δ が付いた光を偏光子に入射し、一定方向の偏光成分のみを取り出す場合の出力光強度 P を図4に示す。図4には、図3に示した入射側の偏光子の角度 θ が、 0° 、 45° 、 90° における透過特性をそれぞれ、破線、実線、一点鎖線で示した。

出射光強度 P は、位相差 Δ に対して、正弦波形状の変化をする。また、複屈折結晶への入射光の偏光状態を変化させることにより正弦波の振幅を調整することが可能となり、節となる波長を中心に傾斜を変動させることが可能となる。入射光の偏光状態変化は、後節2.2で説明するLN偏光変換器を用いて行った。図4における節となる位相差 Δ (波長)は、使用する位相差(波長)範囲を設定し、複屈折結晶の長さを決めることで、調

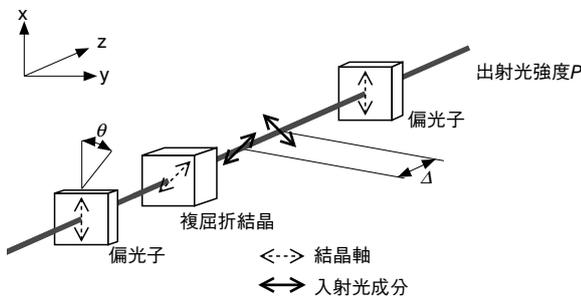


図3 複屈折結晶を用いた透過率傾斜の発生原理
Principle of transmittance slope generation using doubly refractive crystal.

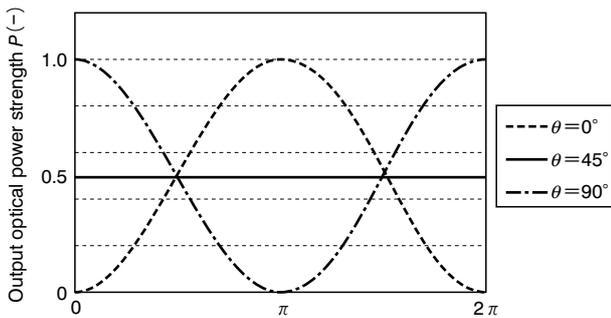


図4 複屈折結晶への入射光偏光操作による透過特性例
Transmittance characteristics obtained by polarization manipulation using doubly refractive crystal.

整することが可能である。

2.2 LN偏光変換器

図5に、本GTCに用いたLN偏光変換器の模式図を示す。外形寸法 $4.5 \times 20.5 \times 0.5 \text{ mm}$ のX-cutされたLN結晶基板からなる。図中に示すように、LN結晶のX軸方向に対して電圧を印加すると、電気光学効果によりLN結晶軸の屈折率が変化する。このことを利用して、結晶のZ軸方向を伝搬する入射光の偏光状態を変化させることが可能となる。LN結晶基板の電圧印加面には、 SiO_2 膜を蒸着した後、Au膜を蒸着した。

図6に、LN結晶のX軸方向に電圧が印加された場合の屈折率楕円体の変化を示す。ここで、入射光の偏光状態がLN結晶のX軸方向であると、LN結晶に印加される電圧が0Vである場合には偏光状態は変化せず、そのまま出力されることになる。LN結晶に電圧が印加された場合には、入射偏光の一部がY軸方向に変換され、LN結晶により発生する位相差が π になった際には、軸角度が 45° に配置された $\lambda/2$ 波長板と同等となり、X軸方向からY軸方向への完全な偏光変換が行われる。

2つの主軸方向で発生する位相差 Δ は式(1)となる。

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \gamma_{22} n_0^3 \frac{V}{d} L \quad (1)$$

ここで、 λ は入射光波長を表し、LN結晶の特性値である電気光学係数 γ_{22} ($= 5.4 \text{ pm/V}$)⁴⁾、屈折率 n_0 ($= 2.14$)、厚さ d 、長さ L を用いることにより、印加電圧 V とした際の位相差 Δ を求めることができる。 λ を $1.55 \mu\text{m}$ とした場合の位相差 Δ が π になる電圧 V_π は 366 V となる。

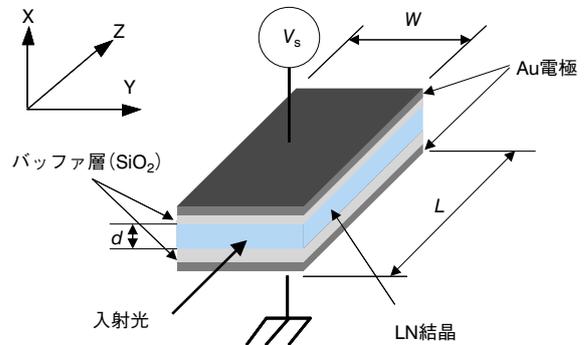


図5 LN偏光変換器の概要図
Schematic diagram of LN polarization transformer.

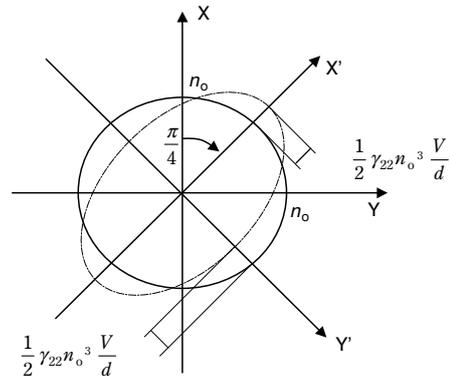


図6 電圧印加時のLN偏光変換器屈折率楕円体の変化
Change of index ellipsoid of LN polarization transformer due to voltage application.

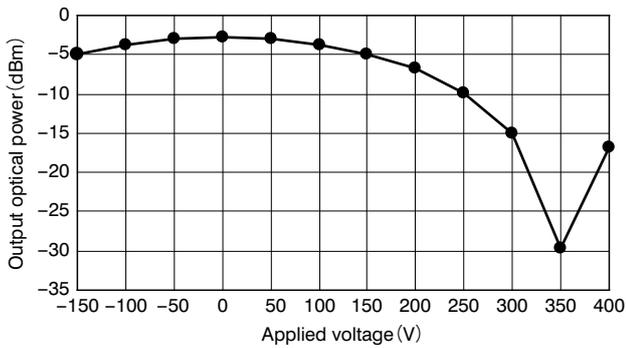


図7 LN偏光変換器の消光比測定結果
Measurement results of extinction ratio for LN polarization transformer.

図7に、 V_{π} の測定結果を示す。評価は、X軸方向に直線偏光された光をLN偏光変換器に入射し、印加電圧 V を変化させた時の出射光について、偏光子によりX軸方向の偏光成分のみを透過させた後の光パワーを測定し、消光比が最大である時の印加電圧を V_{π} とした。図のように、印加電圧350Vの時、消光比が最大となり、計算値とほぼ一致した。なお、試作したGTCモジュールへの印加電圧範囲は-70V～+70Vである。

2.3 構成

図8にGTCの構成を示す。構成する光学部品は、入出力コリメータ、ルチル、 $\lambda/2$ 波長板(軸角度 22.5°)、 $\lambda/4$ 波長板(軸角度 0°)、 $\lambda/4$ 波長板(軸角度 90°)、LN偏光変換器、高次波長板を構成する水晶、LN結晶である。

入射光は偏波分離素子によって、光路1と光路2に分離され、それぞれ $\lambda/2$ 波長板によって同一偏波状態となり、偏光変換部を通過することで、印加電圧に伴う偏光変化の操作を受け、更に、透過率の正弦波形状を作り出す高次波長板に入射された後に一部の偏光成分のみが出力光として切り出される。偏光変換部は、LN偏光変換器と2つの $\lambda/4$ 波長板で構成されており、このうち、波長板の軸方向が、X軸に対して 45° 傾いた $\lambda/4$ 波長板については、印加電圧が、0Vの際に傾斜量が0となるように印加電圧のオフセットを付けるために使用されている。高次波長板は、水晶とLNの2種類の結晶を組み合わせた構成として、それぞれの結晶長の比を最適化して、結晶が持つ温度特性をキャンセルする方式とした。また、光路1と光路2の光路長が等しくなるようにしているため、設計上PMDが発生しない構造となっている。図9に、GTCの理想的な透過率の波長特性を示す。図中の $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ は、高次波長板での位相差が、 $-\pi, -\pi/2, 0, \pi/2, \pi$ となる波長である。波長 λ_2 にお

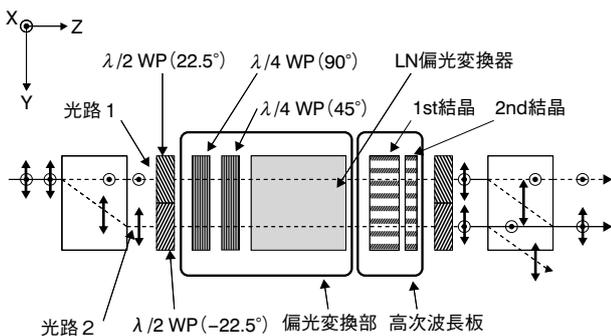


図8 高速利得傾斜補償器の構成図
Schematic diagram of fast gain tilt compensator.

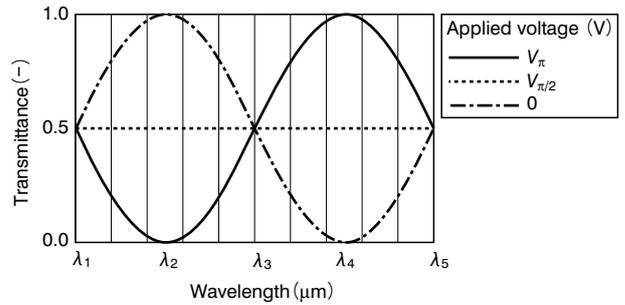


図9 GTCの基本透過率特性
Transmittance characteristics of GTC.

いて、印加電圧0Vの時の透過率を1とした。

波長帯域は、C-bandとし、その一部の範囲を使用することによって、印加電圧を変化させることで、透過率特性の傾斜が変化する。

3. 試作結果

3.1 透過特性

図10に、試作したGTCモジュールの波長-透過率特性を示す。印加電圧を-70V、0V、+70Vと変化させた時、透過率特性の傾斜が変化していて、中心波長は1553nmで、透過率は-3.5dBであった。

3.2 透過率特性の直線性

図11に、試作したGTCモジュールの透過率特性の傾斜(スロープ)に対するリップルを示す。ここで、透過率特性の傾斜(スロープ)とリップルは、図12に示すように定義する。

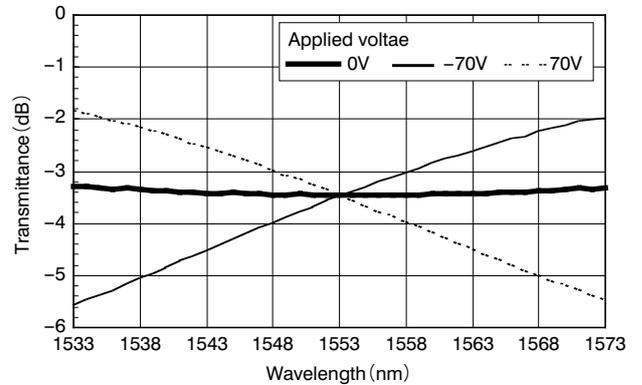


図10 試作したGTCモジュールの透過率特性
Transmittance characteristics of developed GTC module.

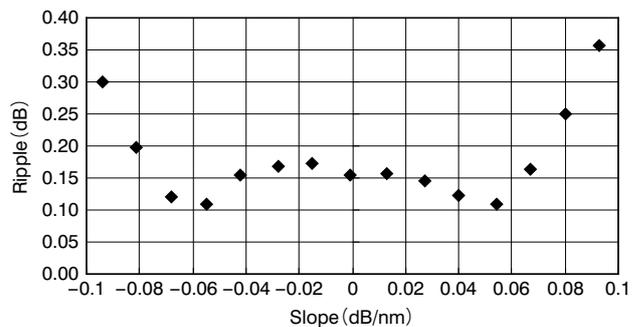


図11 試作したGTCモジュールの透過率特性のリップル
Ripple of transmittance characteristics of developed GTC module.

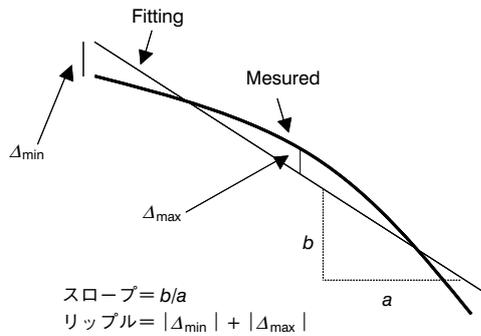


図12 透過率特性の傾斜(スロープ)とリップル
Definition of slope and ripple of transmittance characteristics.

試作したGTCモジュールのスロープ0.093 dB/nmにおいて、リップルは、最大0.36 dBであった。

3.3 印加電圧-透過率特性の傾斜量特性

図13に、試作したGTCモジュールの印加電圧-透過率特性の傾斜特性を示す。スロープが、0.094 dB/nm, -0.093 dB/nmの時、印加電圧は、それぞれ-70.1 V, +68.4 Vであった。

3.4 応答特性

図14に、試作したGTCモジュールの波長-透過率特性の印加電圧の変化に対する応答性について測定した結果を示す。評価は、モジュールの全出力光をフォトダイオードに受光し電流に変換後、電流-電圧変換回路によって電圧としてモニタし、印加電圧を0 Vから100 Vに変化させた時、モニタ電圧の応答時間を測定した。モニタ電圧は、印加電圧の変化に対して応答よく追従していることを確認できた。

また、印加電圧とモニタ電圧の一定時間(0.2 μs)における電

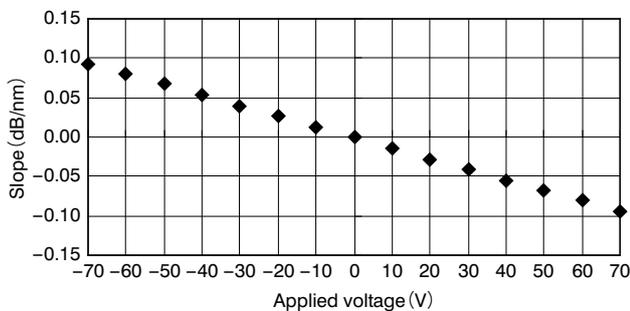


図13 試作したGTCモジュールの印加電圧-透過率特性の傾斜
Applied voltage vs. transmittance characteristics slope of developed GTC module.

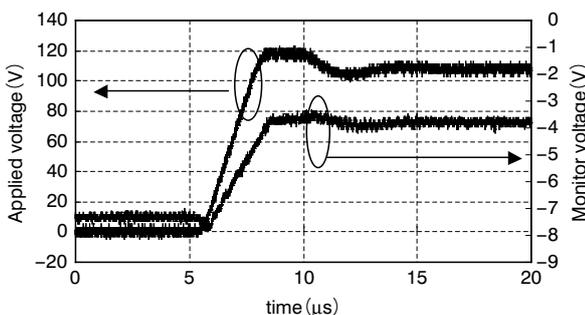


図14 印加電圧変化に対する透過率特性の応答性
Response of transmittance characteristics to applied voltage change.

圧変化量を求めて、その変化率が最大となる電圧の立ち上がり時間と電圧が一定となる時間をそれぞれ算出した。電圧変化量が最大となった時間は、印加電圧の場合5.45 μsと8.7 μsで、一方、モニタ電圧の場合5.9 μsと8.8 μsであった。応答時間としては、約0.45 μs程度と言える。

表1に、試作したGTCモジュールの特性結果と特性の計算値を示す。最大リップルを除いて、各特性結果は計算値とはほぼ一致している。

3.5 温度特性

図15に、試作したGTCモジュールの透過率-温度特性を示す。モジュールへの印加電圧を-70 V~+70 Vとして、波長範囲1535 nm~1573 nmにおける透過率の変動値を温度25, 40, 55, 70, 80℃において比較して最大変動値をプロットした。最大変動量は、印加電圧-70 Vで0.2 dBであった。図16に、試作したGTCモジュールのリップル-温度特性を示す。測定は、温度25, 40, 55, 70, 80℃において行った。スロープが-0.1 dB/nmの時、リップルの変動は0.02 dBであった。

表2に、試作したGTCモジュールの透過率、リップルの温度特性結果と温度特性の計算値を示す。測定値は温度25, 40, 55, 70, 80℃における値である。計算値は-5, 10, 25, 40, 55, 70℃で算出した。表2に示すように、測定値は計算値とはほぼ一致した。

表1 試作結果
Characteristics of developed GTC module.

項目	計算値	試作結果
中心波長透過率最小値 (dB)	3.3	3.5
最大リップル (dB)	0.27	0.36
最大傾斜電圧 (V)	-67	-70.1
最大傾斜値 (dB/nm)	0.094	0.094
最小傾斜電圧 (V)	64	68.4
最小傾斜値 (dB/nm)	-0.093	-0.093
0 スロープ傾斜電圧 (V)	-1	-0.5
PDL (dB)	—	≤ 0.1
PMD (ps)	0	0.02
リターンロス (dB)	—	> 40
分散 (ps/nm)	—	+ 0.6/-0.42
Transition time (μs)	—	0.45
外形寸法 横×縦×高さ (mm)	—	16×72×8.5

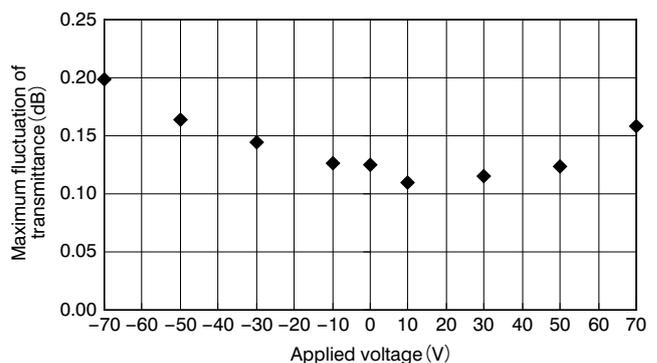


図15 透過率-温度特性
Temperature dependence of transmittance.

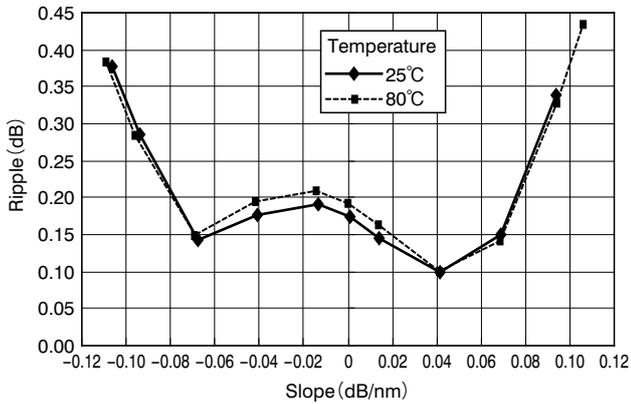


図16 リップル-温度特性
Temperature dependence of ripple.

表2 温度特性測定結果
Temperature dependence of selected characteristics of GTC module.

評価項目	計算値 (dB)	測定値 (dB)
最大リップル変化量	0.015	0.02
最大損失変化量	0.119	0.2

4. 考察

GTCモジュールの特性は、その構成部品である $\lambda/2$ 波長板、 $\lambda/4$ 波長板といった光学部品の結晶軸の角度の配置精度や光学部品の厚み精度に影響される。

図17, 18に、 $\lambda/2$ 波長板(軸角度 22.5°)、 $\lambda/4$ 波長板(軸角度 0°) $\lambda/4$ 波長板(軸角度 45°)の軸角度が、 $\pm 1^\circ$ 、厚みが $\pm 1 \mu\text{m}$ の範囲でランダムに誤差が発生した場合のGTCモジュールの透過率、リップルの分布を示す。

今回の試作での配置方法としては、 $\lambda/2$ 波長板、 $\lambda/4$ 波長板は、それらのホルダの一辺に対して、結晶軸の角度を出すことによって行っていて、軸角度の配置精度は約 ± 1 度程度と推測している。また、 $\lambda/2$ 波長板、 $\lambda/4$ 波長板の厚み公差は $\pm 1 \mu\text{m}$ とした。

表1に示した試作結果において、試作したGTCモジュールの中心波長での透過率は、モジュール損失0.60 dBを除いて計算すると2.9 dBとなり、図17に示した透過率の分布範囲内にあり光学部品の配置精度や厚み精度の誤差によるものと考えられる。一方、リップルは0.36 dBであり図18に示したリップルの分布範囲外にある。この原因については、光学部品の配置精度不足が考えられるため、配置精度を上げる必要がある。

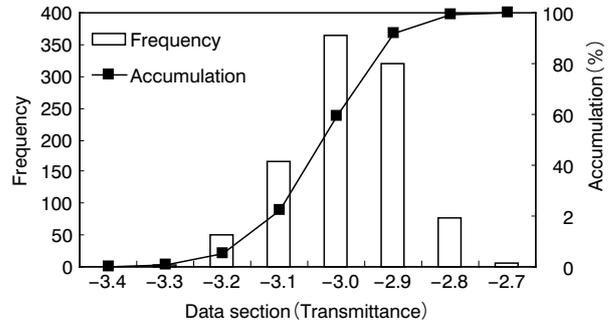


図17 シミュレーション結果(透過率)
Simulation results of transmittance.

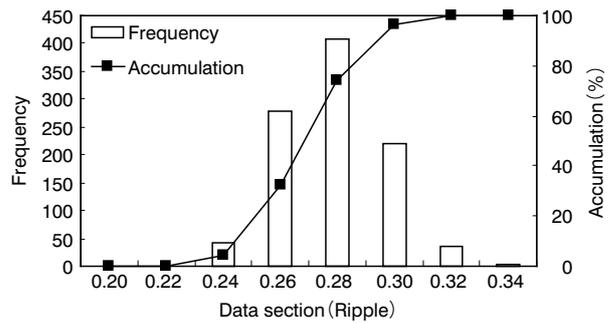


図18 シミュレーション結果(リップル)
Simulation results of ripple.

5. おわりに

我々は、EDFAでの利得変動や伝送路で発生する誘導ラマン散乱によるラマン利得変動を原因として発生するサブmsオーダーの利得傾斜を補償するため、LN偏光変換器を用いた μs オーダーで動作可能な利得傾斜補償器を開発し、その透過特性及び応答性が約 $0.45 \mu\text{s}$ であることを確認した。

参考文献

- 1) P.M. Krummrich, et al.: "Compensation of Raman transients in optical networks," Technical Digest OFC2004, MF82.
- 2) T.Naito, et al.: "Active Gain Compensator in Large-Capacity, Long-Haul WDM Transmission System," Proceedings of OAA' 99, Paper WC5.
- 3) H.Hatayama, et al.: "Variable attenuation slope compensator (VASC) using silica-based planar lightwave circuit technology for active gain slope control in EDFAs," Technical Digest OFC2000, WH7.
- 4) A.Yariv and P.Yeh: "Optical Waves in Crystals," Wiley, New York, (1984).