

# 結晶型デポライザの開発

## Development of Crystal-Type Depolarizer

風味 創\*

Hajime Kazami

松下 俊一\*3

Shunichi Matsushita

江森 芳博\*3

Yoshihiro Emori

村瀬 崇\*2

Takashi Murase

露木 真道\*4

Masamichi Tsuyuki

山本 邦宏\*4

Kunihiro Yamamoto

松浦 寛\*2

Hiroshi Matsuura

並木 周\*3

Shu Namiki

柴 啓明\*2

Takaaki Shiba

概 要 ファイバ・ラマン・アンプ（以下ラマンアンプ）は、その特性の優位性から普及が広がっているが、ラマンゲインの偏光依存性が大きいためにアンプ設計ではその影響を小さくする様々な工夫がなされている。その中で、デポライザは大きな役割を担っており、偏波保持ファイバの 45° 融着型が実用化されているが、収納スペースの確保、アンプ内の温度変動による偏光度（DOP: Degree Of Polarization）劣化によるラマンゲインの不安定化などの問題がある。そこで今回、それらの改善を目的に結晶型デポライザを開発し、小型化、及び DOP の温度依存性の低減を実現した。ラマンアンプの普及と共に今後の需要増加が期待される。

### 1. はじめに

最近脚光を浴びているラマンアンプは、光ファイバと光ファイバへの入射光とによって引き起こされるラマン散乱という 3 次の非線形現象を利用しており、その研究は既に実用化されている EDFA より早い 70 年代から行われていた<sup>1)</sup>。

ラマンアンプを実用域の技術とするためには、数百ミリワット出力を有する、高信頼、コンパクトかつ高効率な励起用光源が必要であったが、当時の光源ははまだその域には達してなかったためラマンアンプは普及には至らず、80 年代末に登場した EDFA に実用化では先を越されることとなった。

しかし、EDFA の実用化による光通信の飛躍的な発展のなかで、EDFA に用いられる 1480 nm 帯の励起用光源の高出力化技術が急速に発展したことにより<sup>2)</sup>、ラマンアンプに必要な高出力励起光源の入手が可能となったこと、及び、数 Tbit/s にも及ぶ大容量伝送にも耐え得る、低雑音、広帯域、高飽和出力等といった増幅特性の優位性から、再びラマンアンプが注目されている。

ラマンアンプの優位点の 1 つである広帯域特性は、ラマンアンプの利得帯域が励起用光源の波長によって決まることに起因する。また、WDM 伝送に用いる際は増幅すべき信号光の帯域幅と利得平坦性の確保が重要となるため、波長の異なる複数の励起用光源を、最適な波長及び光出力にて制御し、それらを波長合成することによって広帯域特性を実現している<sup>3)~5)</sup>。

その一方で、ラマンアンプは、利得の偏波依存性（Polarization Dependence of Raman Gain: PDRG）が大きいという問題があることが知られており、2 つの励起光源を偏波合成して用いる方法や、励起光源の出力側にデポライザを挿入する方法などによって DOP を小さくし、PDRG の低減を実現している<sup>6)</sup>。

しかし、信号光の使用波長の広帯域化や伝送速度の高速化に伴い、励起光源の波長数増加や、伝送に許容されるパワーペナルティが減少するために更なる PDRG の低減が必要となってきており、小型かつ低 DOP のデポライザの需要が強まりつつある。

従来の偏波保持ファイバを 45° 融着して作製される Lyot-type の全ファイバ型デポライザでは、その数十 m にもなるファイバの収納や、PDRG の劣化を引き起こす DOP の温度変動などの問題があったため、その改善を目的に今回開発を行った。開発のポイントは、ラマンアンプに用いる励起光源の特徴を利用した設計を行うことで、小型化及び DOP の温度変動低減を実現できたことである。

### 2. デポライザ

デポライザとは、図 1 に示すように、入力されたあらゆる完全偏光又は部分偏光を非偏光に変換して出力するモジュールである。

ここで、完全偏光とは、光の電界を  $E(x, y, z, t)$  で表すとき、ある時間  $t$  においてベクトルの終点が直線、円、楕円を描くような光のことを言い、非偏光とは、あらゆる状態の偏光を均等に含んだ光のことを言う。また、完全偏光と非偏光が混在した光のことを部分偏光と言い、ある光の全光量に対する完全偏光の割合を DOP で表す。よって、完全偏光では  $DOP = 100\%$ 、

\* 岡野電線株式会社

\*2 ファイテルフォトニクス研究所 光部品開発部

\*3 ファイテルフォトニクス研究所 光伝送サブシステム開発部

\*4 ファイテル製品事業部 光コンポーネント部

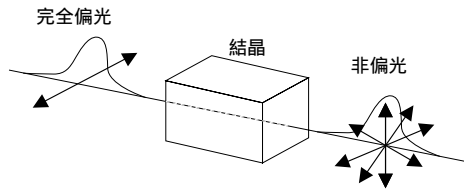


図1 デポライザの概要図  
Configuration of depolarizer

非偏光ではDOP = 0%，部分偏光では0～100%の間の値となる。

### 3. 従来の問題点

光通信としてのデポライザは、偏波保持ファイバ（Polarization Maintaining Fiber: PMF）を用いたものが実用化されており、長さ比が1:2の2本のPMFを45°融着して作製されるLyot-typeの全ファイバ型デポライザなどが多く用いられている<sup>7)8)</sup>。

しかし、全ファイバ型デポライザには、大きく分けて2つの問題点がある。1点は、温度変動によるDOPの劣化、もう1点はその収納スペースに関する問題である。

温度変動によるDOPの劣化は、アンプ組立てにおけるLDや光部品の融着部に微小な偏波状態の変動要因が加わる場合があり、アンプ内の温度変化などの影響を受けてデポライザへの入射光の偏波状態（State Of Polarization: SOP）が変動してしまうために生じていると考えられる。図2に、従来のデポライザに-10～70の温度変化を加えたときのDOPの変動を示す。図2から分かるように、DOPは4%～15%の間で変動しており、最大で15%程度にまで劣化している。

収納スペースに関しては、全ファイバ型デポライザではファイバ長が20m以上にも及ぶことがあり、その収納スペースの確保が必要となっている。一方、アンプの小型化が進む中でファイバ収納部の省スペース化の要求が強まってきており、全ファイバ型デポライザではファイバ長と許容曲げ半径の制約から省スペース化の対応が困難となっている。また前述のDOP温度変動を低減するためにファイバ収納部に断熱パッケージを用いる場合は更に省スペース化が困難である。

### 4. 開発品の特徴及び目標特性

今回開発したデポライザは、これらの問題を解決する以下の特徴を有する設計とした。

DOPの劣化の問題に関しては、DOPが特に温度変動の影響を大きく受けて劣化していることから、DOP劣化は入射光の偏波状態の変動による影響と考えられるので、複屈折結晶の前にポライザを設けることにより複屈折結晶に入射する光の偏波状態を安定させることで、DOPの劣化を大幅に減少させることが可能な設計とした。

収納スペースの問題に関しては、全ファイバ型デポライザでは必要ファイバ長やファイバの許容曲げ半径の制約から大幅な省スペース化が困難であるため、複屈折結晶を用いる設計とした。また、励起光源の特徴を利用して複屈折結晶の長さを最適設計することで、収納スペースを従来の1/10程度にまで低

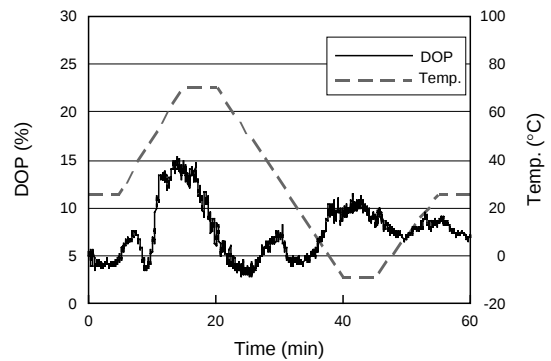


図2 従来のデポライザのDOP温度特性  
Temperature dependence of DOP of conventional depolarizer

表1 開発の目標特性  
Target characteristics of depolarizer development

|                       | Min.                 | Max. | Unit | Remark     |
|-----------------------|----------------------|------|------|------------|
| Operating Temperature | -10                  | 70   | °C   |            |
| Operating Humidity    | 0                    | 85   | %RH  |            |
| Insertion Loss        |                      | 0.80 | dB   | @ $T_{op}$ |
| DOP                   |                      | 7    | %    | @ $T_{op}$ |
| Return Loss           | 50                   |      | dB   | @ $T_{op}$ |
| Package Dimension     | $\phi 5.5 \times 60$ |      | mm   |            |

減することが可能である。

表1に本開発品の開発目標特性を示す。

ここで、DOPの上限値は、PDRGが一般的な光部品に許容されるPDLと同程度以下になるように設定した<sup>6)</sup>。

### 5. 設計

#### 5.1 DOP劣化低減に関する設計

デポライザのDOP劣化は、複屈折結晶への入射光の偏波状態の変動に起因しており、アンプ組込み後のデポライザに関しては、アンプ内の温度変動がその主な要因となっている。

よって、複屈折結晶の前にポライザを配置する設計にすることで、複屈折結晶への入射光の偏波状態が安定し、DOP劣化の低減が可能になる。

図3に、複屈折結晶の前にポライザを配置した場合のDOPの温度特性を示す。図2と図3とから、ポライザを配置しない場合はDOPが15%まで劣化しているのに対して、ポライザを配置した場合には温度変動によるDOP変動は2%程度、DOP自体の値は最大で4%以下となっているので、ポライザを複屈折結晶の前に配置することでDOP劣化の低減が可能であることが分かる。

#### 5.2 省収納スペースに関する設計

デポライザは、あらゆる完全偏光又は部分偏光を非偏光に変換するモジュールであることは前述したとおりであるが、実際にそれを低損失かつ小型に設計することは非常に困難である。しかし、励起光源の特徴を利用することで、低損失かつ小型の励起光源用デポライザを設計することが可能である。

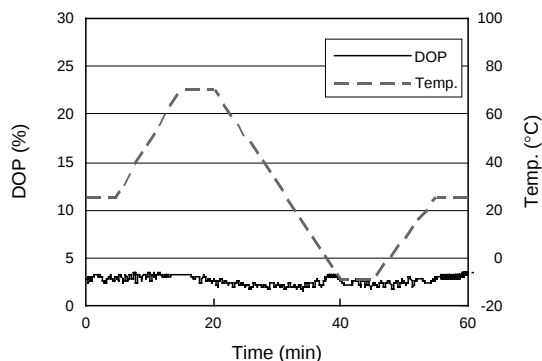


図3 ポラライザを配置した場合のDOP温度特性  
Temperature dependence of DOP of depolarizer with polarizer

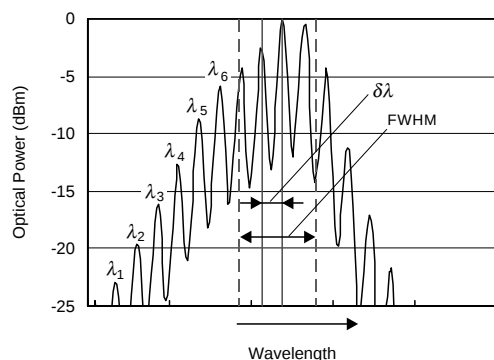


図4 励起光源の特徴  
Characteristics of pump LD

励起光源には、ファブリペロー型のLDが用いられているため、その光には図4に示すような以下の特徴がある。

- a) 完全偏光の直線偏光
- b) FPモード間隔 ( $\delta\lambda$ ) 周期に複数のピーク
- c) 半値全幅 (FWHM) が1 nm程度

よってa)から、複屈折結晶を通過することで位相の変化を生じた励起光源の波長スペクトルの各波長成分は、ポアンカレ球と原点を含むある任意の平面との交線上を移動するということが分かる。また、これとb)とから、励起光源の隣接FPモード間に位相差  $(2m+1)\pi$  を生じさせるような複屈折結晶を通過させると、図5に示すように隣接ピーク間で偏光状態と光強度の積が混合平均され、それを波長全体に渡って繰り返すと、その重心は原点に近づきDOPを小さくできる。

以下に上記励起光源の特徴を利用した設計について述べていく。まず、a)及びb)を利用した設計について述べる。

ある光(波長 $\lambda$ )の複屈折結晶を通過した後の位相変化 $\Gamma(\lambda)$ は、結晶の屈折率差 $=\Delta n$ 、長さ $=L$ とすると次式(1)で表される。

$$\Gamma(\lambda) = 2\pi L \cdot \Delta n / \lambda \quad (1)$$

よって、結晶を通過した後、隣接ピーク間に位相差 $(2m+1)\pi$ を生じさせる結晶の長さ $L$ は次式(2)から求まる。

$$\Gamma(\lambda) - \Gamma(\lambda + \delta\lambda) = (2m+1)\pi \quad (2)$$

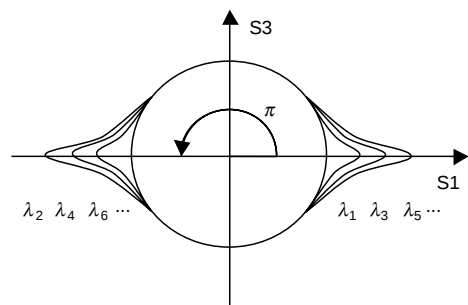


図5 偏光状態の混合平均によるDOPの低減  
Schematic of confused state of polarization by wavelength depolarization

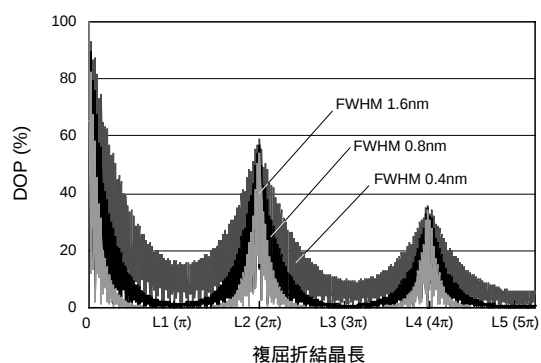


図6 複屈折結晶長 $L$ (位相差)とDOPとの関係  
Relationship between crystal length and DOP

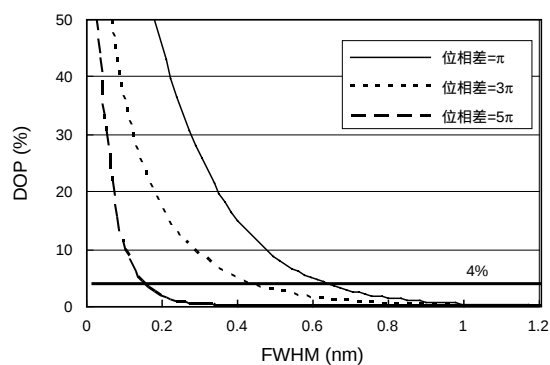


図7 励起光源のFWHMとDOPの関係  
Relationship between FWHM and DOP

ここで、複屈折結晶長 $L$ とDOPとの関係を図6に示す。図6から、位相差 $(2m+1)\pi$ ごとにDOPが極小値になっており、また位相差(次数 $m$ )が大きいくほどDOPが小さくなっていることが確認できる。

つぎにc)を利用した設計について述べる。位相差 $=\pi, 3\pi, 5\pi$  ( $m=0, 1, 2$ )のときのFWHMとDOPの関係を図7に示す。この図7から、FWHMが1 nm程度である励起光源においては、位相差 $=\pi$ のときでも十分小さいDOPを得られることが確認できる。よって、そのときの複屈折結晶長は(2)式にて $m=0$ とすると求まり、その長さは図6から、DOPの極小値を与える一番小さい値であることが分かる。

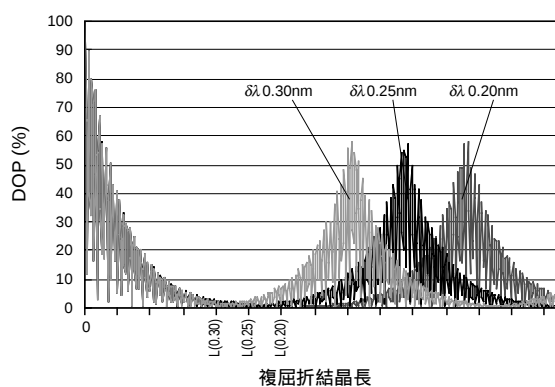


図8 様々な励起光源に対する複屈折結晶長の最適化  
Simulation results of optimum crystal length for various pump LDs

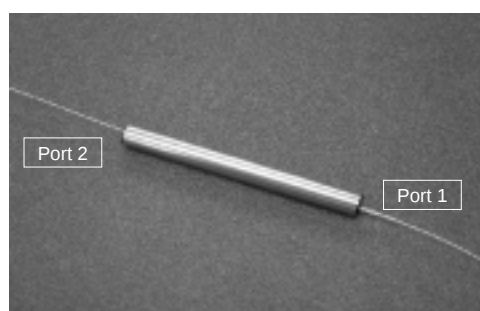


図9 本モジュールの外観写真  
Appearance of a depolarizer module

### 5.3 設計のカスタマイズ

以上の設計手法を用いることにより、 $\delta\lambda$ やFWHMが異なる様々な励起光源に対応した設計の最適化が可能となっている。

一例として、FWHMが0.8 nmで $\delta\lambda$ が0.20 nm, 0.25 nm, 0.30 nmの3種類の励起光源についてDOPと複屈折結晶長の相関を計算した結果を図8に示す。この図8から、各種励起光源に対応した複屈折結晶長の最適化が可能かつ必要であることが分かる。

## 6. 構成

本開発品の外観写真を図9に示す。外径5.5 mm、長さ60 mmとなっており、開発目標通りの小型化が実現されている。図9において、PMFからなるPort 1から入力された励起光源からの完全偏光は、ポラライザ、複屈折結晶を通過し、SMFからなるPort 2から非偏光に変化されて出力される構成となっている。

## 7. 特性

試作した本モジュールの光学特性について以下に述べる。

図10、11にDOP及び挿入損失の温度特性グラフを示す。図12に示す特徴を有する励起光源に対し、-10 ~ +70において、DOP 4%、DOP変動 2%、挿入損失 0.8 dBと良好な特性を得られた。表2に本開発品の代表特性をまとめる。

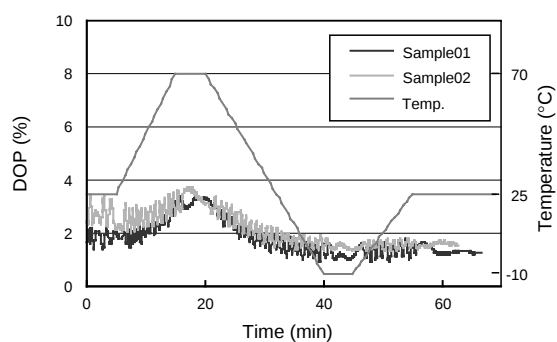


図10 DOPの温度特性  
Temperature dependence of DOP of crystal type depolarizer with polarizer

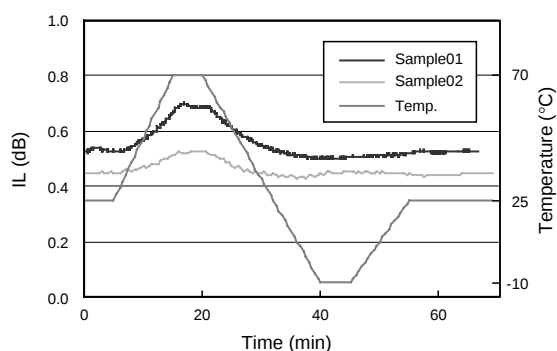


図11 挿入損失の温度特性  
Temperature dependence of insertion loss of crystal type depolarizer with polarizer

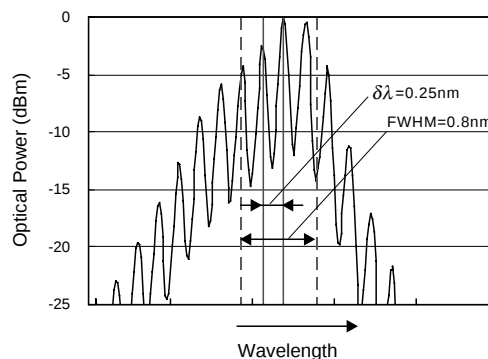


図12 本試作に用いた励起光源の波長特性  
Wavelength spectrum of pump LD

表2 開発品の代表特性  
Experimental results of crystal type depolarizer

|                       | Min.                 | Max. | Typ. | Unit | Remark     |
|-----------------------|----------------------|------|------|------|------------|
| Operating Temperature | - 10                 | 70   |      | °C   |            |
| Operating Humidity    | 0                    | 85   |      | %RH  |            |
| Insertion Loss        |                      | 0.80 | 0.50 | dB   | @ $T_{op}$ |
| DOP                   |                      | 7    | 4    | %    | @ $T_{op}$ |
| Return Loss           | 50                   |      | 55   | dB   | @ $T_{op}$ |
| Package Dimension     | $\phi 5.5 \times 60$ |      |      |      | mm         |

## 8. おわりに

これからの需要増加が期待されるラマンアンプに必須とされるデポライザの開発を行い、励起光源の特徴を利用した光学設計の最適化を行うことにより、従来に比べて大幅な小型化と優れたDOP特性を得られる結晶型デポライザを実現した。

特にDOPにおいては全温度範囲にて4%以下という良好な特性を実現しており、今後の光通信における大容量化に伴うアンプへの厳しい利得特性を実現するために幅広く用いられることが期待される。

## 参考文献

- 1) Y.Aoki: Fiber Raman amplifier properties for applications to long-distance optical communications, Opt. and Quantum Electronics, vol.21, S89-S104( 1989 )
- 2) T.Kimura et al.: High Temperature operation quarter Watt 1480nm pump LD module, OAA'99, ThD12( 1999 )
- 3) Y.Emori et al.: Optical Amplifiers and Their Applications, OSA'98, PD3( 1998 )
- 4) Y.Emori et al.: 100nm bandwidth flat gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength-channel WDM high power laser diodes, OFC'99, PD19( 1999 )
- 5) S.Namiki et al.: Ultrabroad-Band Raman Amplifiers Pumped and Gain-Equalized by Wavelength Division-Multiplexed High-Power Laser Diodes, IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron. 7, 3-16 ( 2001 )
- 6) Y.Emori et al.: Cost-effective depolarized diode pump unit designed for C-band flat-gain Raman amplifiers to control EDFA gain profile, OFC2000, FF4( 2000 )
- 7) K.Bohm et al.: Performance of Lyot Depolarizers with Birefringent Single-Mode Fibers, J of Lightwave Tech., LT-1, 71-74( 1983 )
- 8) S.Matsushita et al.: Design of Temperature Insensitive Depolarizer for Raman Pump Laser Diode, OFC2002, WB3 ( 2002 )